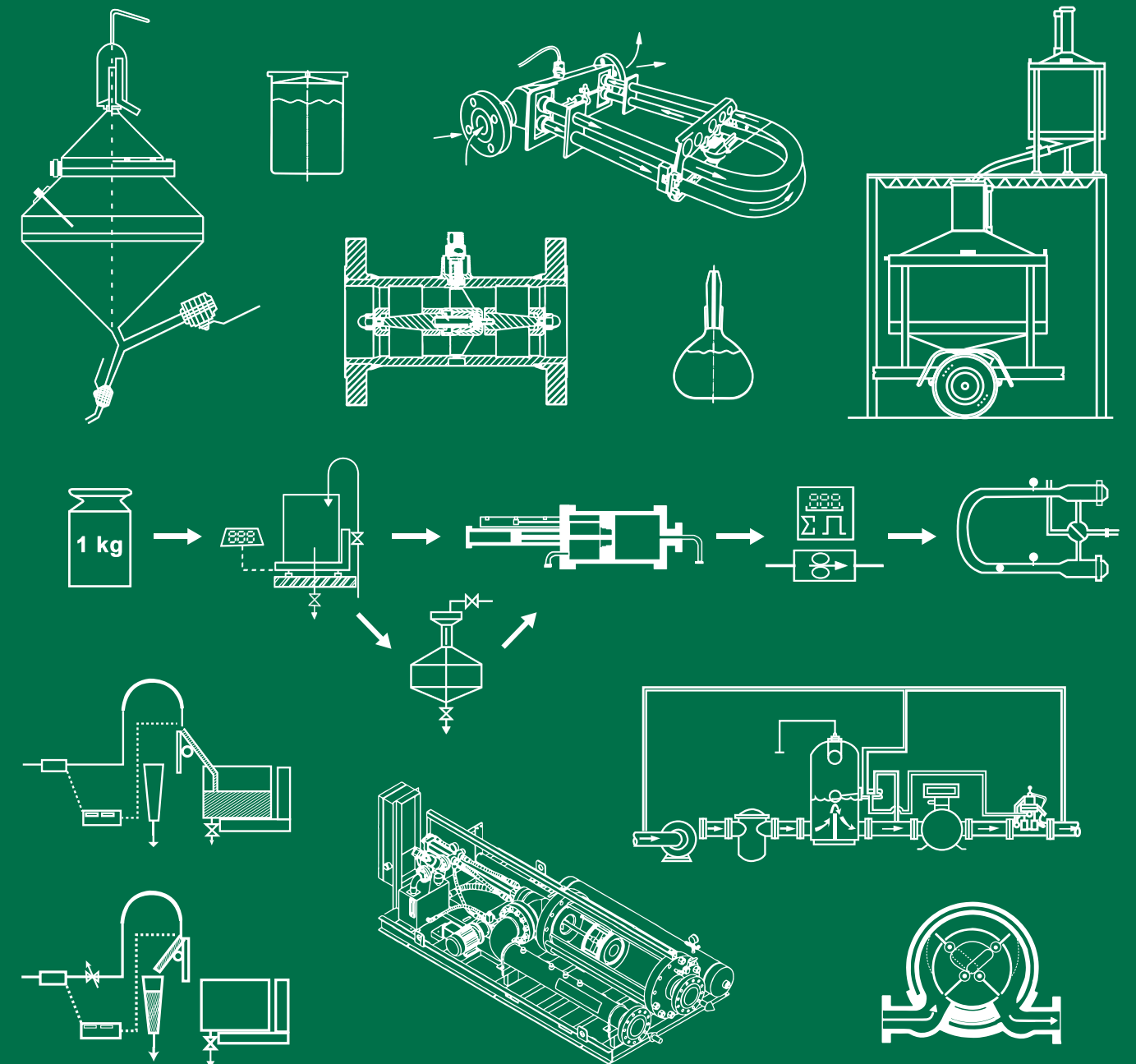


การคำนวณผลการสอบเทียบทางด้านปริมาตร (ฉบับปรับปรุง)

การคำนวณผลการสอบเทียบทางด้านปริมาตร (ฉบับปรับปรุง)

จรินทร์ สุพรรณรักษ์
สถิติ ชีววรรณ





การคำนวณผลการสอบเทียบทางด้านปริมาตร (ฉบับปรับปรุง)

เรียบเรียงโดย

นายจรินทร์ สุทธนารักษ์

นายสาธิต ชูสุวรรณ

สำนักงานกลางชั่งตวงวัด

Central Bureau of Weights & Measures

คำนำ

การสอบเทียบปริมาตร (Volumetric Calibration) ได้มีการพัฒนาวิธีการสอบเทียบมาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้ผลถูกต้องแม่นยำเพียงพอต่อการใช้งาน ดังนั้นผู้ทำการสอบเทียบต้องมีความรู้ความเข้าใจในองค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสอบเทียบเป็นอย่างดี เช่น ระบบมาตรวัด (Metering Unit) เพื่อให้ปฏิบัติงานได้สอดคล้องกับธรรมชาติของระบบการวัดนั้นๆ การเลือกแบบมาตรา (Standards) ให้เหมาะสมในการสอบเทียบปริมาตรภายใต้โครงสร้างการถ่ายทอดแบบมาตราทางปริมาตรที่เหมาะสม เข้าใจในการหาค่าตัวแปรที่มีผลต่อปริมาตรที่ต้องการวัดเพื่อนำมาใช้คำนวณ หาผลการสอบเทียบ นำไปสู่การจัดทำรายงานผลการสอบเทียบปริมาตรได้อย่างถูกต้องแม่นยำตามมาตรฐานสากล

ตำราและเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการวัดปริมาตรในงานด้านชั่งตวงวัดในเชิงกฎหมาย (Legal Metrology) เป็นเรื่องที่มีขอบเขตกว้างขวางหลากหลายทั้งเนื้อหาและสัญลักษณ์ที่ใช้ และส่วนใหญ่เป็นภาษาต่างประเทศ ด้วยเหตุนี้สำนักงานกลางชั่งตวงวัดจึงได้รวบรวมเรียบเรียงเรื่องดังกล่าวให้เหมาะสม และลำดับขั้นตอนการคำนวณให้เป็นมาตรฐานเดียวกันสำหรับผู้ปฏิบัติงานไว้ในหนังสือ “การคำนวณผลการสอบเทียบทางด้านปริมาตร” (ฉบับปรับปรุง) เล่มนี้ เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถศึกษาค้นคว้าและใช้เป็นเอกสารอ้างอิงในการปฏิบัติงาน นอกจากนี้ยังมีความมุ่งหวังที่จะเผยแพร่ความรู้ดังกล่าวแก่ผู้ที่มีความสนใจทั่วไปด้วย

หวังว่าหนังสือเล่มนี้คงจะเป็นประโยชน์ต่อเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานด้านการสอบเทียบปริมาตรและผู้ที่เกี่ยวข้องตามสมควร



นางสาววิบูลย์ลักษณ์ ร่วมรักษ์
อธิบดีกรมการค้าภายใน

คำนำผู้เรียบเรียง

หนังสือ “การคำนวณผลการสอบเทียบทางด้านปริมาตร” เล่มแรกถูกเขียนเมื่อประมาณ 20 ปีที่แล้ว วันนี้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงไปมากแล้ว หันซ้ายหันขวาสุดท้ายต้องนั่งลงเขียนทบทวนแก้ไขเพิ่มเติมใหม่ เพราะตระหนักดีว่า “ทำงานแทบตาย สุดท้ายต้องจบลงที่ให้ความรู้คน” และ “ทั้งความรู้สะสมให้คนรุ่นหลังต่อไป” การทบทวนเขียนหนังสือเล่มนี้จึงเป็นข้อสรุปที่น่าสนใจ

จากเดิมหนังสือประกอบด้วย 12 บทด้วยกัน ภาครวนี้เหลือเพียง 9 บท แต่จำนวนหน้ายังพอสู้กับเล่มแรกเล่มเดิม ขอให้ซึ่งตวงวัดเราอ่านกันดีๆ เหนื่อยก็พัก หายเหนื่อยก็อ่านต่อ โดยเฉพาะคนรุ่นใหม่หากว่าเนื้อหาใดไม่สมบูรณ์ก็ให้ค้นคว้าศึกษาและรวบรวมวกเข้ากับประสบการณ์เขียนหนังสือแตกหน่อต่อ ยอดเหยียบบ่าต่อสูงขึ้นไป เพื่อให้งานซึ่งตวงวัดในเชิงกฎหมาย (Legal Metrology) ของราชอาณาจักรไทยเป็นที่พึงของประชาชนคนไทยได้ รักษาผลประโยชน์ของคนไทยได้ เพราะเราได้รับราชการและปฏิบัติราชการภายใต้พระราชบัญญัติมาตราซึ่งตวงวัด พ.ศ. 2542 (ซึ่งฉบับเดิมเป็นพระราชบัญญัติมาตราซึ่งตวงวัด พ.ศ. 2466) ในการกำกับดูแลเครื่องซึ่งตวงวัดที่ใช้ตีมูลค่าสินค้าและบริการ แล่งงานด้านนี้มีผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทยอย่างกว้างขวางนัก (น่าจะมึนนักเศรษฐศาสตร์มาประเมินผลกระทบงานซึ่งตวงวัดต่อเศรษฐกิจและสังคมของเราบ้างนะ พุดไปใครก็ไม่เชื่อเราสักที) นอกจากนี้ยังมีเครื่องซึ่งตวงวัดอีกมากมายที่ใช้ตีมูลค่าสินค้าและบริการที่เราต้องขยับขยายกันต่อไป

เช่นเดิม เนื่องจากเทคโนโลยีมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ข้อมูล องค์ความรู้ก็ต้องสะสม ของเก่าไปของใหม่มา (CHANGE นะครับ) การปรับตัวและเปิดใจเรียนรู้รับสิ่งใหม่ๆ เข้ามาพร้อมปรับใช้จึงเป็นเรื่องสำคัญ

ผู้เรียบเรียงหวังว่าหนังสือ “การคำนวณผลการสอบเทียบทางด้านปริมาตร” ฉบับปรับปรุงใหม่เล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อพนักงานเจ้าหน้าที่ซึ่งตวงวัด ผู้ปฏิบัติงานและผู้ที่มีความสนใจรวมทั้งผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องงานซึ่งตวงวัดในเชิงกฎหมายไม่มากนักน้อย สาธุ

ผู้เรียบเรียง
สำนักงานกลางซึ่งตวงวัด
นนทบุรี พ.ศ. 2558

สารบัญ

บทที่ 1	ศัพท์ที่ใช้เกี่ยวกับสมรรถนะการทำงาน (Performance Terminology)	1
บทที่ 2	การหาค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Dynamic Temperature Determination) การเลือกเครื่องมือวัดอุณหภูมิ เครื่องวัดอุณหภูมิ (Temperature Devices) 1. เทอร์โมมิเตอร์ชนิดกระเปาะแก้ว (Glass Test Thermometers) 2. Permanent Glass Thermometers 3. Filled Bulb Systems 4. Electronic Temperature Devices 5. เครื่องวัดอุณหภูมิชนิดอื่นๆ การเลือกช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermowell Selection) ชนิดของช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermowell type) ตำแหน่งติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature Sensor Placement) ข้อกำหนดเครื่องวัดอุณหภูมิ (Temperature Requirements) การสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ	14
บทที่ 3	การหาค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Dynamic Pressure Determination) ความดันสุญญากาศ ความดันบรรยากาศ ความดันสัมบูรณ์ และความดันเกจ (Vacuum, Atmospheric Pressure, Absolute Pressure and Gauge Pressure) เครื่องวัดความดัน (Pressure Devices) 1. Bellows-Type Pressure Sensors 2. Bourdon and Helical Pressure Sensors 3. Diaphragm or Capsule-Type Sensors 4. เครื่องวัดความดันอิเล็กทรอนิกส์ (Digital Pressure) มาตรฐาน ASME B40.1 Pressure Gauge	50

(Correction Factors)

ของเหลวที่ทำการวัดต้องอยู่ในสถานะของเหลวอย่างเดียว (Single - Phase Liquid)

ของเหลวชนิด Newtonian (Newtonian Liquid)

สภาวะอ้างอิง (Reference Condition) หรือ สภาวะมาตรฐาน (Standard Condition)

ตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณ (Correction Factors)

1. มิเตอร์แฟคเตอร์ (Meter Factor; MF)
2. การแก้ไขค่าสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อน้ำ (Correction for the Effect of Temperature on Water); C_{tw} (Ctw)
3. การแก้ไขค่าสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อโลหะ (Correction for the Effect of Temperature on Steel); C_{ts} หรือ (CTS)
4. การแก้ไขค่าสำหรับอิทธิพลของความดันมีผลต่อโลหะ (Correction for the Effect of Pressure on Steel) ; C_{ps} หรือ (CPS)
5. การแก้ไขค่าสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อของเหลว (Correction for the Effect of Temperature on a Liquid) ; C_{tl} หรือ (CTL)
6. การแก้ไขค่าสำหรับอิทธิพลของความดันมีผลต่อของเหลว (Correction for the Effect of Pressure on Liquid); C_{pl} หรือ (CPL)

ความสัมพันธ์ C_{tl} (CTL), C_{pl} (CPL), C_{ts} (CTS), C_{ps} (CPS) และ C_{tw} (CTW)

หลักการคำนวณค่าตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณ (Correction Factors) และการปิดค่า

หลักการปิดตัวเลขนัยสำคัญ

(Gravimetric Calibration of Small Volume Measuring Device)

1. เครื่องตวงขนาดเล็ก (Small Volume Measuring Device)
 - 1.1. ขวดแก้วกันโป่ง หรือ ฟลาสค์ (Flasks)
 - 1.2. กระบอกแก้ว (Graduated cylinders)
 - 1.3. พิคะโนมิเตอร์ (Pyknometer) , ISO 2811-1;1997 และ DIN 53 217 Part 2; 1991
 - 1.4. ลูกจุ่ม (Spherical Displacement Float or Plummets), ISO 2811-2;1997 และ DIN 53 217 Part 3;1991
2. ตรวจสอบสภาพเครื่องตวงขนาดเล็กเบื้องต้นด้วยสายตา (Visual Check)
3. การเลือกเครื่องชั่งไฟฟ้า
4. เครื่องวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพันธ์และเครื่องวัดความกดดันบรรยากาศ
5. เครื่องวัดอุณหภูมิของน้ำตัวกลางสอบเทียบ
6. น้ำกลั่น 2 ครั้ง (Double distilled water)

7. ขั้นตอนการสอบเทียบ
8. การคำนวณผลการสอบเทียบเครื่องตวงขนาดเล็ก
9. การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดค่าในการสอบเทียบ (Standard Uncertainty)

บทที่ 6 การสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะโดยวิธีการตวงเปรียบเทียบและชั่งน้ำหนัก (Calibration of Graduated Neck-Type Metal Proving Tank by Volumetric Method and Gravimetric Method)

141

มาตรฐานเครื่องตวงแบบมาตราที่ใช้ในภาคสนามชนิดถังตวงโลหะแบบคอมิซิดขึ้นหมายมาตรา

แสดงปริมาตร (Graduated Neck Type Volumetric Field Standards)

- ก. ขอบเขต
- ข. ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะ
- ค. อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาด (Maximum Permissible Error)
- ง. ค่าความสามารถในการทำซ้ำได้ (Repeatability)
- จ. ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)
- ฉ. รอบอายุการสอบเทียบ

การสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะโดยวิธีการตวงเปรียบเทียบ (Volumetric Method)

การเลือกของเหลวเป็นสารตัวกลางสำหรับการสอบเทียบ

ขั้นตอนการสอบเทียบด้วยวิธีการตวงเปรียบเทียบ (Volumetric Method)

การคำนวณผลการสอบเทียบเครื่องตวงชนิดถังตวงทำด้วยโลหะ

การคำนวณหาขีดขึ้นหมายมาตราของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ

การหาขีดขึ้นหมายมาตราที่พิกัดความจุ (Nominal Capacity) ของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ ณ สภาวะอ้างอิง

การคำนวณหาค่าความสามารถทำซ้ำได้ (Repeatability)

การคำนวณเลขและการปิดค่า

ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดกำลังของเครื่องตวงแบบมาตรากับพิกัดกำลังเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ต้องการสอบเทียบ

การสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก (Gravimetric Method)

การเลือกเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์

ขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก

ขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก

การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดค่าในการสอบเทียบ (standard uncertainty)

การคำนวณหาค่าความสามารถทำซ้ำได้ (Repeatability)
เกณฑ์การตัดสินใจผลการตรวจสอบความเที่ยงการสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถัง
ตวงทำด้วยโลหะโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก (Gravimetric Method)

บทที่ 7 การสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวและมาตรวัดแบบมาตราด้วยถังตวงแบบ **211**

มาตรา (Flowmeter Calibration by Volumetric Method)

ก. มาตรวัดปริมาตรของเหลว PD (Positive Displacement Flow Meters)

ข. มาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์ (Turbine Flow Meters)

ค. มาตรวัดมวลคอริโอลิส (Coriolis Mass Flowmeters)

มาตรวัดปริมาตรของเหลวทั่วไป (Flowmeter) กับมาตรวัดแบบมาตรา (Master Meter)

แตกต่างกันอย่างไร

ระบบการวัดปริมาตรของเหลว

ชั้นความเที่ยงมาตรวัดปริมาตรของเหลว

การสอบเทียบมาตรวัดของเหลวทั่วไป (Flowmeter) และมาตรวัดแบบมาตรา (Master Meter)

เตรียมการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวทั่วไป (Flowmeter) กับมาตรวัดแบบมาตรา (Master Meter)

การคำนวณผลการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวทั่วไป (Flowmeter) กับมาตรวัดแบบมาตรา (Master Meter)

บทที่ 8 การสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กด้วยถังตวงแบบมาตรา **299**

(Base Volume Determination by Waterdraw Method)

ลักษณะและรูปแบบโดยทั่วไปของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก กับ Timer, Pulse Counter, และ Pulse Interpolation

วิธีการสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Calibration Methods)

ปริมาตรมาตรฐาน (Base Volume) ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

การคำนวณผลการสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

การป้อนค่า (Configuration) ใน FlowCom / Display Unit

การเรียกดูใบรายงานผลการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิและเครื่องวัดความดัน

บทที่ 9 การสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลว **337**

(Calibration and/or Verification of Flowmeter)

มาตรวัดปริมาตรของเหลวในระบบการส่งจ่าย

วิธีการสอบเทียบ (Calibration Method for Liquids)

โครงสร้างการถ่ายทอดแบบมาตราในการสอบเทียบมาตรวัด (Liquid Metering Hierarchies)

ข้อเปรียบเทียบการใช้แบบมาตรา

Pulse Interpolation

ค่าเค - แฟคเตอร์ (K - Factor)

การสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวเทียบกับมาตรวัด

แบบมาตรา (Master Meter Comparison)

การสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย

(Flowmeter) ด้วยท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Compact Prover)

Audit Trail และ Weights and Measures Control

เอกสารอ้างอิง

417

บทที่ 1

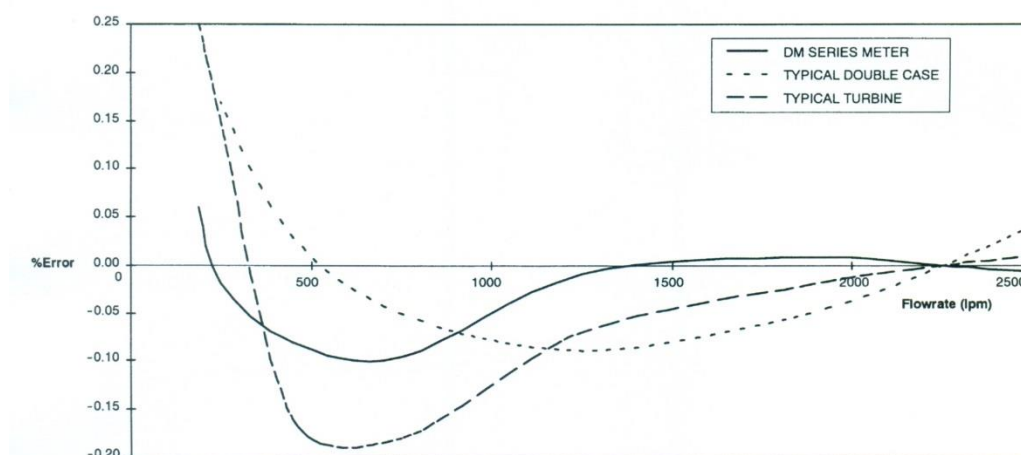
ศัพท์ที่ใช้เกี่ยวกับสมรรถนะการทำงาน (Performance Terminology)

ก่อนที่ทำการศึกษาการคำนวณผลการสอบเทียบทางด้านปริมาตรเพื่อหาปริมาตรที่วัดได้จากมาตรวัด ปริมาตรของเหลว (Flow Meter) หรือแบบมาตรต่างๆ เช่น ถังตวงแบบมาตร (Prover Tank) ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Small Volume Prover หรือ Compact Prover) หรือ ท่อสอบเทียบ (Pipe Prover) จำเป็นต้องทำความเข้าใจกับศัพท์บางคำที่อาจพบเห็นบ่อยๆ เพื่อความเข้าใจไปในทิศทางเดียวกัน

อุณหภูมิห้อง (Ambient Temperature) ใช้อ้างถึงค่าอุณหภูมิรอบๆ เครื่องชั่งตวงวัด หรือแบบมาตร เป็นค่าอุณหภูมิที่ถูกอ้างถึง แต่ไม่ใช่อุณหภูมิมาตรฐานหรืออุณหภูมิอ้างอิง (ปกติกำหนดไว้ที่ 15 หรือ 30°C) เรียกกันทั่วไปว่า “อุณหภูมิห้อง”

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative Density) หรือความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) เป็นอัตราส่วนความหนาแน่นของสารเทียบกับความหนาแน่นสารอ้างอิง น้ำถูกใช้เป็นสารอ้างอิงในการใช้เทียบกับของเหลวและของแข็ง และใช้อากาศหรือไฮโดรเจนเป็นสารอ้างอิงในการใช้เทียบกับก๊าซ

สมรรถนะของมาตรวัด (Meter Performance) การแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่วัดได้กับปริมาตรจริงที่ผ่านมาตรวัด หรืออยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับมิเตอร์แฟคเตอร์ หรืออัตราการไหลกับ K-Factor เป็นต้น



รูปที่ 1-1 กราฟสมรรถนะมาตรวัดปริมาตรของเหลว (Meter Performance)

Dimensionless Numbers เป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย ซึ่งถูกใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์, ฟิสิกส์, และวิศวกรรมศาสตร์ โดยปริมาณดังกล่าวถูกใช้บรรยายระบบหรือลักษณะทางฟิสิกส์แต่ไม่มีหน่วยวัดทางฟิสิกส์

บ่อยครั้งได้จากการจัดรูปความสัมพันธ์ของระบบโดยอาจมีหน่วยหักล้างกันซึ่งค่าดังกล่าวบ่อยครั้งจะบ่งบอกลักษณะหรือพฤติกรรมของระบบใดระบบหนึ่ง **Dimensionless Numbers** ที่เราจะเจอในหนังสือเล่มนี้ เช่น ค่า C_{ts} , C_{tl} , C_{ps} , C_{pl} , Meter Factor เป็นต้น

มิเตอร์แฟคเตอร์ (Meter Factor; MF) การซื้อขายผลิตภัณฑ์ในปริมาณคราวละน้อยๆ (retail sale) และดำเนินการวัดปริมาตรภายใต้เงื่อนไขคงที่หรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง พบว่าไม่มีความจำเป็นที่ต้องทำการปรับค่าปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดภายในช่วงการวัดได้ซึ่งผ่านการสอบเทียบแล้วยังคงให้ผลการวัดที่มีค่าถูกต้องแม่นยำ ตัวอย่างมาตรวัดประเภทนี้ได้แก่ มาตรวัดที่ใช้ในการขายปลีกตามสถานีบริการน้ำมัน เป็นต้น แต่หากการซื้อขายหรือการขนถ่ายผลิตภัณฑ์คราวละมากๆ (Wholesale) ผ่านการวัดด้วยมาตรวัดเพียงตัวเดียวในการวัดผลิตภัณฑ์ต่างชนิดกันหรือต้องทำการวัดที่อัตราการไหลแตกต่างกันในแต่ละครั้งที่ทำการส่งจ่ายเป็นการยากที่ทำการปรับแต่งแก้ไขมาตรวัดในการซื้อขายหรือขนถ่ายแต่ละครั้ง ด้วยเหตุนี้หลังจากสอบเทียบมาตรวัดด้วยถังตวงแบบมาตราหรือมาตรวัดซึ่งผ่านการสอบเทียบแล้วมีความแม่นยำสูงเรียกว่า “มาตรวัดมาตรฐาน หรือมาตรวัดแบบมาตรา (master meter)” เพื่อหามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดดังกล่าวในช่วงแคบๆของแต่ละสภาวะการทำงานจึงจำเป็นต้องทำการชดเชยปรับแต่งมาตรวัดเพื่อป้องกันการปรับแต่งใดๆที่อาจจะเกิดขึ้นโดยไม่ได้รับอนุญาต

วัตถุประสงค์การหามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดเพื่อให้แน่ใจว่าการวัดในแต่ละครั้งมีความแม่นยำเพียงพอโดยไม่คำนึงถึงสภาวะการทำงานที่เปลี่ยนไปเช่น ความหนาแน่น, ความหนืด, อัตราการไหล, อุณหภูมิ, ความดันหรือคุณสมบัติการหล่อลื่นของเหลวที่วัด ซึ่งเป็นแนวคิดในทางทฤษฎีเท่านั้นแต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติบ่อยครั้งที่จะทำการสอบเทียบมาตรวัดภายใต้สภาวะเงื่อนไขการทำงานจำเพาะเพียงสภาวะการทำงานสภาวะหนึ่งเท่านั้นดังนั้นหากสภาวะการทำงานของมาตรวัดจำเพาะหนึ่งๆได้เปลี่ยนไป เช่น อัตราการไหลเปลี่ยนแปลงมากเกินไป, ความหนืดของเหลวที่วัดอยู่เปลี่ยนไปมาก เป็นต้น ต้องดำเนินการสอบเทียบมาตรวัดใหม่เพื่อหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ใหม่ ด้วยเหตุนี้ในทางปฏิบัติจึงควรทำการสอบเทียบมาตรวัดให้มีสภาวะการทดสอบใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานจริงของมาตรวัดให้มากที่สุดเพื่อได้ค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ซึ่งให้ผลการวัดมีความแม่นยำมากที่สุด

คำจำกัดความของมิเตอร์แฟคเตอร์จึงหมายถึงอัตราส่วนของปริมาตรจริงที่ผ่านมาตรวัดขณะทำการสอบเทียบ (Proving or Calibrating) เทียบกับปริมาตรที่วัดได้จากมาตรวัด

$$MF = \frac{V}{V_m} \quad (\text{Eq.1-1})$$

เมื่อ V = ปริมาตรจริงที่ผ่านมาตรวัด ณ สภาวะการทำงานของมาตรวัด
 V_m = ปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัด

แต่พบว่าระหว่างทำการสอบเทียบ อุณหภูมิและความดันภายในมาตรวัดและแบบมาตรา (Prover or Standard) มีผลกระทบอย่างมากต่อการคำนวณหามิเตอร์แฟคเตอร์ ทั้งนี้เพราะการหาค่าปริมาตรจริงๆของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดระหว่างทำการสอบเทียบต้องหาจากปริมาตรจริงที่วัดได้ของแบบมาตราซึ่งค่อนข้างเป็นวิธีทางอ้อมและมีปัญหาเนื่องจากสภาวะการทำงาน ได้แก่ อุณหภูมิและความดันของแบบมาตราและของมาตรวัดซึ่งในทางปฏิบัติบางครั้งก็มีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อให้เป็นมาตรฐานการปฏิบัติเดียวกันจึงกำหนดความหมายมิเตอร์แฟคเตอร์ใหม่ คือ

$$MF = \frac{V_{pc}}{V_{mc}} \quad (\text{Eq.1-2})$$

เมื่อ MF = มิเตอร์แฟคเตอร์มาตรฐาน (Standard Meter Factor)
 V_{pc} = ปริมาตรของเหลวภายในแบบมาตราแก้ไขค่าไปยังสภาวะมาตรฐาน (15°C, 30°C หรือ 60°F, 0.0 psig)
 V_{mc} = ปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดแก้ไขค่าไปยังสภาวะมาตรฐาน (15°C, 30°C หรือ 60°F, 0.0 psig)

เนื่องจากมิเตอร์แฟคเตอร์ที่คำนวณได้สามารถใช้ได้เฉพาะในช่วงอุณหภูมิทำงาน (operating temperature) และความดันทำงาน (operating pressure) จำกัดค่าหนึ่งเท่านั้นถึงแม้ในทางทฤษฎีช่วงอุณหภูมิและช่วงความดันจะไม่มีผลกระทบต่อมิเตอร์แฟคเตอร์แต่อย่างใด ดังนั้นขณะทำการวัดด้วยมาตรวัดต้องคำนึงเสมอว่าอุณหภูมิและความดันต้องไม่มีค่าแตกต่างไปจากค่าอุณหภูมิและค่าความดันขณะทำการสอบเทียบมากจนเกินไป จนเป็นสาเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะและขนาดของโครงสร้างภายในตัวมาตรวัดหรือความหนืดของเหลวที่ทำการวัดอยู่ นั้นหมายถึงมิเตอร์แฟคเตอร์อาจเปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างใดก็ตามเมื่อสภาวะการทำงานของมาตรวัดเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะเงื่อนไขการสอบเทียบก็ให้ทำการสอบเทียบใหม่ทุกครั้ง

การนำค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ไปใช้งาน เมื่อรู้ค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ประจำมาตรวัด สามารถหาค่าปริมาตรจริงของเหลวได้หลังจากทำการวัดได้โดยมาตรวัด จาก

$$\text{ปริมาตรจริงที่วัดได้} = MF \times \text{ปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัด}$$

หรือ

$$\text{ปริมาตรจริงที่วัดได้} = MF \times C_{dlm} \times C_{plm} \times \text{ปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัด}$$

เมื่อ C_{dlm} = ค่าแก้ไขค่าสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อของเหลว เพื่อหาปริมาตรที่สภาวะมาตรฐานจากสภาวะทำงานของมาตรวัด

C_{plm} = ค่าแก้ไขค่าสำหรับอิทธิพลของความดันมีผลต่อของเหลว เพื่อหาปริมาตรที่สภาวะมาตรฐานจากสภาวะทำงานของมาตรวัด

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรวัด (Meter Error) บอกถึงค่าความแตกต่างปริมาตรที่ผ่านมาตรวัดจริง (Volume Discharged) กับปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัด (Indicated Volume) ซึ่งส่วนใหญ่จะบอกค่าเป็นเปอร์เซ็นต์

$$\text{Meter Error} = \frac{\text{Indicated Volume} - \text{Volume Discharge}}{\text{Volume Discharge}} \% \quad (\text{Eq.1-3})$$

แต่สำหรับงานด้านชั่งตวงวัดในเชิงกฎหมาย (Legal Metrology) เราจะกำหนดให้มาตรวัดมีอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาด (Maximum Permissible Error; MPE) ก็มาจากนิยามนี้แต่อาจมีรูปแบบเป็น

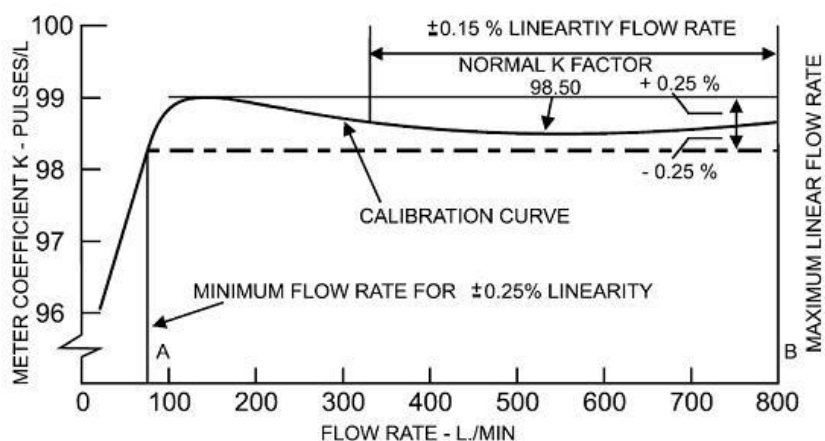
$$\text{Meter Error} = \frac{V_m - V_{STD}}{V_{STD}} \times 100 \% \quad (\text{Eq.1-4})$$

เมื่อ V_m = ปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัด
 V_{STD} = ปริมาตรที่อ่านได้จากแบบมาตรา

เค-แฟคเตอร์ (K-factor; KF) เมื่อพูดถึงค่าเค-แฟคเตอร์ในเทอมของมาตรวัดปริมาตรของเหลว ขอให้นึกถึงมาตรวัดที่มีหลักการทำงานของส่วนแสดงค่าแบบกลไก (mechanical display) และส่วนแสดงค่าแบบอิเล็กทรอนิกส์ (electronic display) หลังจากเราสอบเทียบมาตรวัดและพบว่ามาตรวัดแสดงผลการวัดที่ต่างออกไปจากปริมาตรที่แสดงโดยแบบมาตรวัดนั้นเราจึงทำการปรับแต่งส่วนแสดงค่า หากส่วนแสดงค่าเป็นแบบกลไกเราอาจทำการเปลี่ยนขนาดเฟืองทด เป็นต้น แต่หากส่วนแสดงค่าแบบอิเล็กทรอนิกส์เราก็เพียงปรับค่าเค-แฟคเตอร์ โดยพิจารณาจากค่าจำนวนเป็นพัลส์แรงดันไฟฟ้าต่อปริมาตรที่วัดได้ ด้วยเหตุนี้จึงใช้ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัลส์แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นของมาตรวัดกับปริมาตรของเหลวไหลผ่านมาตรวัด จึงเท่ากับ

$$K - factor = \frac{n}{V} \quad \text{pulses / liter} \quad (\text{Eq.1-5})$$

เมื่อ n = จำนวนครั้งของพัลส์ที่วัดได้จากมาตรวัด
 V = ปริมาตรที่วัดได้จากแบบมาตรา (prover)



รูปที่ 1-2 สมรรถนะมาตรวัดเทอร์ไบน์โดยทั่วไป

ในทางปฏิบัติเพื่อให้ได้ค่าเค-แฟคเตอร์ที่แม่นยำสูงจะดำเนินการทดสอบหาค่า n และค่า V หลายครั้ง ส่งผลให้เราสามารถใช้ค่าเค-แฟคเตอร์บ่งบอกปริมาตรจริงที่ไหลผ่านมาตรวัดได้ และมีค่า

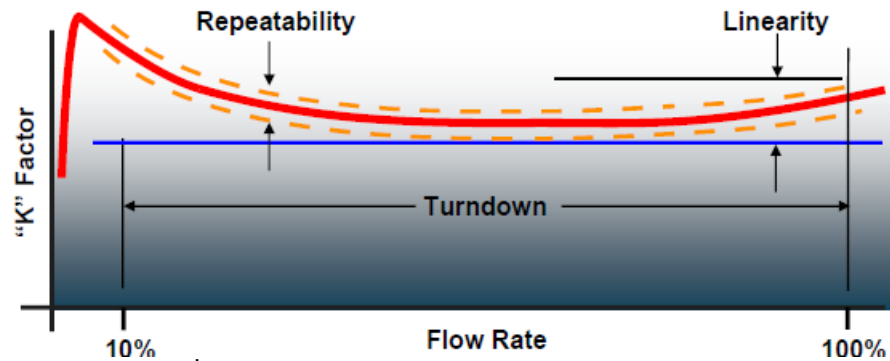
$$V_{\text{actual}} = \frac{n}{K - factor} \quad (\text{Eq.1-6})$$

จึงเห็นได้ว่าไม่ค่อยสะดวกมากนักที่จะนำค่าเค-แฟคเตอร์ (K-factor) ไปหารจำนวนพัลส์แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตออกมา บริษัทผู้ผลิตมาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์จึงให้ค่าเป็น **Meter factor** คือ

$$\text{Meter factor} = \frac{1}{K - factor} \quad (\text{Eq.1-7})$$

ดังนั้นอย่าสับสนระหว่างมิเตอร์แฟคเตอร์กับเค-แฟคเตอร์ เนื่องจากใช้กันคนละวัตถุประสงค์แต่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน เช่น ในการสอบเทียบมาตรวัดแบบมาตราซึ่งมีส่วนแสดงค่าแบบอิเล็กทรอนิกส์ เราจะจดค่าเค-แฟคเตอร์ (หน่วย pulses/liter) ก่อนในเบื้องต้น เมื่อสอบเทียบแล้วเสร็จทำการคำนวณหามิเตอร์แฟคเตอร์ (ไม่มีหน่วย) และพบว่ามียังค่าห่างจาก 1.0000 มากเกินไปเราก็ทำการปรับค่าเค-แฟคเตอร์จากนั้นทำการสอบเทียบใหม่

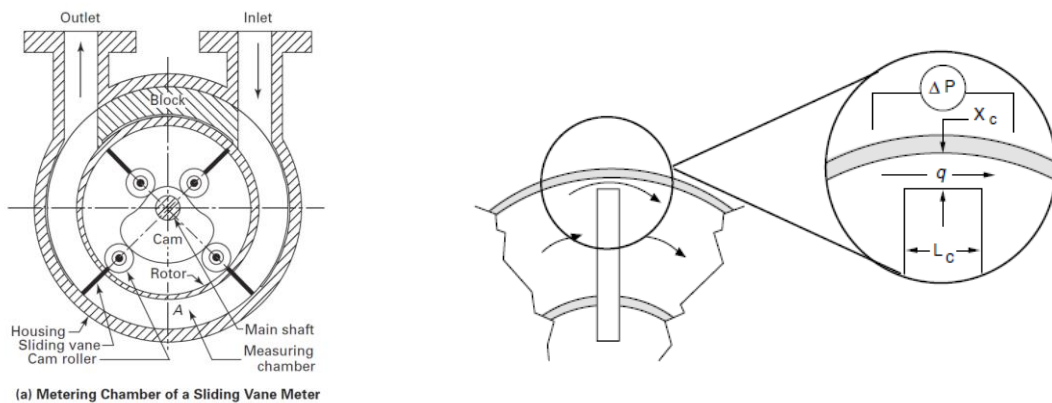
และหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ใกล้เคียง 1.0000 เราก็บันทึกค่าเค-แฟคเตอร์ของมาตรวัดและทำการซีลห้ามทำการปรับแก้ไขค่าเค-แฟคเตอร์ เป็นต้น



รูปที่ 1-3 Meter Performance ในเทอมของ K-Factor

ค่าเล็ดลอด (Slippage หรือ Slip Flow) คือปริมาณของเหลวที่อัตราการไหลหนึ่งไหลผ่านมาตรวัด โดยมาตรวัดไม่ได้ทำการจดบันทึกค่าปริมาณดังกล่าว

แต่ในทางปฏิบัติจริงๆ แล้วชิ้นส่วนของมาตรวัดไม่ว่าห้องวัดปริมาตร (Measuring Chamber) และส่วนวัดปริมาตร (Measuring Elements) ต่างก็มีการเปลี่ยนแปลงขยายตัวและหดตัวตามสภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันที่กระทำต่อมาตรวัด ดังนั้นการไหลเล็ดลอด (slippage) ผ่านมาตรวัดจะเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหล, ความหนืด, อุณหภูมิ, ความดัน และ ความเสียดทานของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ต่างๆ ด้วยเหตุนี้การไหลเล็ดลอดจึงมีผลต่อมิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัด อ่านเพิ่มเติมใน “หลักการทำงานและสมรรถนะ Turbine & Positive Displacement Meters” สำนักงานกลางชั่งตวงวัด

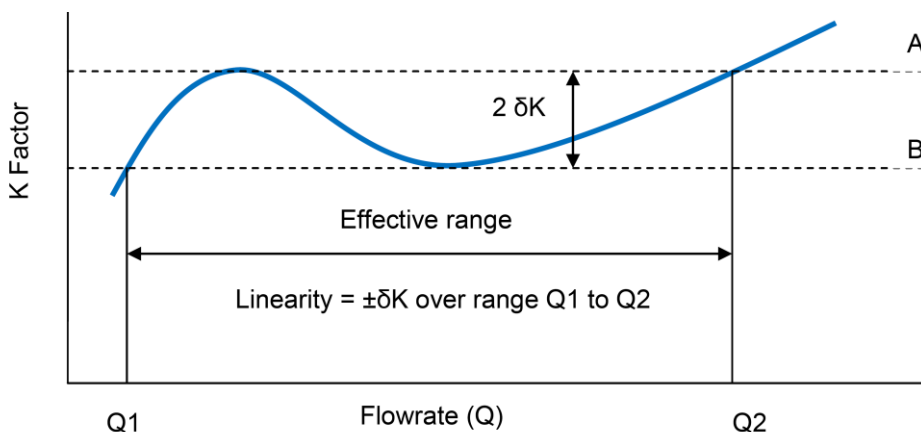


(a) Metering Chamber of a Sliding Vane Meter

รูปที่ 1-4 ความสัมพันธ์ของอิทธิพลที่มีผลต่อการไหลเล็ดลอดของมาตรวัด PD ที่อัตราการไหลต่างๆ

ความเป็นเชิงเส้นตรง (Linearity) เมื่อใช้ค่าความเป็นเชิงเส้นกับเครื่องชั่งตวงวัดจะหมายถึงสมรรถนะของเครื่องชั่งตวงวัดภายในช่วงการทำงานนั้นๆ ได้เบี่ยงเบนหรือต่างจากค่าในทางอุดมคติมากน้อยเพียงใด

ในกรณีมาตรวัดค่าเบี่ยงเบนมากที่สุดจากค่าเฉลี่ยมีเตอร์แพคเตอร์ของกราฟสมรรถนะมาตรวัดระหว่างช่วงการวัดค่าได้ที่อัตราการไหลสูงสุดและอัตราการไหลต่ำสุด หรือ **Linearity** คือ ความใกล้เคียงของเส้นกราฟที่มีค่าใกล้เคียงกับเส้นตรง บ่งบอกในรูปค่าบวกลบเปอร์เซ็นต์ ($\pm\delta K$) ภายในขอบเขต $2\delta K$ ดังในรูปที่ 1-5



รูปที่ 1-5 ความเป็นเชิงเส้นตรง (Linearity) ของมาตรวัดครอบคลุมภาพรวมช่วงอัตราการไหลหนึ่ง

สำหรับมาตรวัดปริมาณของเหลวความเป็นเชิงเส้นตรง (Linearity) หาได้จากสามการ

$$\text{Linearity}(\%) = \frac{\text{High MF} - \text{Low MF}}{\text{Average MF}} \times 100 \% \quad (\text{Eq.1-8})$$

หรือ

$$\text{Linearity}(\%) = \frac{\text{High K - Factor} - \text{Low K - Factor}}{\text{Average K - Factor}} \times 100 \%$$

โดยทั่วไปอาจพูดในเทอมของค่า Turndown ของมาตรวัด

ความไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Nonlinearity) คือ การเบี่ยงเบนสูงสุดระหว่างคุณลักษณะตามที่เป็นจริง (the actual functional characteristic) กับคุณลักษณะตามที่กำหนด (the specified functional characteristic) ซึ่งอาจเป็นอีกคำหนึ่งที่เราเห็น

อัตราการหรีวลัว (Turndown ratio), ช่วงประสิทธิภาพ (Effective Range) หรือ ช่วงอ่านค่าได้ (Rangeability) ศัพท์ทั้ง 3 นี้มีความหมายเหมือนกัน คือหมายถึง ช่วงอัตราการไหลของเหลวที่ยังคงทำให้การทำงานของมาตรวัดไม่ได้เบี่ยงเบนไปจากขอบเขตความผิดพลาดหรืออัตราเพื่อเหลือเผื่อขาดที่กำหนดไว้ ในรูปที่ 1-5 คือเส้น A และเส้น B ดังนั้น

“Effective Range” คือช่วงระหว่าง Q_1 และ Q_2

“Rangeability” จะอยู่ในรูปโดยทั่วไป Q_2/Q_1 นิยมเรียกเป็น เช่น 10 : 1 ในส่วนมาตรวัดปริมาณของเหลวก็อาจเรียกเป็น “Turndown Ratio” ยิ่งมีค่ามากยิ่งขึ้นแสดงว่ามาตรวัดมีสมรรถนะในการทำงานในช่วงกว้างมาก

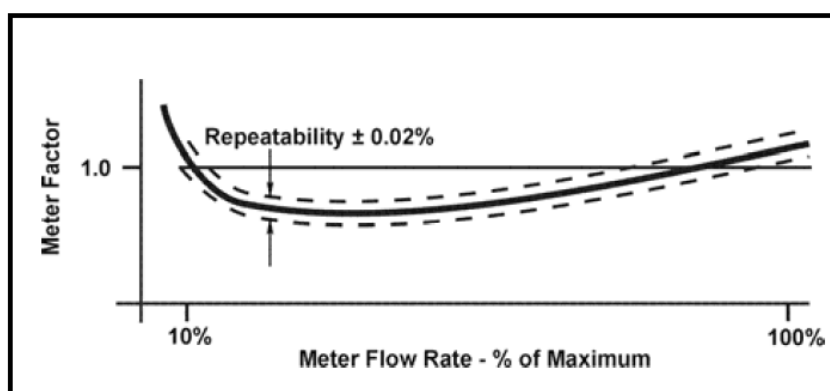
ค่าขีดชั้นหมายมาตรา (Resolution; d) ถูกใช้ในการบรรยายถึงผลการแสดงค่าที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ค่าน้อยที่สุดของเครื่องชั่งตวงวัดนั้นๆ โดยยังคงสามารถอ่านค่าได้ ค่าขีดชั้นหมายมาตราเพียงบอกเราว่าอ่านได้

ละเอียดระดับที่ทศนิยมแต่ไม่ได้บอกถึงค่าความถูกต้องหรือค่าที่น่าเชื่อถือแต่อย่างใด ในกรณีของการแสดงค่าแบบดิจิตอลก็คือช่วงเล็กที่สุดระหว่างค่าตัวเลขสองค่าติดกัน (two - adjacent distinguishable values) ดังนั้นในบางครั้งคำนี้จะนำไปสับสนกับคำว่า Accuracy

Accuracy คือ ชีตความสามารถของเครื่องมือหรือระบบ (system) ที่จะแสดงให้ค่าจริง (true value) ของตัวแปรที่ต้องการวัดค่า (measured variable) ภายใต้สภาวะอ้างอิง ซึ่งความหมายของ accuracy จะมีความแตกต่างกับความหมายของ Repeatability ซึ่งจะกล่าวต่อไป

Precision คือ ชีตความสามารถที่แน่นอนถูกต้องของเครื่องมือวัดที่ได้รับการออกแบบ หรือต้องการให้มีประสิทธิภาพ

ความสามารถในการทำซ้ำได้ (Repeatability) คือ การเบี่ยงเบนของผลการวัดที่มากที่สุด (The Maximum Output Deviation) จากค่าเฉลี่ยของการวัดซึ่งทำการวัดติดต่อกันเมื่อค่าที่ป้อนเข้าระบบ (input value) เหมือนกันและมาจากแหล่งเดียวกันติดต่อกัน



รูปที่ 1-6 ความสามารถในการทำซ้ำได้ (Repeatability) ของมาตรวัดที่แต่ละอัตราการไหล

ในเทอมของมาตรวัด นั้นหมายถึงความสามารถของมาตรวัดในการหาค่า Meter Factor ที่อัตราการไหลเดียวกัน ภายใต้สภาวะเงื่อนไขการสอบเทียบเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีนิยามจาก OILM ซึ่งไม่ขอฟุดในที่นี้



รูปที่ 1-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Repeatability กับ Accuracy

ค่าความคลาดเคลื่อน (Error) คือ ค่าผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้เทียบกับค่าจริง (True value) หรือค่าแบบมาตรา

$$\text{Error} = \text{ค่าที่อ่านได้จากเครื่องชั่งตวงวัด} - \text{ค่าที่อ่านได้จากแบบมาตรา} \quad (\text{Eq.1-9})$$

มักจะสับสนกันระหว่าง Error กับ Uncertainty

ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) คือ ค่าขอบเขตของความไม่แน่ใจที่มา กับผลการวัด ซึ่งในงานซึ่งตรวจวัดในเชิงกฎหมายเราจะมีอีกคำหนึ่งคือ อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาด (Maximum Permissible Error) ซึ่งประกอบด้วย Error บวกกับค่าความไม่แน่นอน

$$\text{MPE} = \text{Error} \pm \text{Uncertainty} \quad (\text{Eq.1-10})$$

ค่าแก้ไข (Correction) จะมีความหมายสลับกับค่าความคลาดเคลื่อน (error) คือ

$$\text{Correction} = \text{ค่าที่อ่านได้จากแบบมาตรา} - \text{ค่าที่อ่านได้จากเครื่องซึ่งตรวจวัด} \quad (\text{Eq.1-11})$$

ค่าความคลาดเคลื่อนสุ่ม (Random error) คือ ค่าสูงสุดของการกระจายค่าของค่าที่วัดได้ (maximum magnitude of the dispersion of measured value) รอบค่าเฉลี่ย (mean) ค่า Random error นี้จะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของขนาด repeatability (magnitude of repeatability)

ค่าความคลาดเคลื่อนระบบ (Systematic error or bias) คือ การเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอด้วยค่าคงที่ (a constant uniform deviation) ของจุดการทำงาน (operating point) ของเครื่องวัด

ค่าความคลาดเคลื่อนรวม (Total error or inaccuracy) คือ ข้อจำกัดค่าผิดพลาดสูงสุด (the maximum error limit) ของเครื่องมือวัดหรือระบบ ค่า Total error มีค่าเท่ากับค่าเบี่ยงเบนสูงสุด (the maximum deviation value) บวกด้วย systematic error

ความไม่แน่นอนในการวัด (Measurement Uncertainty) เมื่อเราทำการวัดปริมาณค่าใดๆ ผลการวัดจะไม่ใช่ค่าจริง (True value) ของปริมาณนั้น แต่เป็นเพียงการประมาณค่าเท่านั้น เหตุเพราะว่าเครื่องมือซึ่งตรวจวัดที่ใช้ไม่มีความสมบูรณ์ ดังนั้นจึงมีแต่ค่าขอบเขตของการสงสัยในผลการวัดรอบๆ ค่าที่วัดได้นั้นๆ ค่าความไม่แน่นอนในการวัดจึงเป็นขนาดของขอบเขตแห่งความสงสัยซึ่งมีผลตามมาในการประเมินคุณภาพของการวัดเพื่อให้การแสดงผลการวัดให้สมบูรณ์จึงต้องมีองค์ประกอบ

- 1) ค่าของผลที่วัดได้ ซึ่งก็คือค่าที่แสดงของส่วนแสดงผลการวัดของเครื่องซึ่งตรวจวัด
- 2) ค่าความไม่แน่นอนในการวัดเป็นขอบเขตหรือช่วงรอบๆ ค่าของผลที่วัดได้ โดยมีค่าของผลที่วัดได้ปรากฏอยู่ภายในขอบเขตดังกล่าว
- 3) ระดับความมั่นใจที่ติดมากับค่าความไม่แน่นอนในการวัด ซึ่งหากทำการวัดด้วยวิธีการเดียวกันแล้วค่าจริง (True value) ของปริมาณนั้นจะอยู่ภายในขอบเขตหรือช่วงความไม่แน่นอนตามที่ระบุ เช่น การระบุด้วยระดับความมั่นใจ (confidence level) 95%

ค่าจริง (True value) คือ ค่าที่ไม่มีความผิดพลาด (the errorless value) ของตัวแปรที่ต้องการวัดค่า (measured variable) แต่ต้องทำความเข้าใจก่อนว่าเครื่องมือทุกชนิดถูกสร้างขึ้นมาโดยทำการสอบเทียบหรืออ้างอิงกับแบบมาตราหรือมาตรฐาน ดังนั้นการวัดใดๆ ก็จะมีค่าผิดพลาดอยู่ในตัวของเครื่องวัดตั้งแต่เริ่มต้นอยู่แล้ว

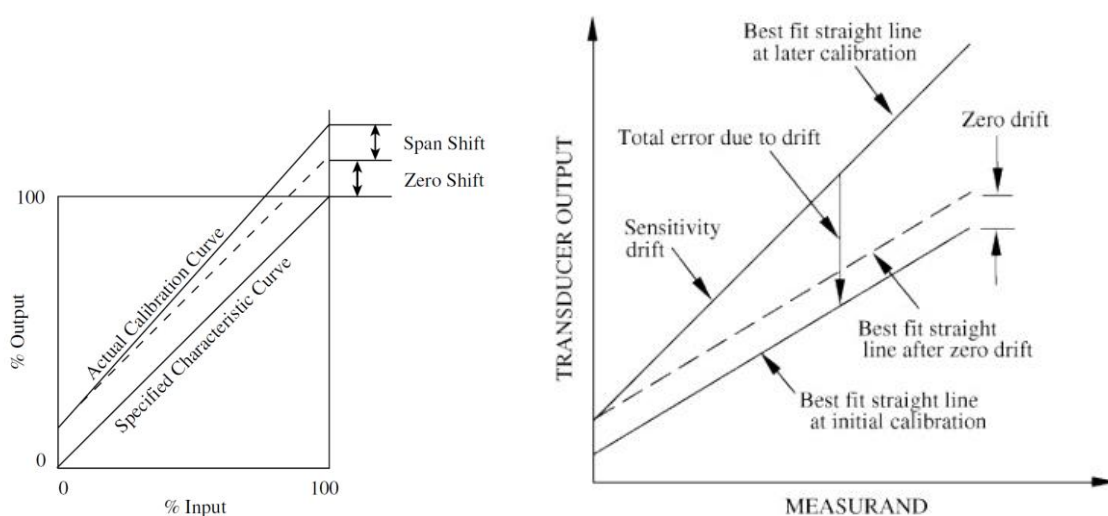
Deadband คือ ค่าต่ำสุด (minimum input) ที่ป้อนเข้าเครื่องมือวัดหรือระบบที่ต้องการเพื่อไปเปลี่ยนแปลงผลของการวัดที่ได้มา (output)

Backlash คือ ค่า dead band เชิงกลร่วมกับการสีกหรือ หรือ ค่าเผื่อเหลือเผื่อขาด (tolerance) ในการผลิตอุปกรณ์ เช่น เกียร์ขับ เป็นต้น

Drift คือ การเปลี่ยนแปลงขีดขึ้นหมายมาตราเทียบกับเวลาตั้งแต่ค่าเริ่มต้น (beginning value) เมื่อตัวแปรที่ต้องการวัดค่า (measured variable) ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลง (รูปที่ 1-8) โดยทั่วไปคำว่า “drift” หรือ “shift” ปกติจะใช้กับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลังจากผ่านช่วงระยะเวลาอุ่นเครื่อง (warm-up period) ที่กำหนดไว้จากบริษัทผู้ผลิต สำหรับการ drift ของการสอบเทียบเมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่ง (long-term calibration) ปกติจะเกิดขึ้นเนื่องจากจากการสึกหรอและการเสื่อมของเครื่องมือวัดเมื่อผ่านการใช้งานไประยะหนึ่ง โดยค่า Drift ของแบบมาตราจะถูกนำไปใช้ในการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบอีกด้วย

“Zero Drift” จะมีค่าความแตกต่างหรือที่เปลี่ยนแปลงไปคงที่ตลอดช่วง

“Span Drift” หรือ “Sensitivity Drift” ค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมไม่คงที่ตลอดช่วง



รูปที่ 1-8 Drift หรือ Shift

การสอบเทียบ (Calibration) คือ ขั้นตอนหรือวิธีการเพื่อหาปริมาณของเครื่องวัด หรือมาตรวัดโดยเทียบกับแบบมาตรา

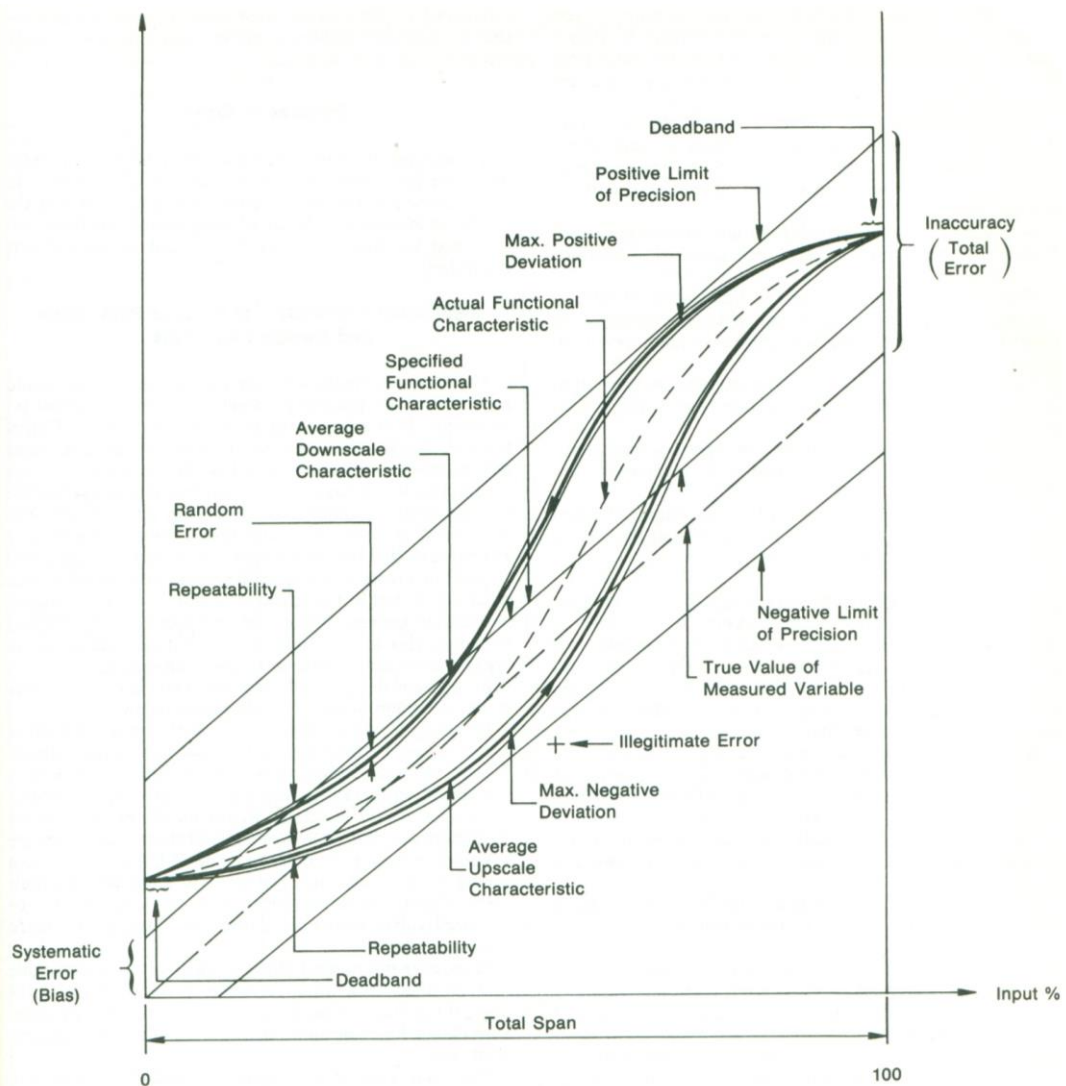
Meter Proof คือ วิธีการที่ต้องการหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) เช่นในการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวเทียบกับแบบมาตราท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (compact prover หรือ small volume prover) หรือท่อทดสอบความจุ (conventional pipe prover) Meter Proof ก็คือการเคลื่อนที่หลายๆรอบของตัวกวาด (displacer) ใน ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กหรือท่อทดสอบความจุพร้อมกับประมวลผล

Proving คือ วิธีการกระทำใดๆ เพื่อหาค่า มิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) ในมาตรวัด, หาค่าปริมาตรพิกัดกำลังถึงตัวแบบมาตราที่สภาวะมาตรฐานหรือสภาวะอ้างอิง

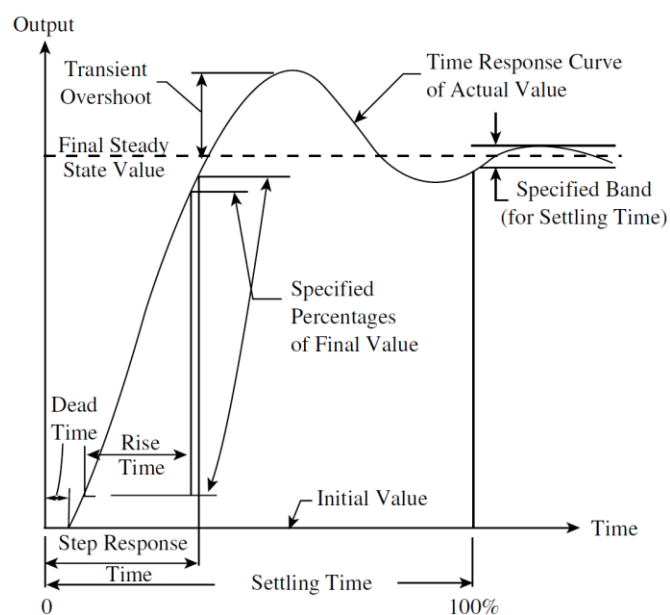
Base Volume คือ ปริมาตรของแบบมาตราที่สภาวะอ้างอิง นิยมใช้กับท่อทดสอบความจุขนาดเล็กหรือท่อทดสอบความจุ

Prover Calibration คือ กระบวนการในการหาค่า Base Volume

ความรู้สึก (Sensitivity) คือ อัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงผลที่ให้ออก (output) โดยเครื่องมือวัดเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงค่าที่ป้อนเข้าไปตามที่กำหนด โดยค่าที่ให้ออก (output) ต้องเริ่มที่เข้าสู่สภาวะเสถียรภาพในการแสดงผล



รูปที่ 1-9 กราฟแสดงพฤติกรรมเครื่องชั่งตวงวัดโดยทั่วไป



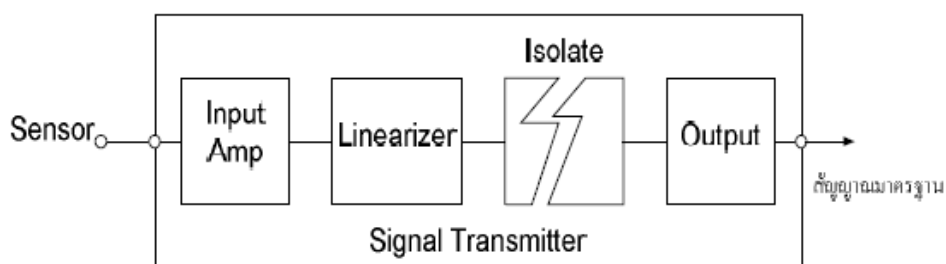
รูปที่ 1-10 การตอบสนองต่อเวลาของระบบการวัดเมื่อมีสัญญาณทางเข้า (input signal) เพิ่มขึ้นเป็น Step

ช่วงเวลาการตอบสนอง (Response time) คือ ช่วงเวลาที่ต้องการของเครื่องมือวัดเพื่อจะให้ผลการวัด (output) มีค่าคงที่สม่ำเสมอ (steady state) หลังจากป้อนค่าที่กำหนดแน่นอน (a specified input) ไปแล้ว (รูปที่ 1-10)

ทรานสมิตเตอร์ (Transmitter) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณทางไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ (transducer) ให้เป็นสัญญาณมาตรฐาน เช่น Load Transmitter (ไม่ใช่ Load cell นะแต่เชื่อมสัญญาณด้านทางออก Load cell โดย Load cell ทำหน้าที่เป็น Sensor คือแปลงแรงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า) , RTD Transmitter เป็นต้น แบ่งทรานสมิตเตอร์ ออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ สัญญาณนิวแมติกส์และสัญญาณทางไฟฟ้า

1. **สัญญาณนิวแมติกส์ (pneumatics signal)** เป็นสัญญาณมาตรฐานที่อยู่ในรูปของความดันลม ใช้ความดันของลมในการควบคุมกระบวนการ ตัวอย่างสัญญาณมาตรฐานชนิดนิวแมติกส์ ได้แก่ 3-15 psi (BS) 0.2-1 bar (SI) และ $0.2-1 \text{ kg/cm}^2$ (Metric)

2. **สัญญาณทางไฟฟ้า (electrical signal)** เป็นสัญญาณมาตรฐานที่อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า 1-5 V กระแสไฟฟ้า 4-20 mA และแรงดันไฟฟ้า 0-10 V กระแสไฟฟ้า 0-100 mA



รูปที่ 1-11 ตัวอย่างขั้นตอนทำงานแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ (transducer) ให้เป็นสัญญาณมาตรฐาน

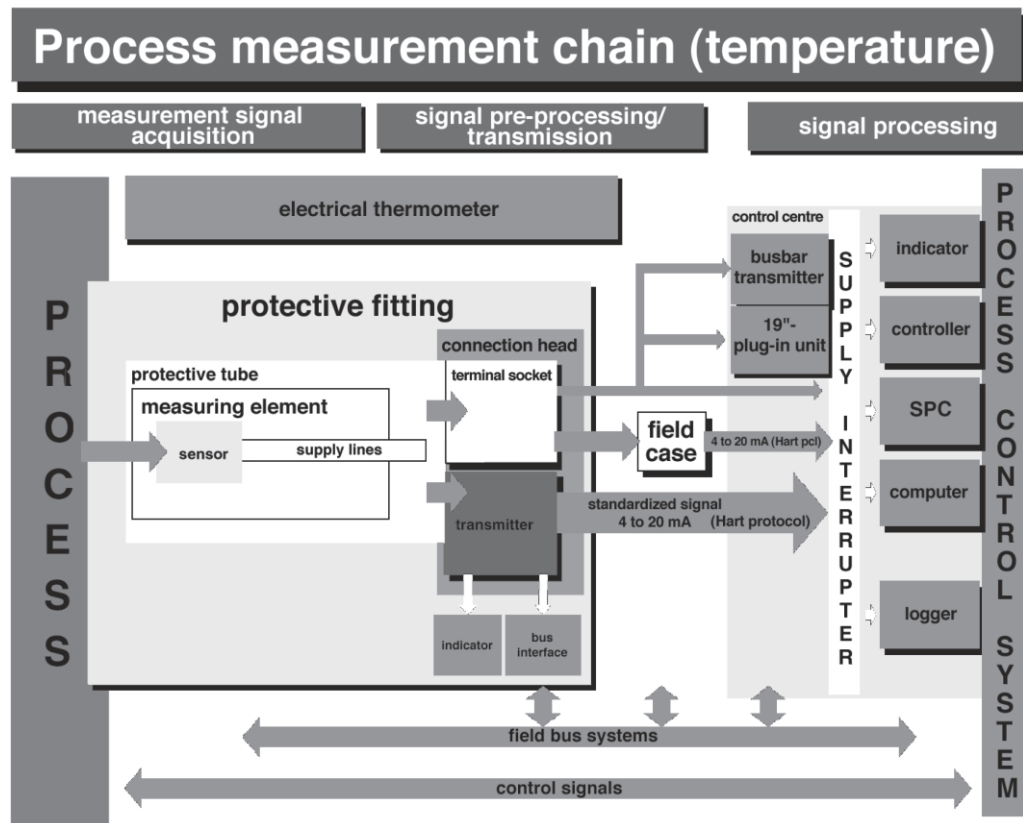
มาตรฐานสัญญาณวัดแบบ Analog สัญญาณมาตรฐานมี 2 ชนิดคือ

1. **สัญญาณกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน** เป็นการส่งสัญญาณในรูปของกระแสตรง (DC. Current) มาตรฐานที่นิยมใช้คือ 4-20 mA หมายความว่า เมื่อค่าวัดเป็น 0% เท่ากับกระแส 4 mA และค่าวัดเป็น 100 % เท่ากับกระแส 20 mA และค่าวัดซึ่งอยู่ในช่วง 0-100 % จะสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับกระแส 4-20 mA

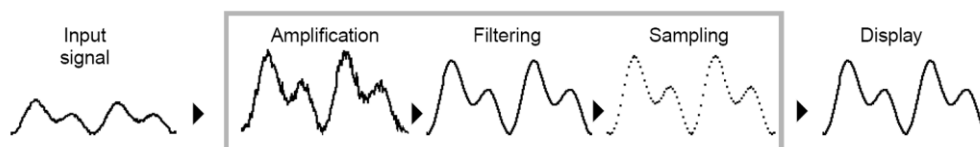
ข้อดีของการส่งสัญญาณเป็นกระแส คือ สามารถส่งสัญญาณไปได้ระยะไกลๆ ความต้านทานของสายส่งสัญญาณ จะไม่ทำให้ค่าวัดผิดพลาด และการถูกสัญญาณรบกวนจะน้อยกว่าการส่งเป็นแรงดันไฟฟ้า นอกจากมาตรฐาน 4-20 mA แล้วยังมีมาตรฐานแบบอื่นอีกแต่คนนิยมใช้น้อย เช่น 0-20 mA, 10-50, mA, 0-1 mA

2. **สัญญาณแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน** เป็นการส่งสัญญาณในรูปของแรงดันไฟฟ้า (DC Voltage) มาตรฐานที่นิยมใช้คือ 1-5 Vdc หมายความว่า เมื่อค่าวัดเป็น 0% เท่ากับ แรงดัน 1 V และค่าวัด เป็น 100 % เท่ากับแรงดัน 5 V การใช้สัญญาณมาตรฐานแบบแรงดันนี้ไม่เหมาะกับการที่ต้องส่งสัญญาณระยะไกลเนื่องจากความต้านทานของสายสัญญาณจะทำให้ค่าวัดผิดไป และถูกสัญญาณรบกวนได้ง่าย สัญญาณแบบแรงดันนี้เหมาะกับการส่งสัญญาณระยะใกล้ และมีการต่อเข้ากับอุปกรณ์รับสัญญาณหลายแบบ เนื่องจากสะดวกในการติดตั้ง นอกจากสัญญาณมาตรฐาน 1-5 V แล้วยังมีมาตรฐานอื่นแต่นิยมใช้น้อย คือ 0-10 V, 0-5 V, 0-10 mV

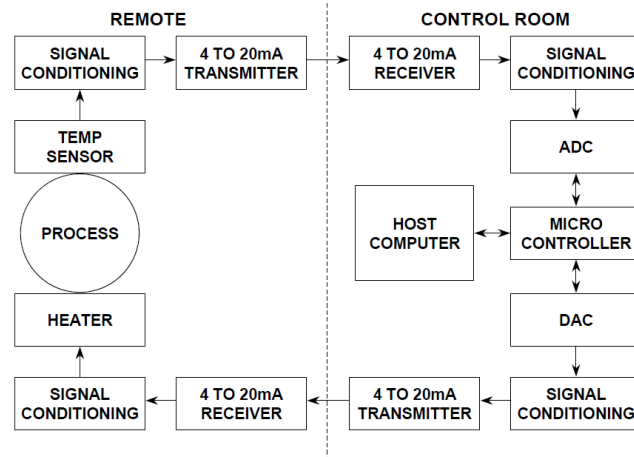
การปรับสัญญาณ (Signal Conditioning) เป็นเทอมที่ใช้สำหรับการจัดการสัญญาณไฟฟ้า (electrical signals) ของตัวตรวจจับ (primary sensor) ของเครื่องชั่งตวงวัดให้พร้อมสำหรับระบบรวบรวมวิเคราะห์ข้อมูลจริง (the data acquisition system) โดยตัวถ่ายทอดสัญญาณ (Instrument transmitters) จะทำการปรับปรุงสัญญาณ (Signal Conditioning) ด้วยการแปลงสัญญาณด้านทางออกของตัวตรวจจับสัญญาณให้อยู่ในรูปกระแสไฟฟ้า 4 ถึง 20 mA โดยทั่วไปลักษณะของปรับปรุงสัญญาณรวมถึง การขยายสัญญาณ (amplification), isolation, linearization และกรองสัญญาณ (filtering) ก่อนส่งไปยังส่วนประมวลผลและส่วนแสดงค่าต่อไป (อันนี้ ไม่แน่ใจว่าจะถ่ายทอดถูกหรือเปล่านะ)



รูปที่ 1-12 ตัวอย่างขบวนการวัดอุณหภูมิ 3 กระบวนการหลักคือ measurement signal acquisition, signal pre-processing/transmission และ signal processing เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการนำข้อมูลผลการวัดไปใช้งาน



รูปที่ 1-13 Signal Conditioning (ภายในกรอบ) เป็นการปรับปรุงสัญญาณให้พร้อมใช้งาน



รูปที่ 1-14 ตัวอย่าง Signal Conditioning ในระบบควบคุมอุณหภูมิ

สเกลอุณหภูมิระหว่างประเทศ ITS-90 (International Temperature Scale 1990, ITS-90) : เป็นสเกลอุณหภูมิมาตรฐานซึ่งถูกกำหนดขึ้นโดยคณะกรรมการที่ปรึกษาว่าด้วยการวัดอุณหภูมิ (Consultative Committee for Thermometry) ในปี ค.ศ. 1990 โดยเป็นการประมาณค่าสเกลอุณหภูมิอุณหพลวัต (Thermodynamic temperature) เพื่อความสะดวกและส่งผลให้การวัดอุณหภูมิในระดับนานาชาติมีค่าเป็นหนึ่งเดียวกัน

บทที่ 2

การหาค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Dynamic Temperature Determination)

เราพบว่าในการคำนวณผลการสอบเทียบทางด้านปริมาตร ปัจจัยที่มีผลต่อการสอบเทียบให้มีความแม่นยำถูกต้อง, ได้ค่า Repeatability น้อย มี 2 ปัจจัยหลักที่ต้องได้รับความใส่ใจอย่างสูงนั่นก็คือ “อุณหภูมิ” และ “ความดัน” นอกจากนี้ยังพบอีกว่าหากของเหลวตัวกลางที่ใช้ในการสอบเทียบเป็นน้ำสะอาด (ไม่ใช่ น้ำโคลงนะครับ) อุณหภูมิของน้ำจะเป็นตัวที่มีบทบาทเด่นและจะยิ่งเด่นสูงมากขึ้นหากของเหลวตัวกลางที่ใช้สอบเทียบเป็นของเหลวผลิติก๊าซปิโตรเลียม

ปัญหาในทางปฏิบัติสำหรับการหาค่าอุณหภูมิที่ถูกต้องเหมาะสมที่สุดในสภาวะแวดล้อม, ระยะเวลาการทำงาน, สภาวะของระบบที่ติดตั้งเครื่องชั่งตวงวัดซึ่งต้องการสอบเทียบและปัจจัยอื่น ๆ พบว่าส่วนใหญ่เกิดขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของเวลาที่ปฏิบัติงาน ดังนั้นการหาค่าอุณหภูมิที่ถูกต้องแม่นยำจึงมีความสำคัญและจำเป็นต่อการคำนวณหาปริมาณของเหลวผลิติก๊าซปิโตรเลียม (ของเหลวไฮโดรคาร์บอน) เช่น น้ำมันดิบ, น้ำมันดีเซล, น้ำมันเบนซิน, น้ำมันซูปเปอร์, แก๊สโซฮอล์ 95, แก๊สโซฮอล์ 91 เป็นต้น ในบทนี้เราจะพูดถึงวิธีการ, เครื่องมือ และขั้นตอนการทำงานเพื่อวัดค่าอุณหภูมิของของเหลวไฮโดรคาร์บอนภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามเวลาที่เปลี่ยนไป หรืออีกนัยหนึ่งคือทำการวัดของเหลวซึ่งไหลอยู่ภายในระบบสอบเทียบ

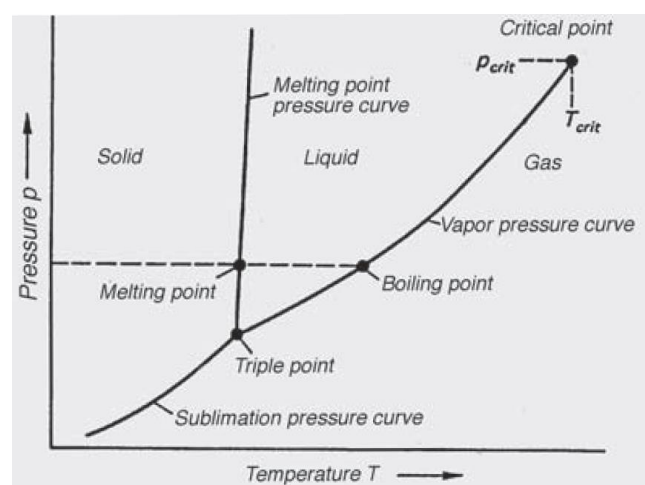
พัฒนาการการกำหนดสเกลอุณหภูมิ

เรามาย้อนประวัติศาสตร์กันเล็กน้อยเพื่อทำความรู้จักเกี่ยวกับสเกลอุณหภูมิที่เราใช้อยู่ในปัจจุบัน ในปี ค.ศ. 1875 ได้มีการก่อตั้งอนุสัญญาาระบบเมตริก (Treaty of the Meter) หรือ International Meter Convention เมื่อความต้องการวัดอุณหภูมิเพื่อใช้ในงานรักษาพยาบาล งานทางวิทยาศาสตร์ ทางด้านอุตสาหกรรมหรือด้านต่างๆ มีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องวัดอุณหภูมิด้วยหลักการทำงานที่แตกต่างมากมาย ดังนั้นในปี 1927 หน่วยงานภายใต้อนุสัญญาาระบบเมตริกที่มีชื่อว่า International Committee of Weights & Measures (CIPM) ภายใต้การกำกับดูแล General Conference on Weights and Measures (CGPM) ได้กำหนดมาตราวัดอุณหภูมิ (Temperature Scale) ชื่อว่า “ITS-27” เป็นสเกลอุณหภูมิมาตรฐานสากล (international Temperature Scale) เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานจริงในชีวิตประจำวันและภาคอุตสาหกรรม ต่อจากนั้นได้ถูกแทนที่ด้วย IPTS-48 (International Practical Temperature Scale) ในปี 1948 เมื่อมีการพัฒนาช่วงการวัดอุณหภูมิให้มากขึ้นและมีความถูกต้องสูงมากขึ้น ในปี 1968 European International Committee for Weights and Measures ได้กำหนดมาตรฐานใหม่ International Practical Temperature Scale (“IPTS-68”) ประกอบด้วย 13 จุดอ้างอิง จากนั้นในปี ค.ศ. 1990 คณะกรรมการที่ปรึกษาว่าด้วยการวัดอุณหภูมิ (Consultative Committee for Thermometry) ในยุโรปได้กำหนดสเกลอุณหภูมิมาตรฐานระหว่าง

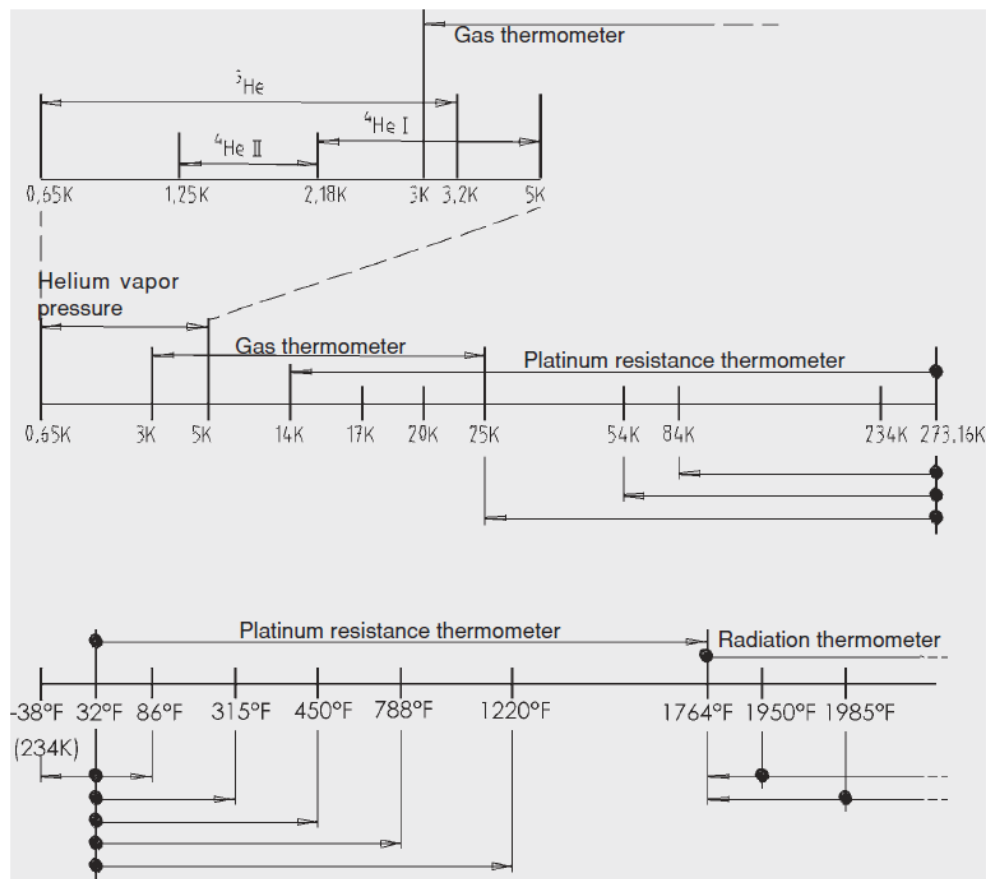
ประเทศ เรียกว่า “ITS-90” (International Temperature Scale 1990) ประกอบด้วยที่สภาวะสมดุล 17 จุดอ้างอิง ดังในตารางที่ 2-1

State of equilibrium	T_{90} in K	t_{90} in °F
Vapor pressure	3 to 5	-454.27 to -450.67
Triple point of equilibrium hydrogen *)	13.8033	-434.8241
Vapor pressure of equilibrium hydrogen *)	⌋17 ⌋20.3	⌋ -429.07 ⌋ -423.13
Triple point of neon	24.5561	-415.4690
Triple point of oxygen	54.3584	-361.8249
Triple point of argon	83.8058	-308.8196
Triple point of mercury	234.3156	-37.9019
Triple point of water	273.16	32.018
Melting point of gallium	302.9146	85.5763
Solidification point of indium	429.7485	313.8773
Solidification point of tin	505.078	449.470
Solidification point of zinc	692.677	787.149
Solidification point of aluminium	933.473	1220.58
Solidification point of silver	1234.93	1763.20
Solidification point of gold	1337.33	1947.52
Solidification point of copper	1357.77	1984.32
*) Hydrogen occurs in two molecular types designated by the prefixes "ortho" and "para". The composition of the ortho-para mixture prevailing in the state of equilibrium is temperature-dependent. The term "equilibrium hydrogen" means that the hydrogen has its ortho-para equilibrium composition at the respective temperature.		

ตารางที่ 2-1 จุดอ้างอิง 17 จุดของ International Temperature Scale 1990 (ITP-90)



รูปที่ 2-1 จุดอ้างอิงของสารที่มี 3 สถานะบรรจบกัน เรียกว่า “Triple point”



รูปที่ 2-2 ช่วง Interpolation Instruments ตาม International Temperature Scale 1990; ITP-90

การเลือกเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

เอกสารด้านมาตรฐานการวัดอุณหภูมิต่างถูกเขียนขึ้นมาเพื่อการวัดอุณหภูมิด้วย 2 วัตถุประสงค์คือ

1. เพื่อวัดของเหลวภายใต้สภาวะนิ่งอยู่กับที่ (“static” conditions) ได้แก่ การวัดอุณหภูมิของเหลวซึ่งบรรจุหรือเก็บรักษาไว้ใน

- คลังสำรองผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม (Storage tanks), gathering tanks.
- พาหนะขนส่งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมทางเรือ เช่น เรือบรรทุกน้ำมัน (tankers) และ เรือพ่วง (barges)
- รถยนต์และรถไฟบรรทุกน้ำมัน (Tank cars and rail cars)

2. เพื่อวัดของเหลวภายใต้สภาวะเคลื่อนที่ (“dynamic” conditions) โดยการวัดอุณหภูมิของเหลวขณะไหลผ่านไป

- ระบบขนส่งทางท่อ (Pipes)
- ท่อทดสอบความจุ (Pipe Provers) และท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Compact Pipe Provers)

แต่ไม่ว่าเป็นการวัดอุณหภูมิแบบ Static หรือ Dynamic ต่างก็มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยและนำไปใช้เป็นค่าอุณหภูมิตัวแทนของเหลวจำนวนปริมาณมาก (Bulk volume) ที่ทำการวัดหรือทำการสอบเทียบ เช่น ในถังตวงแบบมาตรา หรือในระบบท่อภายในช่วงเวลาทำการส่งจ่ายของเหลวนั่นเอง

เพื่อให้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องจำเป็นในการพิจารณาเลือกเครื่องมือวัดอุณหภูมิเพื่อทำการวัดอุณหภูมิในระบบการวัดปริมาณนั้นๆ โดยคำนึงถึง

1. ระดับความแม่นยำที่ต้องการวัดอุณหภูมิ
2. ข้อจำกัดของกลไกหรือระบบอิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ซึ่งขึ้นอยู่กับเครื่องมือวัดแต่ละชนิด เช่น การติดตั้งเครื่องมือวัดเข้ากับระบบ, ความละเอียดในการอ่านค่าอุณหภูมิซึ่งกลไกภายในเครื่องมือวัดบางชนิดไม่สามารถปรับให้สามารถอ่านค่าได้ละเอียดไปกว่าระดับหนึ่งได้
3. ข้อจำกัดในการใช้งาน (operation limits) ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิใช้งาน
4. สภาพแวดล้อม (ambient condition) ครอบคลุมถึงปัจจัยต่างๆ ของสิ่งแวดล้อมขณะทำงานที่มีผลต่อการวัดค่าอุณหภูมิ
5. ข้อกำหนดความต้องการเฉพาะพิเศษต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบการวัด หรืออุปกรณ์ที่ต้องทำงานร่วมกันต่อเนื่องจากเครื่องมือวัดอุณหภูมิ
6. ค่าความสามารถในการอ่านได้ละเอียดสุด (resolution หรือ discrimination) ของเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่เหมาะสมกับลักษณะของการวัดอุณหภูมิ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2-2 เป็นเพียงแนวทางในการเลือกใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิว่าควรมีค่าความสามารถอ่านได้ละเอียดสุด (discrimination) เท่าไรสำหรับการวัดอุณหภูมิในการวัดปริมาณการส่งจ่ายผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

Discrimination คือ ความสามารถของเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ตรวจจับและบันทึกอุณหภูมิแท้จริงของของเหลว ด้วยค่าที่เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิซึ่งกำหนดไว้หรือความละเอียดของขีดขึ้นหมายมาตราที่เล็กละเอียดที่สุด (specified temperature increments) ซึ่งในบางครั้งอาจพูดในเทอมของ resolution ก็ได้

แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถเลือกเครื่องมือวัดอุณหภูมิให้มีค่าความสามารถในการอ่านได้ละเอียดสุดมากกว่าในตารางที่ 2-2 ก็ได้เพียงแต่ในการเลือกใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิจะต้องคำนึงถึง การติดตั้ง, การใช้งาน, การบำรุงรักษา, ราคาเครื่องมือวัดอุณหภูมิและการสอบเทียบ เพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องมือวัดอุณหภูมิดังกล่าวมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับที่ตั้งใจเลือกไว้และเป็นที่ยอมรับการใช้งานจากทุกฝ่ายที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการวัดปริมาณการรับหรือจ่ายผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

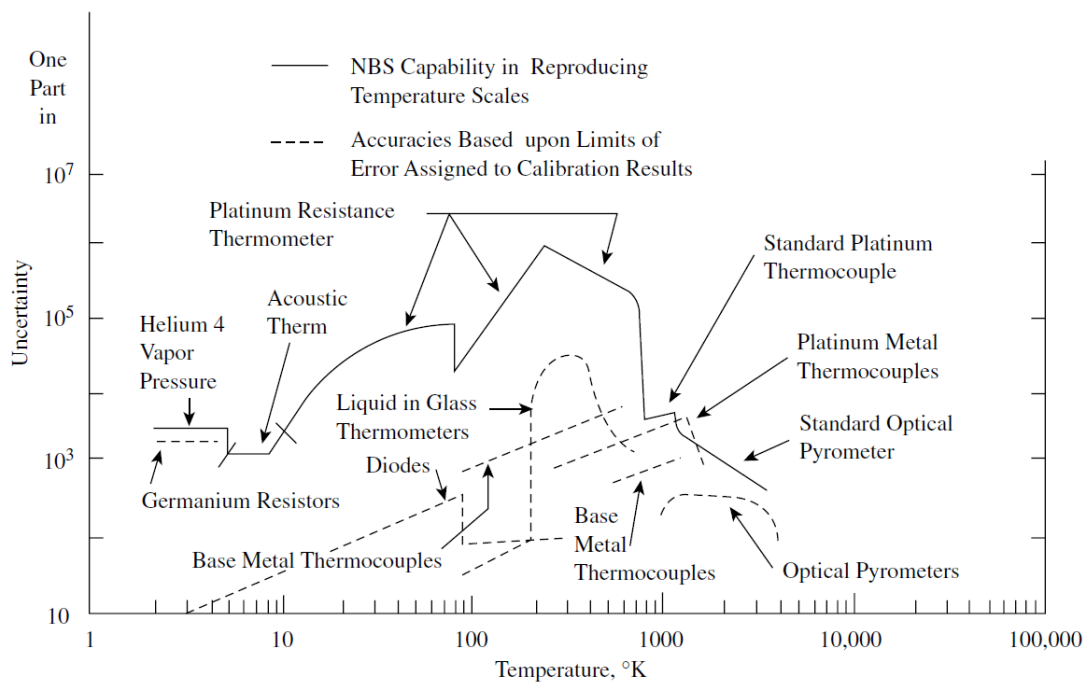
การสอบเทียบ	°F	°C
การสอบเทียบมาตรวัดแบบมาตรา (Meter prover calibration)	0.1	0.05
การสอบเทียบมาตรวัด (Meter proving)	0.5	0.25
การตรวจสอบเครื่องแสดงผลการวัด (ตั๋ว) (Measurement tickets)	1.0	0.50

ตารางที่ 2-2 ค่าความสามารถอ่านได้ละเอียดสุด (discrimination) สำหรับการวัดอุณหภูมิในการวัดปริมาณการส่งจ่ายผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

เครื่องวัดอุณหภูมิ (Temperature Devices)

ในปัจจุบันมีเครื่องวัดอุณหภูมิแตกต่างกันหลายรูปแบบมากมายในท้องตลาด ระดับความแม่นยำก็มีด้วยกันหลากหลาย ดังนั้นเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องเลือกเครื่องวัดอุณหภูมิเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานและลักษณะของงานที่ต้องการวัดอุณหภูมิ สิ่งที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ ได้แก่

- ช่วงการวัดได้ (temperature range)
- ช่องขีดขึ้นหมายมาตรา (scales F, หรือ C) หน่วยองศา ที่อ่านได้ ตามพระราชบัญญัติมาตราชั่งตวงวัด พ.ศ. 2542 กำหนดให้ใช้หน่วยเมตริก (SI Unit) นั่นคือ สเกลเซนติเกรด (°C)
- ช่วงเวลาการตอบสนอง (response time) ต่อการวัดอุณหภูมิ
- ความแม่นยำของการวัด
- ค่าขีดหมายมาตราที่ละเอียดที่สุดที่วัดได้ (discrimination หรือ resolution)
- ค่าความสามารถทำซ้ำได้ (repeatability)
- อุณหภูมิแวดล้อมของการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ
- การคำนวณ, การใช้และการส่งผลข้อมูลการวัด (data transfer)



รูปที่ 2-3 ค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับเครื่องวัดอุณหภูมิแต่ละชนิด (NBS Technical Note No. 262)

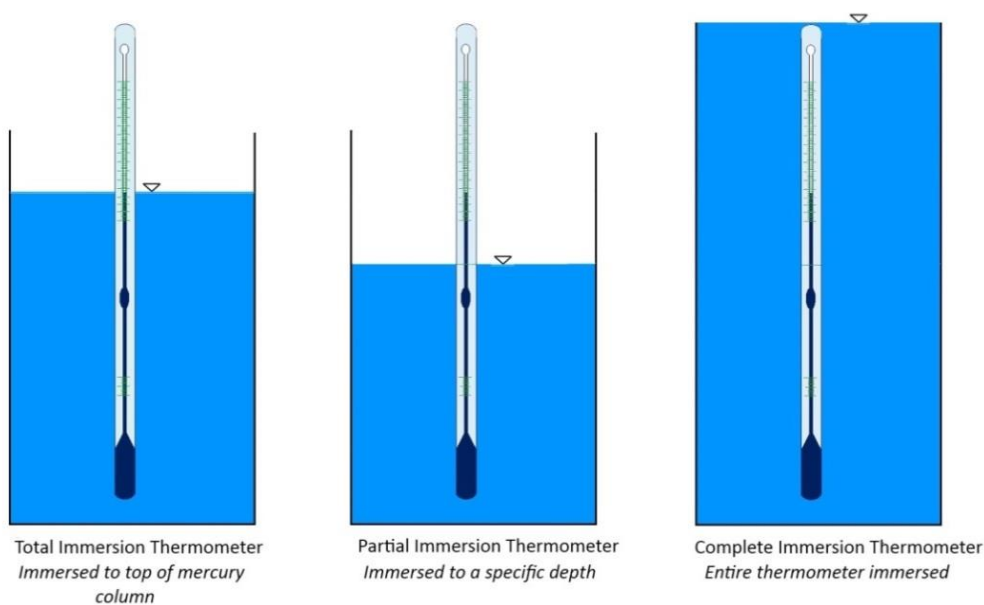
เครื่องวัดอุณหภูมิที่ควรรู้จักเพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานและการใช้งาน ตลอดจนข้อจำกัดในการใช้งานในเบื้องต้น

1. เทอร์โมมิเตอร์ชนิดกระเปาะแก้ว (Glass Test Thermometers) เทอร์โมมิเตอร์ชนิดนี้จะใช้กับช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermowell หรือ test wells) (รูปที่ 2-5) ซึ่งแบ่งเป็น

ก. เทอร์โมมิเตอร์ชนิดแช่บางส่วน (Partial Immersion Thermometer) เทอร์โมมิเตอร์ชนิดนี้ถูกออกแบบไว้เพื่อให้ใช้วัดอุณหภูมิของของเหลวในลักษณะต้องแช่เทอร์โมมิเตอร์ลงในของเหลวจนระดับผิวของของเหลวเท่ากับขีด Immersion Ring เพื่อความแม่นยำ ต้องควบคุมอุณหภูมิห้องหรือสถานที่ที่ทำการวัด

ข. เทอร์โมมิเตอร์ชนิดแช่เต็มตัว (Total Immersion Thermometer) ออกแบบไว้ให้ใช้วัดอุณหภูมิของของเหลว โดยตัวเทอร์โมมิเตอร์ต้องแช่ในของเหลวนั้นโดยให้ระดับของผิวของเหลวเท่ากับความสูงของระดับของปรอทใน Capillary ในขณะใช้งานนั้น ๆ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นที่จะต้องควบคุมอุณหภูมิห้องหรือสถานที่ที่ทำการวัด

ค. เทอร์โมมิเตอร์ชนิดแช่ทั้งหมด (Complete Immersion Thermometer) เมื่อใช้งานต้องแช่ตัวเทอร์โมมิเตอร์ให้จมหมดทั้งตัว นอกจากนี้ยังใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบนี้วัดอุณหภูมิของอากาศได้เพราะถือว่าเทอร์โมมิเตอร์นี้แช่ทั้งตัวอยู่ในอากาศ



รูปที่ 2-4 เทอร์โมมิเตอร์ชนิดแช่ทั้งหมด (Total - Immersion), ชนิดแช่บางส่วน (Partial - Immersion) และชนิดแช่เต็มตัว (Complete - Immersion)

ดังนั้นในการสอบเทียบถึงดวงแบบมาตรฐานหากใช้เครื่องวัดอุณหภูมิชนิดนี้ในช่องเสียบอุณหภูมิ (thermowell) ควรใช้เป็นเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแช่บางส่วนไม่ควรเป็นชนิดแช่เต็มตัวหรือชนิดแช่ทั้งหมด ทั้งนี้เพราะว่าเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแช่ทั้งหมดนี้จะให้ค่าการวัดที่แม่นยำก็ต่อเมื่อมีของเหลวที่ต้องการวัดอุณหภูมิอยู่รอบๆ ตัวเทอร์โมมิเตอร์เท่านั้น

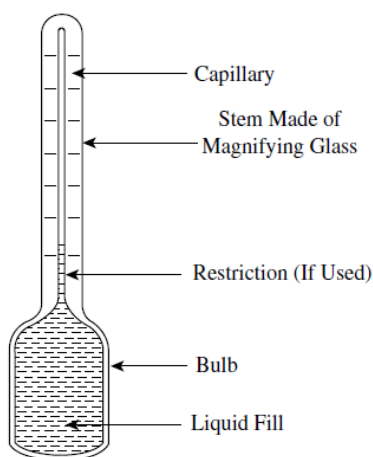
นอกจากนี้เทอร์โมมิเตอร์ชนิดแช่บางส่วนต้องได้รับการสอบเทียบให้ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิของเหลว อีกทั้งต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของ ASTM E1 หรือมาตรฐานแบบมาตรฐานแห่งชาติ โดยการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ดังกล่าวต้องกระทำโดยสอบเทียบกับแบบมาตรฐานแห่งชาติ หรือห้องปฏิบัติการได้รับรองมาตรฐาน ISO 17025 มีค่าขีดความสามารถของการสอบเทียบและการวัด (Calibration and Measurement Capability : CMC) ตามตารางที่ 2-2

TABLE 32.20 Summary of Requirements for ASTM Precision Thermometers

ASTM Thermometer Number	Range (°C)	Maximum length (mm)	Graduation at each (°C)	Maximum error (°C)
62C	-38 to +2	384	0.1	0.1
63C	-8 to +32	384	0.1	0.1
64C	-0.5 to +0.5 and 25 to 55	384	0.1	0.1
65C	-0.5 to +0.5 and 50 to 80	384	0.1	0.1
66C	-0.5 to +0.5 and 75 to 105	384	0.1	0.1
67C	-0.5 to +0.5 and 95 to 155	384	0.2	0.2
68C	-0.5 to +0.5 and 145 to 205	384	0.2	0.2
69C	-0.5 to +0.5 and 195 to 305	384	0.5	0.5
70C	-0.5 to +0.5 and 295 to 405	384	0.5	0.5

ตารางที่ 2-3 ตารางข้อกำหนด ASTM Precision Thermometers

2. Permanent Glass Thermometers เป็นเทอร์โมมิเตอร์ชนิดกระเปาะแก้วอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับการติดตั้งภายในช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ (thermowell) และป้องกันการแตกหักได้อย่างดีหรืออาจจะมีตัวเรือนคลุมอีกทีหนึ่งก็ยิ่งดี รูปที่ 2-6 การตรวจสอบความแม่นยำถูกต้องกับเทอร์โมมิเตอร์ชนิดนี้ควรได้รับการสอบเทียบและตรวจสอบโดยใช้ Glass Test Thermometer ดังกล่าวในหัวข้อข้างบน



รูปที่ 2-5 เทอร์โมมิเตอร์แบบกระเปาะ

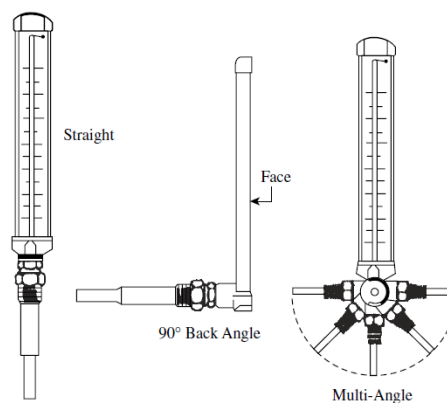


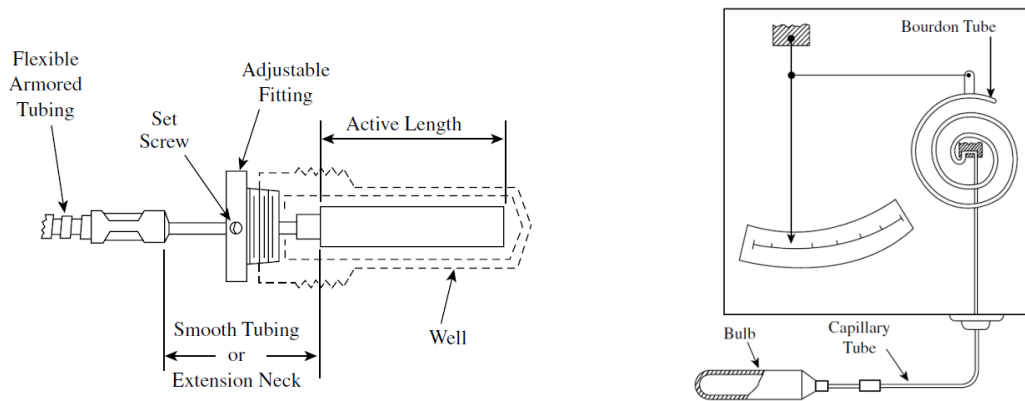
FIG. 4.6b
Industrial glass-stem thermometers. (Courtesy of ABB Automation [ex-Kent-Taylor].)

รูปที่ 2-6 Permanent Glass Thermometers

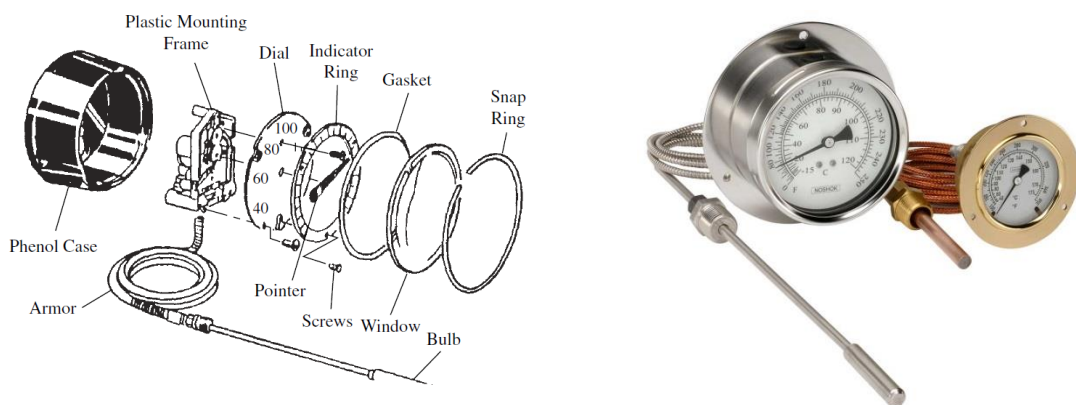
3. Filled Bulb Systems ประกอบด้วยกระเปาะตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (temperature sensor bulb) ต่อเชื่อมผ่านท่อขนาดเล็ก (capillary tubing) ไปยังตัวทรานสดิวเซอร์ (pressure sensitive transducer) เพื่อแปลงความดันเนื่องจากการขยายตัวของของไหลภายในในกระเปาะให้เป็นข้อมูลหรือพลังงานไฟฟ้าก่อนส่งไปยังส่วนแสดงค่า (readout unit) โดยใช้ความสัมพันธ์ความดันภายในกระเปาะที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการขยายตัวของของไหลตัวกลางที่บรรจุภายในกระเปาะเทียบกับอุณหภูมิที่ต้องการวัด ในส่วนประเภทของไหลที่เป็นของเหลวบรรจุภายในกระเปาะจะเป็นของเหลวประเภทไฮโดรคาร์บอน เช่น xylene (C_8H_{10}) เป็นต้น แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันภายในกระเปาะไม่เพียงแต่ได้รับผลโดยตรงจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ต้องการวัด กระทำต่อกระเปาะเท่านั้น หากยังมีปัจจัยภายนอกที่มีผลกระทบ เช่น การเปลี่ยนแปลงสถานะอุณหภูมิแวดล้อม, การเปลี่ยนแปลงความกดดันของบรรยากาศเนื่องจากระดับความสูงของพื้นที่ใช้งาน หรือแม้แต่ความแตกต่างของระยะความสูงระหว่างกระเปาะกับส่วนแสดงค่า เป็นต้น

ระบบการวัดอุณหภูมิแบบ Filled Bulb Systems พอแบ่งออกด้วยกัน 4 ระบบ คือ

- Class I : Liquid-Filled Systems
- Class II : Vapor Systems
- Class III : Gas-Filled Systems
- Class V : Mercury-Filled Systems



รูปที่ 2-7 เทอร์โมมิเตอร์ชนิด Filled Bulb และการติดตั้งเข้าช่องเสียบอุณหภูมิโดยทั่วไป



รูปที่ 2-8 เทอร์โมมิเตอร์ชนิด Filled Bulb Systems (Ashcroft-Heise, a Division of Dresser Industries)

การเลือกระบบการทำงานของเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดนี้จึงขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ราคาติดตั้ง, คุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนของเหลวที่ต้องการวัดต่อกระเปาะ, ลักษณะการบำรุงรักษา, และช่วงอุณหภูมิใช้งานตลอดจนขั้นตอนในการติดตั้งซึ่งต้องให้ความระมัดระวังเป็นพิเศษอีกด้วย ดังข้อมูลตามตารางที่ 2-2 และตัวอย่างของเทอร์โมมิเตอร์แบบ Filled Bulb System จะอยู่ในรูปที่ 2-7, รูปที่ 2-8, รูปที่ 2-9 และ รูปที่ 2-10

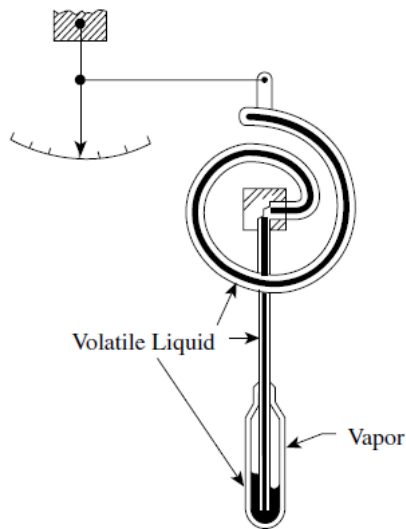
เทอร์โมมิเตอร์ชนิด Filled Bulb Systems จะมีคุณสมบัติการใช้งานดีกว่าเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Bimetallic แต่โดยทั่วไปจะด้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์ชนิดอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไป ข้อดีคือราคาไม่แพงและไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำงานเสริมมากนัก แต่เป็นเทอร์โมมิเตอร์ที่มีการตอบสนองต่อการวัดค่าอุณหภูมิค่อนข้างช้าโดยใช้เวลามากกว่า 20 วินาที, ต้องใช้พื้นที่สำหรับการติดตั้งมาก, ข้อจำกัดการติดตั้งกระเปาะตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (temperature sensor bulb) มีระยะห่างจากส่วนแสดงค่าโดยทั่วไปมีระยะน้อยกว่า 60 เมตร, ไม่เหมาะกับการวัดที่อุณหภูมิสูง และการบำรุงรักษาค่อนข้างยุ่งยาก

TABLE 4.6C

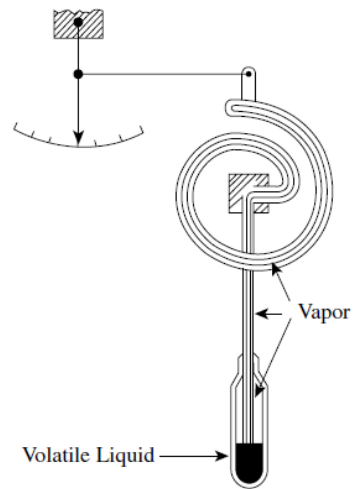
Thermal Systems Compared

SAMA Classification	Type Compensation	Fill	Measured Temperature °F (°C)		Span °F (°C)		Scale Linearity	Speed of Response (No Well)	Elevation Head Effect	Overrange Capabilities	Superior Features	Less Desirable Features
			Max.	Min.	Max.	Min.						
I	None Full Case	Liquid	600 (315)	-125 (-87)	300 (167)	30 (17)	Linear Except at Low Temps.	6-7 sec	Significant; Must Be Compensated	About 100%	Smaller Bulb Sizes; Narrow Spans; Lower Cost	Shortest Capillary; Compensation More Difficult and Required
IA												
IB												
IIA	Not Required	Vapor	Only Above Ambient to 600 (316)		400 (222)	60 (33)	Scale Divisions Increase with Temp. Increase	4-5 sec Except When Passing Through Ambient	Appreciable Compensation	Small or None	Low Cost; Long Capillary Lengths Available; Ambient Temperature Comp. Not Req'd; Fast Speed or Response	Problem with Cross-Ambient; Nonlinear Scale
IIB			Only Below Ambient to -40 (-40)						None			No Overage Capacity; Elevation Error Possible
IIC			Above and Below Ambient Not Through						Not Usable; Can't Compensate			
IID			Above, Through and Below Ambient						Same as IIA			
IIIA	Full Case	Gas	1400 (760)	-450 (-268)	1200 (667)	120 (67)	Linear Except Very Low Temps.	4-7 sec	None	150-300% Varies with Span	No Head Effect; Greatest Overage; Greatest Range of Temperatures; Good for Averaging	Large Bulb Size; Widest Spans Req'd; Least Power for Control
IIIB												
VA	Full	Mercury	1200 (649)	-40 (-40)	1200 (667)	50 (28)	Linear	4-5 sec	Not Significant Up to 30 ft (9.1 m)	100% or More	Most Linear Scale; Least Difficult to Compensate; Most Power for Control Elements; Small Bulb	Objection to Mercury on Accidental Breakage; Compensation Required
VB	Case											

ตารางที่ 2-4 ตารางเปรียบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิด Filled Bulb Systems



รูปที่ 2-9 Class IIA vapor fill



รูปที่ 2-10 Class IIB

4. **Electronic Temperature Devices** เครื่องวัดอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้ได้รับความนิยมใช้สำหรับการวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (dynamic temperature measurement) ชนิดหนึ่ง โดยทั่วไป เครื่องวัดอุณหภูมิชนิดนี้จะประกอบด้วยตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (temperature sensor) ซึ่งมีหลักการทำงานอย่างหนึ่งอย่างใดจาก 3 ประเภทคือ

- Thermistor
- Thermocouple
- Resistance Temperature detector (RTD)

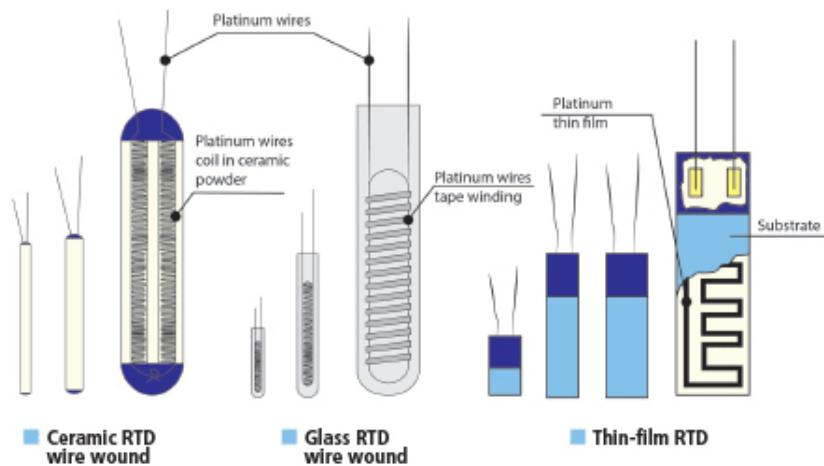
ปกติแล้วเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดนี้จะถูกจัดให้อยู่ภายในตัวเรือนในรูปหัววัด (metal probes) หรือตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (sensor element) ดังรูปที่ 2-11, รูปที่ 2-12 และรูปที่ 2-13 ตามลำดับ



รูปที่ 2-11 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิของ Thermistor



รูปที่ 2-12 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ Thermocouple
(Electronic Development Labs, Inc)



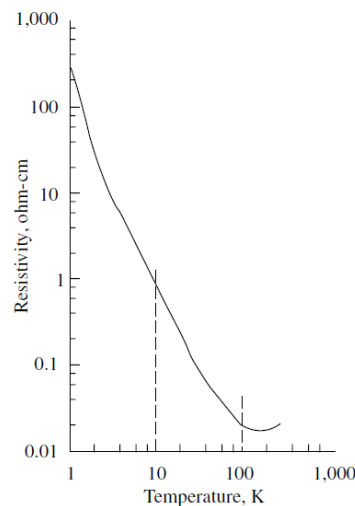
รูปที่ 2-13 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิของ Resistance Temperature detector (RTD)

สำหรับการติดตั้งจะนำตัวตรวจวัดอุณหภูมิดังกล่าวไปติดตั้งภายในช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ (thermowell) อีกทีหนึ่ง ส่วนใหญ่จะพบว่าส่วนปลายของชุดตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (probe) จะเป็นส่วนที่ไวต่ออุณหภูมิมากที่สุด ดังนั้นในการติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิดังกล่าวต้องทำการซีลให้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิอยู่ในส่วนกันของช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิอย่างมั่นคงที่สุดเท่าที่ทำได้เพื่อให้ได้ผลของการถ่ายเทความร้อนเหมาะสมตามที่ต้องการ ในบางกรณีอาจจะทำการติดตั้งชุดสปริง (Spring) หรือตัวปรับระยะความยาวของตัวตรวจวัดอุณหภูมิก็สามารถทำได้ หรือมีฉะนั้นการใส่สารตัวกลางนำความร้อน (heat-conducting media) ที่เหมาะสมระหว่างตัวตรวจวัดอุณหภูมิกับผนังช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ ในส่วนของสายไฟสัญญาณเชื่อมต่อระหว่างตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (sensor element) กับชุดอุปกรณ์ทำงานร่วมกันไม่ว่าจะเป็นประเภทสายสัญญาณหรือความยาวของสายสัญญาณก็เป็นส่วนที่มีความสำคัญมากเช่นเดียวกันเพราะว่าระดับสัญญาณของเครื่องวัดอุณหภูมิค่อนข้างต่ำมาก แต่อย่างไรก็ตามในการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิดังกล่าวนี้ควรดำเนินการติดตั้งตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตอย่างเคร่งครัดเพื่อให้ได้ผลการวัดที่มีความแม่นยำสูงสุดเท่าที่กระทำได้ นอกจากนี้เครื่องวัดแต่ละชนิดยังจำเป็นต้องมีวงจรปรับค่าความเป็นเชิงเส้น (linearization circuits) ใช้เฉพาะตัว transducers นั้น ๆ

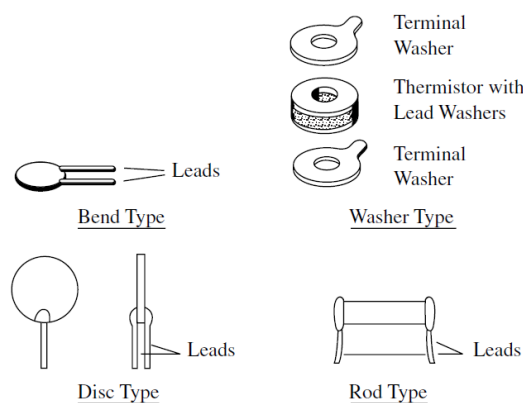
4.1. Thermistors ตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิด Thermistors จะมี 2 แบบคือ NTC (negative) thermistors เป็น semiconductor ซึ่งทำจากการผสมกันระหว่างออกไซด์นิเกิลบริสุทธิ์, แมงกานีส (manganese), cobalt, copper, tin, uranium, zinc, iron, magnesium, titanium, และโลหะอีกจำนวนหนึ่งที่อุณหภูมิสูงกว่า 1800°F (982°C). อีกชนิดหนึ่งคือ PTC (positive) thermistors เป็น semiconductor ซึ่งทำจาก silicon (silistors) หรือ barium, lead, strontium titanates และส่วนผสมเพิ่มเติม yttrium, manganese, tantalum และ silica (ชื่ออังกฤษทั้งนั้น) ตัว semiconductor นี้จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าภายใน (electrical resistance) เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิสมบูรณ์ (absolute temperature) หรือพูดง่าย ๆ ก็คือค่าความต้านทานมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าอุณหภูมิสมบูรณ์นั่นเอง ดังรูปที่ 2-14

ความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดนี้มีได้ถึง $+0.05^{\circ}\text{C}$ ($+0.1^{\circ}\text{F}$) แต่อยู่ในช่วงการวัดแคบ ๆ เท่านั้นเนื่องจากเป็นข้อจำกัดของวัสดุที่ใช้ทำไม่สามารถให้ค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความต้านทานไฟฟ้ากับอุณหภูมิสมบูรณ์ได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง ๆ NTC (negative) thermistors จะให้ผลการวัดค่าที่ไวกว่าและเสถียรมากกว่า PTC (positive) thermistors นอกจากนี้ยังพบว่าหัววัด (metal probes) หรือตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (sensor element) จะมีขนาดเล็ก และบาง แต่ตอบสนองและไวต่อการวัดอุณหภูมิสูง

มากด้วยเวลาน้อยกว่า 1 วินาที แต่เนื่องจากเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดนี้ทำจาก semiconductor จึงเปราะบางและแตกง่ายจึงต้องจัดให้มีตัวเรือนครอบไว้ในบางกรณี เครื่องวัดอุณหภูมิชนิด thermistors จะทำงานไม่เสถียรอย่างยิ่ง (เช่น มีค่า Drift สูง) ในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเนื่องจาก semiconductor มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบโครงสร้างภายใน ด้วยเหตุนี้จึงไม่ควรใช้ thermistors ที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า 300 °C

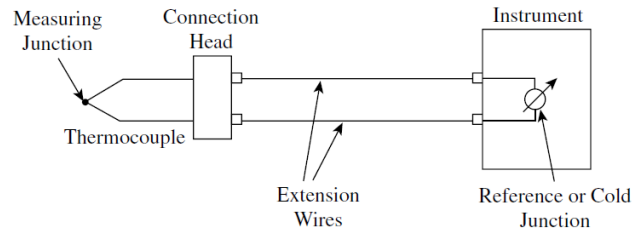
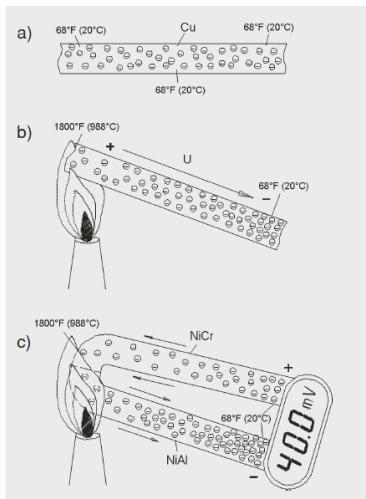


รูปที่ 2-14 ความสัมพันธ์ค่าความต้านทานค่าอุณหภูมิสมบูรณ์ของ NTC Thermistors ซึ่งมีความไวต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงแต่ความเป็นเชิงเส้นไม่ดีเท่าที่ควร



รูปที่ 2-15 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิของ Thermistor ในรูปแบบต่างๆ

4.2. Thermocouples จากการค้นพบของ Thomas Seebeck ในปี ค.ศ. 1821 ที่ว่า เมื่อนำลวดโลหะต่างชนิดกัน 2 เส้นมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันโดยให้ปลายข้างหนึ่งได้รับความร้อน อีกปลายด้านหนึ่งไม่ได้รับความร้อนซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่างปลายทั้ง 2 แล้วจะมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรนั้นโดยปริมาณของกระแสไฟฟ้างกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างของอุณหภูมิของปลายทั้ง 2 ข้าง ต่อมาในปี ค.ศ. 1834 Jean C.A. Peltier ได้ศึกษาปรากฏการณ์การไหลของกระแสไฟฟ้าดังกล่าวพบว่า ในตัวนำไฟฟ้าที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดความร้อน (อุณหภูมิ) ที่ปลายทั้ง 2 และทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าความร้อนขึ้น (รูปที่ 2-16)

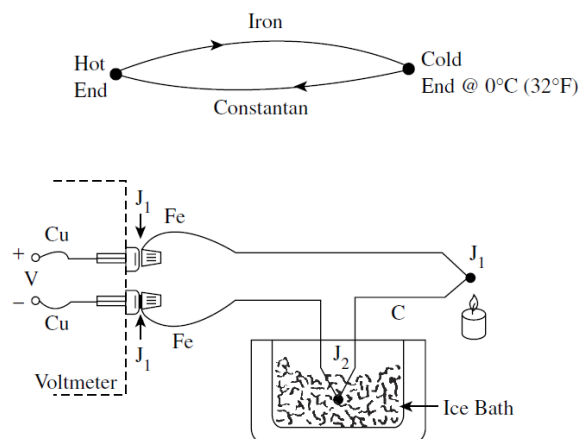


รูปที่ 2-16 องค์ประกอบและหลักการทำงาน Thermocouples

$$E = \sum_{n=1}^{n=k} \left(\frac{1}{n} \right) \cdot \alpha_n \cdot t^n \quad (\text{Eq.2-1})$$

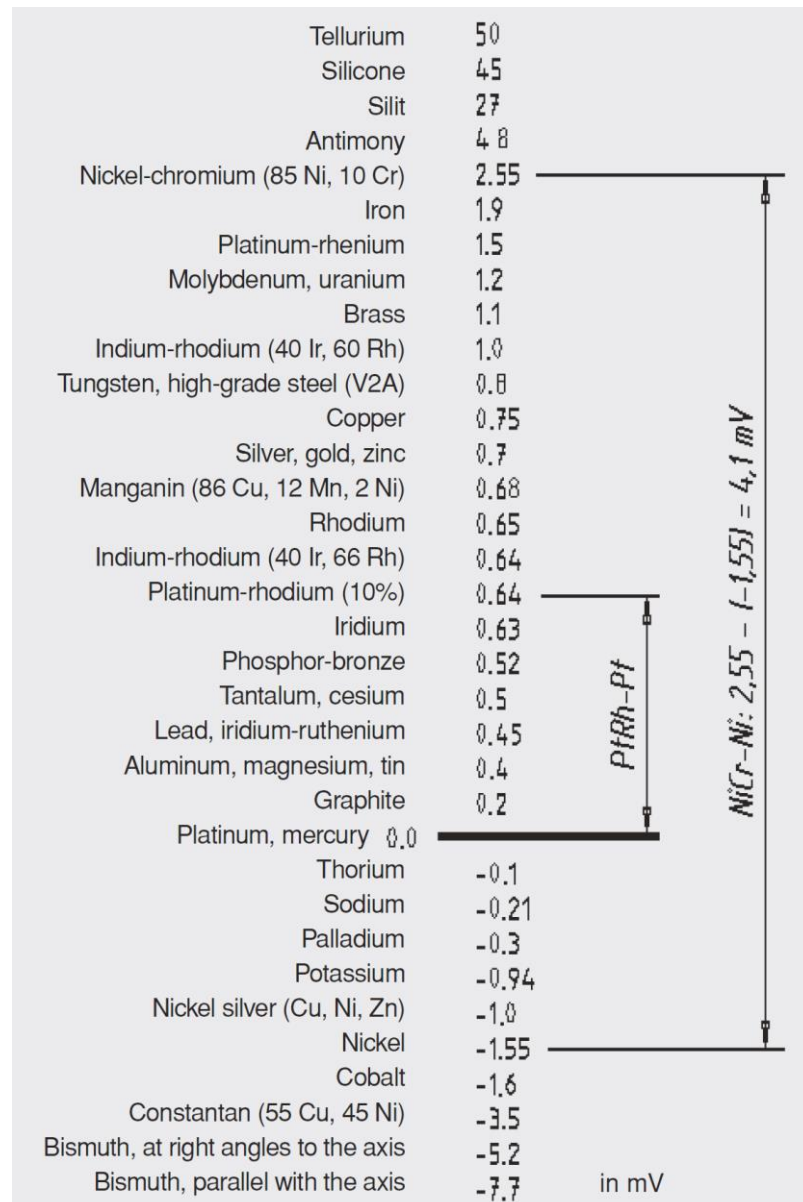
เมื่อ E = แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น α = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิล
 t = อุณหภูมิที่ปลายข้างร้อน n = จำนวนชุดของเทอร์โมคัปเปิลที่มีอุณหภูมิที่จุดต่อต่างกัน

เทอร์โมคัปเปิลในรูปที่ 2-17 ประกอบด้วยลวดโลหะหรืออัลลอยด์ที่มีเนื้อเดียวกัน 2 เส้นทำด้วยโลหะหรืออัลลอยด์ต่างชนิดกันเชื่อมติดกันแน่น โดยให้ปลายด้านหนึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนวัด (measuring) หรือเรียกว่า “hot junction” ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของลวด 2 เส้นจะต่อเชื่อมเข้ากับอุปกรณ์เครื่องมือประมวลผลสัญญาณ (signal processing device) ซึ่งจะรับกระแสไฟฟ้าที่มีระดับต่ำจากปลายลวด 2 เส้นเชื่อมติดกันดังกล่าว บริเวณส่วนต่อเชื่อมที่เครื่องมือประมวลผลดังกล่าวนี้เรียกว่า เป็นส่วนอ้างอิง (reference) หรือ “cold junction” โดยที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ (continuous electromotive force; EMF) ที่เกิดขึ้นระหว่างปลายลวดทั้ง 2 ด้านจะเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างส่วนวัด (hot junction) กับส่วนอ้างอิง (cold junction) และ “the Seebeck Coefficients” (รูปที่ 2-19) ของเส้นลวดทั้ง 2 เส้น จากนั้นแรงดันไฟฟ้าต่ำ (EMF) จะถูกแปลงหรือปรับให้มีแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น วัดได้จากโวลต์มิเตอร์ และถูกส่งไปใช้ประมวลผลแสดงค่าอุณหภูมิที่วัดได้



รูปที่ 2-17 iron-constantan thermocouple ใช้ J_1 วัดอุณหภูมิ J_2 วางในอ่างน้ำแข็งถือเป็นจุดอ้างอิง

ด้วยหลักการทำงานเบื้องต้น เมื่อเปลี่ยนชนิดวัสดุโลหะหรืออัลลอยด์ที่มีเนื้อเดียวกันของลวดทั้ง 2 ใน Thermocouples จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับมิลลิโวลต์ที่เกิดขึ้นกับกับค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ดังในรูปที่ 2-20

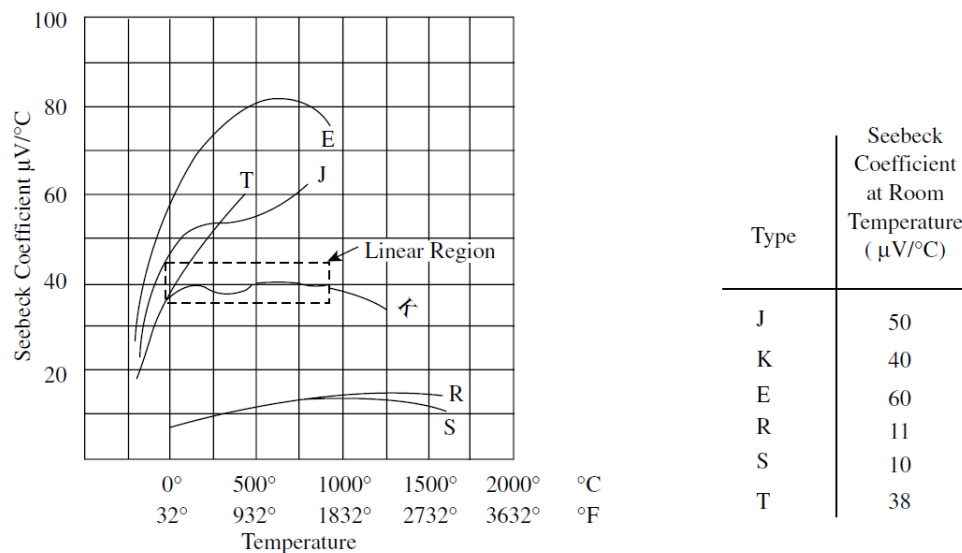


รูปที่ 2-18 แรงดันไฟฟ้าต่ำระหว่างขดลวด (thermoelectric voltages หรือ EMF) ที่นำมาทำ thermocouples โดยวัสดุโลหะที่ใช้เป็นส่วนวัด (hot junction) มีค่าอุณหภูมิที่ 100 °C เทียบกับ platinum ที่ใช้เป็นส่วนอ้างอิง (cold junction) ที่อุณหภูมิ 0 °C

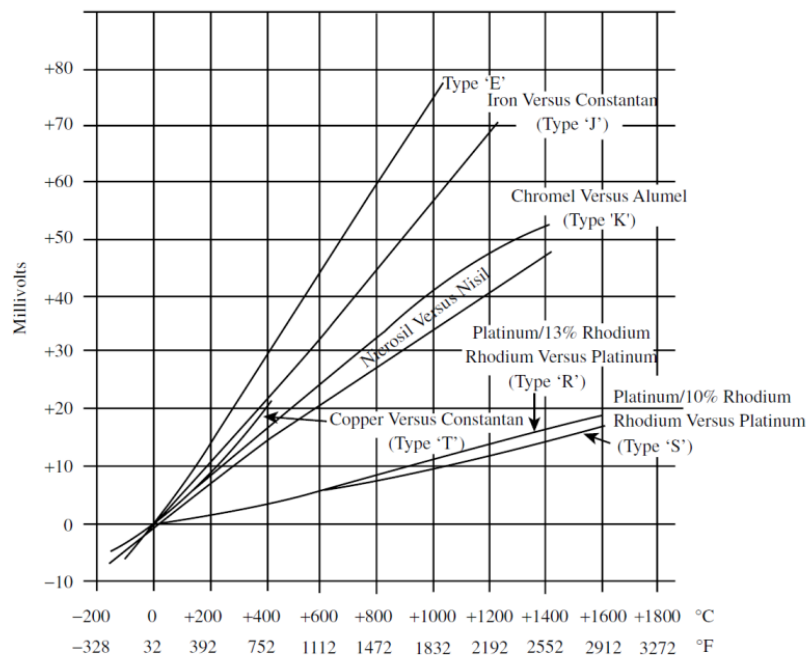
เนื่องจากชนิดวัสดุโลหะหรืออัลลอยด์ที่มีเนื้อเดียวกันของลวดทั้ง 2 ใน Thermocouples มีมากมายหลายชนิด ดังนั้นในการเลือกวัสดุที่นำมาใช้จึงควรคำนึงถึง

1. จุดหลอมเหลว (Melting points) ของเส้นลวดที่สูง ยิ่งดี
2. ปฏิกิริยาต่อสภาวะแวดล้อม อุณหภูมิ ความชื้น การทนต่อการกัดกร่อน

3. ค่ากระแสไฟฟ้าด้านทางออก (Thermoelectric output) เมื่อนำวัสดุดังกล่าวไปเชื่อมต่อกับวัสดุอื่น
4. Electrical conductance และค่าความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistance) (ตารางที่ 2-5)
5. ความเสถียรภาพในการให้ผลทางการวัด
6. ความสามารถในการทำซ้ำได้ของผลการวัด
7. ราคาวัสดุ
8. ง่ายต่อการจัดการในการจัดสร้างประกอบ เช่น การเชื่อม บัดกรี



รูปที่ 2-19 Seebeck coefficients ให้ปริมาณแรงดันไฟฟ้า (ระดับมิลลิโวลต์) ที่ถูกผลิตขึ้นต่อค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1°C



รูปที่ 2-20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าระดับมิลลิโวลต์ที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับชนิดโลหะหรืออัลลอยใน Thermocouples ที่ต่างกันกับค่าอุณหภูมิ

เทอร์โมคัปเปิลตามมาตรฐาน The International Society of Automation (ISA) แบ่งออกได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น

- Type E เหมาะกับงานสภาวะแวดล้อมที่เป็นสุญญากาศ (vacuum), สภาวะเฉื่อยไม่มีปฏิกิริยา (inert), มีการเกิดออกซิเดชันปานกลาง (mildly oxidizing) หรือ reducing atmospheres
- Type J อาจใช้งานที่สัมผัสกับหรือไม่สัมผัสกับบริเวณที่มีออกซิเจนอิสระน้อย (a deficiency of free oxygen), สภาวะแวดล้อมที่เป็นสุญญากาศ (vacuum)
- Type K โดยทั่วไปต้องการป้องกันเส้นลวดด้วยตัวเรือนโลหะหรือเซรามิก
- Type N ต้านทานต่อสภาวะที่มีการเกิดออกซิเดชันของสารซัลเฟอร์ (sulfur)
- Type T ใช้ได้ทั้งสภาวะแวดล้อมเกิดออกซิไดซ์ (oxidizing or reducing atmospheres)
- Types S, R, B เส้นลวดควรได้รับการป้องกันด้วยปลอกหรือตัวเรือนเซรามิก (a ceramic tube, a secondary tube of porcelain, and a silicon carbide or metal outer tube)

TABLE 4.13n

Resistance of Various Thermocouple Wire Sizes in Ohms per Double Foot of Wire Length at 20°C (68°F)

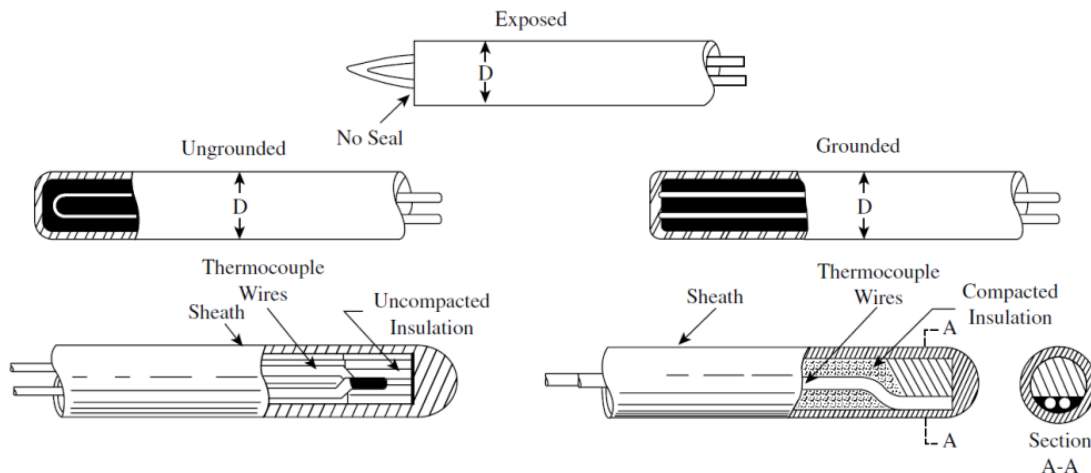
AWG No.	Diameter Inches	Thermocouple Type								
		K	J	T	E	R	S	G(W)	C(W5)	D(W3)
6	0.1620	0.23	0.014	0.012	0.027	0.007	0.007	0.008	0.009	0.009
8	0.1285	0.037	0.022	0.019	0.044	0.011	0.011	0.012	0.015	0.015
10	0.1019	0.058	0.034	0.029	0.069	0.018	0.018	0.020	0.023	0.022
12	0.0808	0.091	0.054	0.046	0.109	0.029	0.028	0.031	0.037	0.035
14	0.0641	0.146	0.087	0.074	0.175	0.047	0.045	0.049	0.058	0.055
16	0.0508	0.230	0.137	0.117	0.276	0.073	0.071	0.078	0.092	0.088
18	0.0403	0.374	0.222	0.190	0.448	0.119	0.116	0.126	0.148	0.138
20	0.0320	0.586	0.357	0.298	0.707	0.190	0.185	0.200	0.235	0.220
24	0.0201	1.490	0.878	0.753	1.780	0.478	0.464	0.560	0.594	0.560
26	0.0159	2.381	1.405	1.204	2.836	0.760	0.740	0.803	0.945	0.890
30	0.0100	5.984	3.551	3.043	7.169	1.910	1.850	2.030	2.380	2.260
32	0.0080	9.524	5.599	4.758	11.31	3.040	1.960	3.220	3.800	3.600
34	0.0063	15.17	8.946	7.660	18.09	4.820	4.660	5.100	6.040	5.700
36	0.0050	24.08	14.20	12.17	28.76	7.640	7.400	8.160	9.600	9.100
38	0.0040	38.20	23.35	19.99	45.41	11.95	11.60	12.90	15.30	15.30
40	0.0031	60.88	37.01	31.64	73.57	19.30	18.60	20.60	24.40	23.00

ตารางที่ 2-5 ค่า Electrical Resistance ของเทอร์โมคัปเปิล เปลี่ยนแปลงตามชนิดและขนาด

ส่วนประกอบที่สำคัญของเทอร์โมคัปเปิล (รูปที่ 2-21) ประกอบด้วย

1. Thermocouple elements ประกอบด้วยเส้นลวดโลหะ โดยมีฉนวนแยกลวดทั้ง 2 ออกจากกัน และปลายทั้ง 2 ของลวดเชื่อมต่อกัน
2. Thermocouple insulators เป็นฉนวนสำหรับกั้นระหว่างตัวเทอร์โมคัปเปิลกับตัวหลอดป้องกันครอบโลหะ (protection tubes หรือ sheath)

3. Protection tubes หรือ Sheath ทำหน้าที่ป้องกันการชำรุดเสียหายของเทอร์โมคัปเปิลขณะใช้งาน อีกทั้งช่วยให้ตัวเทอร์โมคัปเปิลแข็งแรงทนทานต่อสภาวะแวดล้อม
4. Extension Wires ทำหน้าที่ส่งสัญญาณหรือผลการวัดจากเทอร์โมคัปเปิลไปประมวลผลที่ส่วนประมวลผลเพื่อแสดงค่าอุณหภูมิในส่วนแสดงผลต่อไป



รูปที่ 2-21 การออกแบบการเชื่อมต่อของส่วนวัดใน Thermocouples (ARI Industries Inc.)

โดยปกติแล้วเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) จะสามารถใช้กับการวัดอุณหภูมิภายในช่วงการวัด 28 °C (50 °F) หรืออาจจะมากกว่าเมื่อมีค่าความแม่นยำ + 0.5 ถึง 1.1°C (+ 1 ถึง 2 °F) เป็นที่ยอมรับได้

Thermocouples เป็นเครื่องวัดอุณหภูมิได้รับความนิยมและความนิยมนำมาใช้มากมายหลายรูปแบบ เนื่องจากราคาไม่แพง, สามารถผลิตได้หลายขนาด, ใช้งานครอบคลุมช่วงอุณหภูมิกว้างและใช้งานได้ดีมากที่อุณหภูมิสูง, ง่ายต่อการประยุกต์ใช้งานหลายด้านและการติดตั้ง, ผลการวัดมีค่าเสถียรอย่างสมเหตุสมผล, ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้รวดเร็ว ข้อมูลทางเทคนิคดูได้จาก ตารางที่ 2-6 และ ตารางที่ 2-7

จากหลักการทำงานของ Thermocouples ค่า EMF ที่วัดได้ไม่ขึ้นกับความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดโลหะหรืออัลลอยด์ที่นำมาใช้ ในส่วนข้อเสียหลักก็คือสัญญาณด้านทางออกของ Thermocouples มีค่าอ่อนหรือน้อย (รูปที่ 2-18, รูปที่ 2-20) ทำให้ง่ายต่อการได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (electrical noise) อีกทั้งต้องการตัวขยายสัญญาณ (amplifier), การแปลงสัญญาณ EMF ซึ่งเป็นผลจากอุณหภูมิที่วัดได้ไปยังส่วนแสดงค่ากระทำไม่ได้ไม่ง่ายนัก, หากวัสดุที่ใช้เกิดออกไซด์ขึ้น (oxidation) ย่อมมีผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำ, อีกข้อจำกัดหนึ่งนั้นคือ Thermocouples ไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานกับของเหลวที่นำไฟฟ้า

สำหรับการเลือกใช้งานควรเลือก Thermocouples ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ไว้ก่อน อีกทั้งควรหลีกเลี่ยงการติดตั้งใช้งานในลักษณะเกิดความเครียดหรือความสั่นสะเทือนบนตัวตรวจวัดอุณหภูมิ หลีกเลี่ยงการใช้งานกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบรวดเร็วหรือทันทีทันใด ที่สำคัญควรใช้คู่กับ Transmitter เสมอ เพราะ Transmitter จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณวัดจากตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (sensor) ให้เป็นสัญญาณมาตรฐานเพื่อส่งต่อไปประมวลผลในส่วนแสดงค่าต่อไป

ISA Type Designation	Positive Wire	Negative Wire	Millivolts per °F	Recommended Range Limits Temp °F*		Scale Linearity	Atmosphere Environment Recommended	Favorable Points	Less Favorable Points
	Numbers = Percentages			Min.	Max.				
B	Pt70-RH30	Pt94-Rh6	.0003-.006	32	3380	Same as for type R couple	Inert or slow oxidizing	—	—
E	Chromel	Constantan	.015-.042	-300	1800	Good	Oxidizing	Highest EMF/°F	Larger drift than other base metal couples
J	Iron	Constantan	.014-.035	32	1500	Good; nearly linear from 300-800	Reducing	Most economical	Becomes brittle below 32°F
K	Chromel	Alumel	.009-.024	-300	2300	Good; most linear of all TCs	Oxidizing	Most linear	More expensive than T or J
R	Pt87-Rh13	Platinum	.003-.008	32	3000	Good at high temps. poor below 1000°F	Oxidizing	Small size, fast response	More expensive than type K
S	Pt90-Rh10	Platinum	.003-.007	32	3200	Same as R	Oxidizing	Same as R	More expensive than type K
T	Copper	Constantan	.008-.035	-300	750	Good but crowded at low end	Oxidizing or reducing	Good resis. to corrosion from moisture	Limited temp.
Y	Iron	Constantan	.022-.033	-200	1800	About same as type J	Reducing	—	Not industrial standard
—	Tungsten	W74-Re26	.001-.012	0	4200	Same as R	Inert or vacuum	High temp.	Brittle, hard to handle, expensive
—	W94-Re6	W74-Re26	.001-.010	0	4200	Same as R	Inert or vacuum	Same as above	Slightly less brittle than above
—	Copper	Gold-Cobalt	.0005-.025	-450	0	Reasonable above 60 K	—	Good output at very low temp.	Expensive lab.-type TC
—	Ir40-Rh60	Iridium	.001-.004	0	3800	Same as R	Inert	—	Brittle, expensive

°C = $\frac{^{\circ}\text{F} - 32}{1.8}$

ตารางที่ 2-6 ตารางเปรียบเทียบ Thermocouples ชนิดต่างๆ

TC Type	Measured Temperature Range in °F*	TC Wire Errors for Wires of Different Qualities*		Transmitter Error is Additional and in the Case of "Smart" Units Is ±0.05% of Span or Value Given Below, Whichever Is Larger*	Recommended Span Limits*	
		Standard	Special		Min.	Max.
B	32-3380	NA	NA	±1.89°F	63°F	2020°F
E	32-600 600-1600	±3°F ±0.5%	— —	±0.81°F	45°F	2100°F
J	32-530 530-1400	±4°F 0.75%	±2°F ±0.375%	±0.81°F	45°F	2500°F
K	32-530 530-2300	±4°F ±0.75%	±2°F ±0.375%	±0.81°F	45°F	2750°F
R	32-1000 1000-2700	±5°F ±0.5%	±2.5°F ±0.25%	±1.53°F	360°F	2950°F
S	32-1000 1000-2700	±5°F ±0.5%	±2.5°F ±0.25%	±1.53°F	360°F	2900°F
T	-300 to -75 -150 to -75 -75-200 200-700	— ±2% ±1.5°F ±0.75%	±1% ±1% ±0.75°F ±0.375%	±0.81°F	45°F	1025°F
N	32-530 530-2300	±4°F ±0.75%	±2°F ±0.4%	NA	NA	NA

$^{\circ}\text{C} = \frac{^{\circ}\text{F} - 32}{1.8}$

ตารางที่ 2-7 ช่วงการวัดได้และความคลาดเคลื่อนของ Thermocouples ชนิดต่างๆ

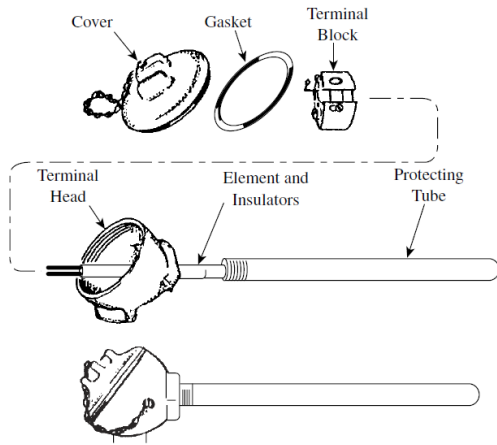


FIG. 4.13g
Exploded view of thermocouple assembly and protecting tube (top); complete assembly with protecting tube (bottom).

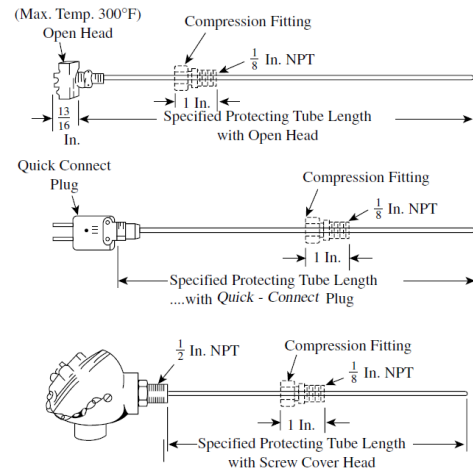


FIG. 4.13p
High-speed small O.D. thermocouple assemblies with stainless steel protecting sheath.

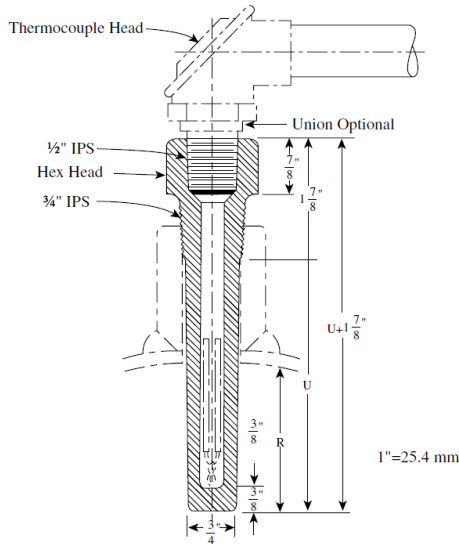


FIG. 4.13t
Screwed thermowell installation.²

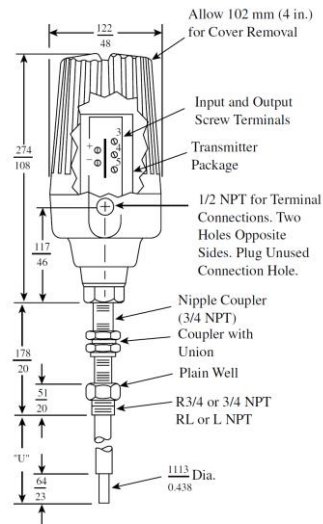
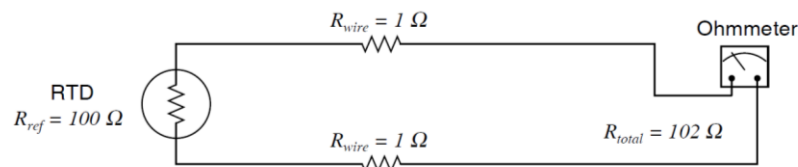


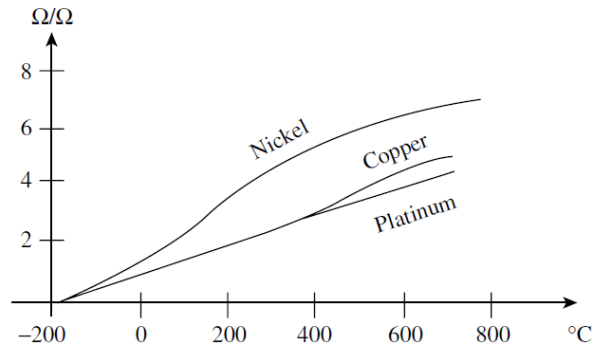
FIG. 4.13ee
Integral thermocouple transmitter mounted directly on top of the thermowell. (Courtesy of The Foxboro Co.)

รูปที่ 2-22 ตัวอย่างของรูปแบบและการใช้งาน Thermocouples

4.3. Resistance Temperature Detectors (RTD) ด้วยหลักการที่ว่า ความต้านทานไฟฟ้า (electrical resistance) ของตัวนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอุณหภูมิของตัวนำไฟฟ้านั้นๆ ดังรูปที่ 2-24 การจัดทำตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (sensor element) ชนิด RTD จึงเป็นการนำขดลวดโลหะ platinum บริสุทธิ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ๆ มาขดอยู่บนแท่งเซรามิกในรูปแบบต่างๆ ดังรูปที่ 2-25 จากนั้นเมื่อนำขดลวดดังกล่าวทำงานร่วมกับวงจรไฟฟ้าที่เหมาะสมจะทำให้ผลิตสัญญาณ (temperature signals) ส่งไปยังอุปกรณ์อีกตัวหนึ่งซึ่งทำหน้าที่บอกค่าอุณหภูมิที่วัดได้ต่อไป พบว่าความต้านทานของขดลวดในวงจรมีผลต่อความแม่นยำของ RTD



รูปที่ 2-23 วงจรหลักการทำงานของ RTD



รูปที่ 2-24 ความต้านทานไฟฟ้าของตัวนำไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ในกรณีลวด Platinum มี Temperature coefficient $0.00392 \, \Omega/\Omega \, ^\circ\text{C}$ ที่ $0 \, ^\circ\text{C}$ และ $0.00293 \, \Omega/\Omega \, ^\circ\text{C}$ ที่ $800 \, ^\circ\text{C}$ หรือ $0.00385 \, \Omega/\Omega \, ^\circ\text{C}$ ในช่วง $0-100 \, ^\circ\text{C}$

การนำขดลวดโลหะ platinum บริสุทธิ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก ๆ มาขดอยู่บนแท่งเซรามิก และซีลเคลือบด้วย แก้วอีกชั้นหนึ่งในรูปที่ 2-25 A การพันแบบนี้จะก่อให้เกิดความเครียด (strain) เมื่อใช้ที่อุณหภูมิสูง ในส่วนรูปที่ 2-25 B เป็นการพันเป็นเกลียวในแท่งเซรามิก การใช้งานจึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้วัดกับชิ้นงานที่มีความ สั่นสะเทือนเข้ามาเกี่ยวข้องและในรูปที่ 2-25 C ขดลวดถูกพันอยู่ในรูปแผ่นฟิล์มบางๆ ในแผ่นเซรามิกทำให้ตัว ตรวจจับอุณหภูมิชนิดนี้ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ราคาไม่แพงแต่การทำงานไม่ค่อยเสถียรมากนัก ทั้งนี้ขีด ความสามารถของตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิด RTD จึงขึ้นอยู่กับชนิดโลหะบริสุทธิ์แต่ละชนิดดังตารางที่ 2-9

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิวัดสำหรับเครื่องวัดอุณหภูมิ RTD ประมาณได้ดัง สมการ

$$R_T = R_{\text{ref}} [1 + \alpha(T - T_{\text{ref}})] \quad (\text{Eq.2-2})$$

เมื่อ R_T = ค่าความต้านทานของ RTD ที่อุณหภูมิ T (ohms)

R_{ref} = ค่าความต้านทานของ RTD ที่อุณหภูมิอ้างอิง T_{ref} (ohms)

α = Temperature coefficient of resistance ($\Omega/\Omega \, ^\circ\text{C}$)

แต่เนื่องจากในความเป็นจริงแล้ว ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับอุณหภูมิที่วัดได้ของเครื่องวัดอุณหภูมิ RTD มีความไม่เป็นเชิงเส้นดังในสมการข้างต้น ดังนั้นหากต้องการหาค่าใกล้เคียงมากขึ้นต้องใช้สมการของ “Callender-van Dusen formula” ดังนี้

สำหรับอุณหภูมิ $-200 \, ^\circ\text{C} \leq T \leq 0 \, ^\circ\text{C}$, $T_{\text{ref}} = 0^\circ\text{C}$

$$R_T = R_{\text{ref}} [1 + AT + BT^2 - 100CT^3 + CT^4] \quad (\text{Eq.2-3})$$

โดยค่า A , B , และ C เป็นค่า Callender-van Dusen constants

$$A = \alpha + \frac{\alpha \cdot \delta}{100}$$

$$B = \frac{-\alpha \cdot \delta}{100^2}$$

$$C = \frac{-\alpha \cdot \beta}{100^2}$$

และ

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 + R_0}$$

$$\delta = \frac{R_0[1 + \alpha(260)] - R_{200}}{4.16R_0\alpha}$$

$$\beta = \begin{cases} \text{ค่าคงที่} & \text{เมื่อ } T < 0 \\ 0 & \text{เมื่อ } T \geq 0 \end{cases}$$

สำหรับอุณหภูมิ $0^\circ\text{C} \leq T \leq 661^\circ\text{C}$, $T_{\text{ref}} = 0^\circ\text{C}$

$$R_T = R_{\text{ref}} [1 + AT + BT^2] \quad (\text{Eq.2-4})$$

CALLENDAR-VAN DUSEN CONSTANTS†

Alpha, α ($^\circ\text{C}^{-1}$)	.003750 $\pm$.00003	.003850 $\pm$.0001
Delta, δ ($^\circ\text{C}$)	1.605 $\pm$ 0.009	1.4999 $\pm$ 0.007
Beta, β^* ($^\circ\text{C}$)	0.16	0.10863
A ($^\circ\text{C}^{-1}$)	3.81×10^{-3}	3.908×10^{-3}
B ($^\circ\text{C}^{-2}$)	-6.02×10^{-7}	-5.775×10^{-7}
C ($^\circ\text{C}^{-4}$)*	-6.0×10^{-12}	-4.183×10^{-12}

*Both $\beta = 0$ and $C = 0$ for $T > 0^\circ\text{C}$

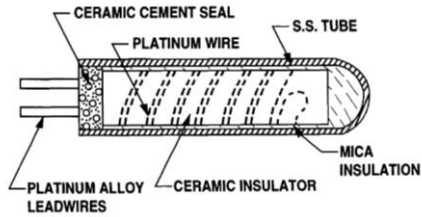
ตารางที่ 2-8 ค่า Callender-van Dusen Constants

ซึ่งปกติแล้ว ค่าความต้านทานอ้างอิงของ RTD ที่อุณหภูมิอ้างอิง (R_{ref}) จะใช้ค่า 100 Ω สำหรับในการใช้งานภาคอุตสาหกรรม และ 1,000 Ω สำหรับในการเป็นงานอื่นๆ

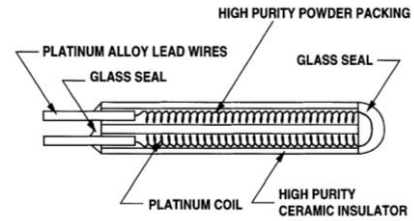
<i>Metal</i>	<i>Temperature Coefficient of Resistance (Ohms/Ohm$^\circ\text{C}$)</i>	<i>Electrical Resistance Per Circular Mil Foot (Ohms)</i>	<i>Commercially Available Temperature Ranges $^\circ\text{F}$ ($^\circ\text{C}$)</i>
Platinum	0.00392	59.00	-328 to 1532 (-200 to 850)
Nickel	0.00672	36.00	-330 to 600 (-196 to 316)
Copper	0.0038	9.26	-320 to 250 (-196 to 120)
Tungsten	0.0045	30.00	—
Gold	0.0040	13.00	—
Silver	0.0041	8.80	—

ตารางที่ 2-9 คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ทำเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด RTD ที่ 0°C

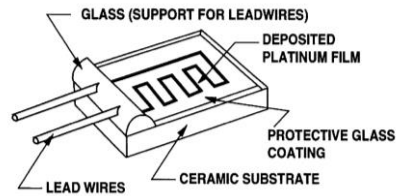
เครื่องวัดอุณหภูมิชนิด RTD ถือเป็นเครื่องวัดอุณหภูมิที่มีความแม่นยำสูงมากชนิดหนึ่ง มีความแม่นยำได้ถึง $\pm 0.05^\circ\text{C}$ ($\pm 0.1^\circ\text{F}$) ตลอดจนให้ผลการวัดซ้ำที่ดีและมีค่าเสถียรภาพสูงมากชนิดหนึ่ง มีความไวต่อการรับรู้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงมาก (0.1 to 10 $\Omega/^\circ\text{F}$) แต่ประสิทธิภาพดังกล่าวนี้จะได้รับผลกระทบมากขึ้นอยู่กับวัสดุตัวเรือนตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่ใช้บรรจุตลอด เครื่องวัดอุณหภูมิชนิด RTD มีราคาค่อนข้างแพงและมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับ Thermocouple และเพราะด้วยขนาดที่ใหญ่นี้เองจึงทำให้การตอบสนองการวัดอุณหภูมิช้าลง ดังรูปที่ 2-28 ดังนั้นเมื่อใช้เครื่องวัดอุณหภูมิชนิดนี้ในภาคสนามต้องใจเย็นๆ เมื่อแช่ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแล้วให้นับเลขในใจ 1 ถึง 10 แล้วอ่านค่าผลการวัดอุณหภูมิ สำหรับในกรณีที่ต้องการวัดอุณหภูมิชิ้นงานที่ได้รับแรงสั่นสะเทือนให้หลีกเลี่ยงการใช้เครื่องวัดอุณหภูมิชนิด RTD จะดีกว่า



(ก) ขดลวด RTD พันรอบแท่งทรงกลมเซรามิก

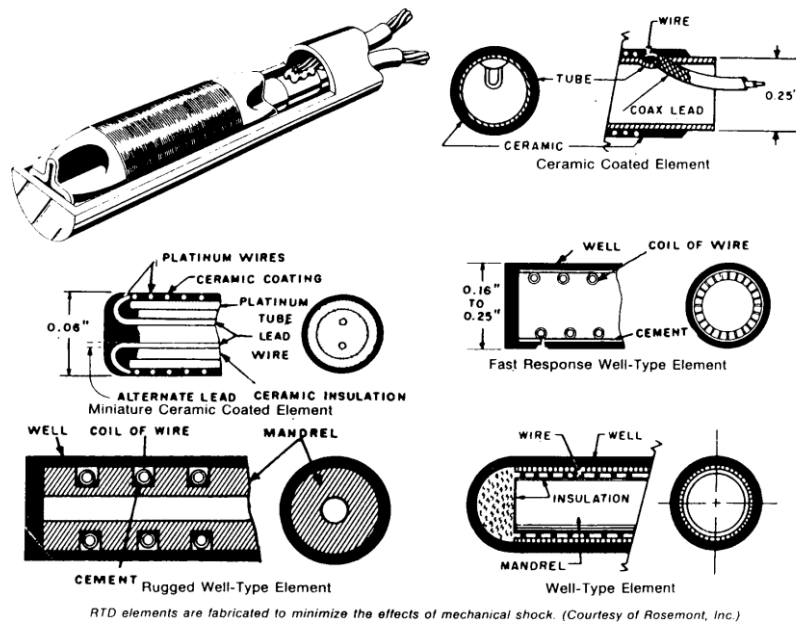


(ข) ขดลวด Coil RTD ขดอยู่ในช่อง

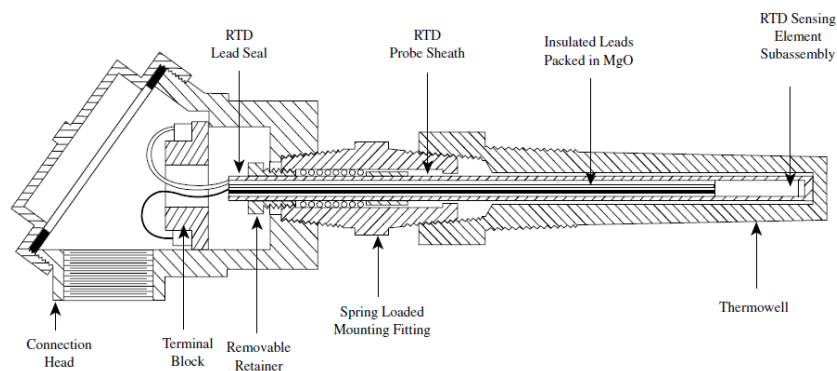


(ค) แผ่นฟิล์มบาง Platinum ถูกเคลือบบนเซรามิก

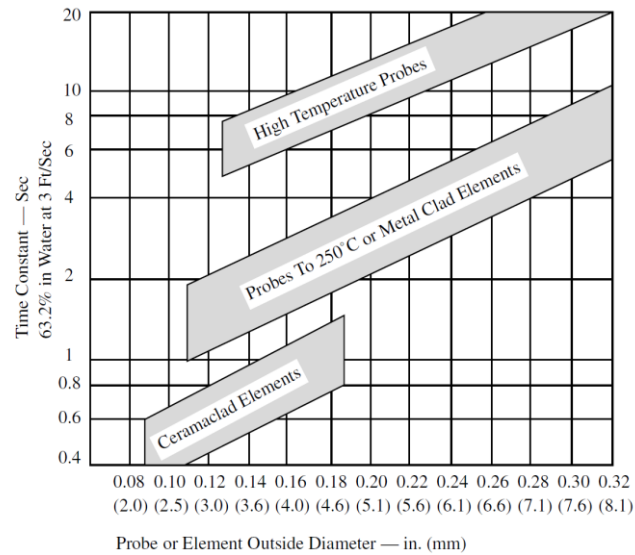
รูปที่ 2-25 รูปแบบขดลวดโลหะในเซรามิก



รูปที่ 2-26 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (sensor element) ของ RTD



รูปที่ 2-27 ลักษณะทั่วไปของเครื่องวัดอุณหภูมิ RTD ติดตั้งในช่องเสียบอุณหภูมิ, ส่วนปลายจะไวต่ออุณหภูมิมาก



รูปที่ 2-28 Responding time ของเครื่องวัดอุณหภูมิ RTD ทั้งหมด

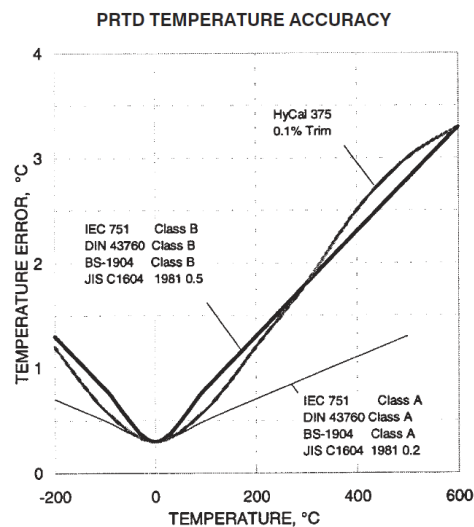
INTERNATIONAL STANDARDS

Standard	Comment	
IEC 751	Defines Class A and B performance for 100 Ω 0.00385 alpha Pt RTDs.	
DIN 43760	Matches IEC 751.	
BS-1904	Matches IEC 751.	
JIS C1604	Matches IEC 751. Adds 0.003916 alpha.	
ITS-90	Defines temperature scale and transfer standard.	
Parameter	IEC 751 Class A	IEC 751 Class B
R_0	100 $\Omega \pm 0.06\%$	100 $\Omega \pm 0.12\%$
Alpha, α	.00385 $\pm$.000063	.00385 $\pm$.000063
Range	-200°C to 650°C	-200°C to 850°C
Res., R_t^*	$\pm (.06 + .0008 T - 2E-7T^2)$	$\pm (.12 + .0019 T - 6E-7T^2)$
Temp., T^{**}	$\pm (0.3 + 0.002 T)$ °C	$\pm (0.3 + 0.005 T)$ °C

*Units are Ω s. Values apply to 100 Ω Pt RTDs only. Scale by ratio of the R_{ts} to apply to other ice point resistances.

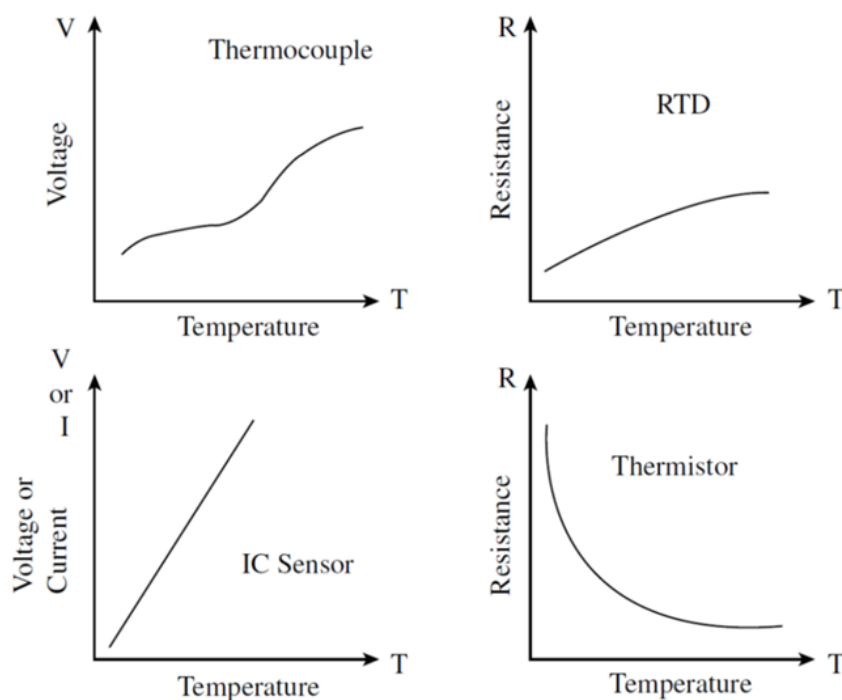
**Applies to all 0.00385 alpha Pt RTDs independent of ice point, R_0 .

รูปที่ 2-29 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับเครื่องวัดอุณหภูมิ RTD



รูปที่ 2-30 ค่าผลผิดเครื่องวัดอุณหภูมิ RTD ในแต่ละชั้นความเที่ยงของแต่ละมาตรฐาน

เครื่องวัดอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้กล่าวถึงทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Thermistor, Thermocouple และ Resistance Temperature detector (RTD) ล้วนมีหลักการทำงานที่แตกต่างกันด้วยการใช้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่ต่างกันในการสร้างความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางฟิสิกส์เทียบกับค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงให้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นให้มากที่สุดตลอดช่วงอุณหภูมิที่ต้องการวัด ดังรูปที่ 2-31 ซึ่งจะเห็นว่าหากความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางฟิสิกส์ใดกับอุณหภูมิยังมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรงมากเท่าไร พอจะอนุมานได้ว่าเครื่องวัดอุณหภูมินั้นเป็นเครื่องวัดอุณหภูมิที่ยิ่งดีมากชิ้นเท่านั้น และพอสรุปในภาพรวมข้อดีข้อเสียไว้ดังในตารางที่ 2-13



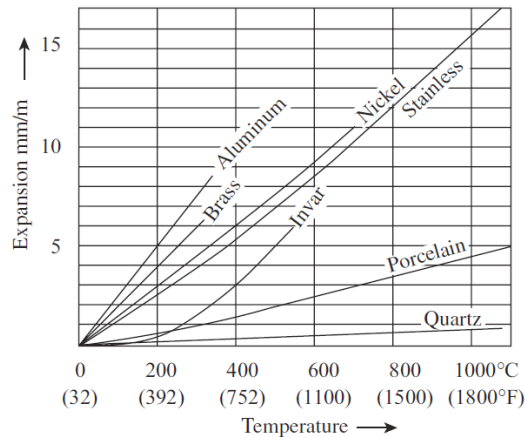
รูปที่ 2-31 ลักษณะความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับค่าทางฟิสิกส์ตามหลักการทำงานของเครื่องวัดอุณหภูมิ RTD

	RTD	Thermocouple	Thermistor
ช่วงอุณหภูมิใช้งานทั่วไป	-260 °C ถึง 850 °C	-270 °C ถึง 1800 °C	-80 °C ถึง 150 °C
ราคาตัววัด (Sensor)	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ
ราคาเครื่องวัด (System)	ปานกลาง	สูง	ปานกลาง
ความเสถียรภาพในการวัด	ดีมาก	ต่ำ	ปานกลาง
ความไวต่อการวัด	ปานกลาง	ต่ำ	ดีมาก
ความเป็นเชิงเส้น	ดีมาก	ปานกลาง	แย่
จุดเด่น	• เหมาะกับงานทั่วไป • มีความแม่นยำสูง • ช่วงการวัดปานกลาง	• ใช้งานที่อุณหภูมิสูง	• มีความไวต่อการวัดสูง • ช่วงการวัดแคบ • เหมาะการวัดเฉพาะจุด

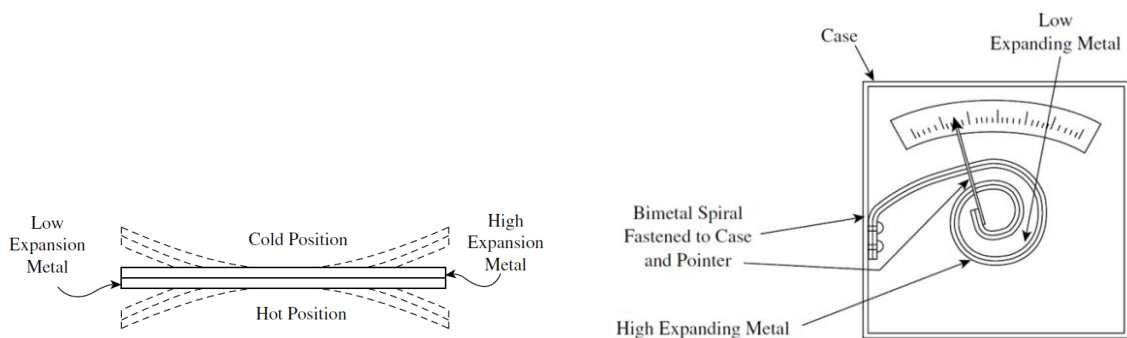
ตารางที่ 2-10 เปรียบเทียบโดยภาพรวมของเครื่องวัดอุณหภูมิอิเล็กทรอนิกส์

5. เครื่องวัดอุณหภูมิชนิดอื่นๆ ที่เราอาจพบเห็นได้แก่

5.1. Bimetallic Thermometer มีหลักการพื้นฐานที่ว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโลหะเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปและสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะดังกล่าวในโลหะต่างชนิดกันมีค่าไม่เท่ากัน ดังในรูปที่ 2-32 ดังนั้นเมื่อนำแถบโลหะที่ทำด้วยวัสดุต่างชนิดกันมาเชื่อมติดกันแล้วนำแถบโลหะดังกล่าวโดนความร้อนจะทำให้แถบโลหะที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นสูงกว่าขดตัวออกไปยังด้านแถบโลหะที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นต่ำกว่าดังแสดงในรูปที่ 2-33 ทั้งนี้ความโค้งงอ (Deflection) มีค่าเป็นสัดส่วนยกกำลังสองของความยาวและอุณหภูมิที่เปลี่ยน และสัดส่วนผกผันต่อความหนาของแถบโลหะ



รูปที่ 2-32 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นของโลหะต่างชนิด (WIKA Instrument Corporation)

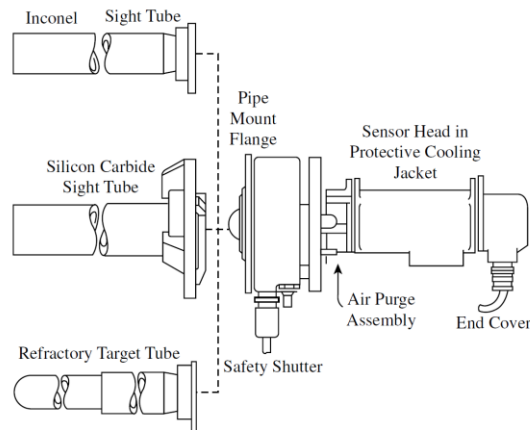


รูปที่ 2-33 ลักษณะการทำงานของ sensor เครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Bimetallic Thermometer



รูปที่ 2-34 รูปร่างโดยทั่วไปของเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Bimetallic Thermometer ประกอบด้วย Dual Helical Bimetal Coil (WIKA Instrument Corporation)

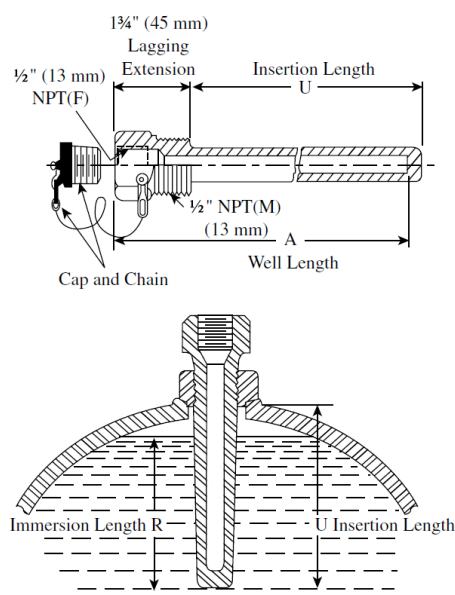
5.2. Pyrometer Thermometer เช่น Radiation Type และ Optical Type



รูปที่ 2-35 รูปร่างโดยทั่วไปของเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด Pyrometer Thermometer ติดตั้งกับผนังเตาเผา (Mikron Instrument Co.,)

การเลือกช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermowell Selection)

ช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermowell) มีไว้เพื่อป้องกันตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (sensor element) ของเครื่องวัดอุณหภูมิหรือตัวเครื่องวัดอุณหภูมิจากความเสียหายเชิงกล (mechanical damage), จากความเครียดหรือความเค้นหรือการกัดกร่อนทางเคมีหรือกัดกร่อนเชิงกล (Corrosion or Erosion) อีกทั้งสามารถนำตัวตรวจวัดอุณหภูมิของเครื่องวัดอุณหภูมิหรือตัวเครื่องวัดอุณหภูมิออกจากช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิได้ในภายหลังหากต้องการนำไปสอบเทียบ, ซ่อมแซมตัวตรวจวัดอุณหภูมิหรือเครื่องวัด หรือต้องการเปลี่ยนตัวตรวจวัดอุณหภูมิหรือเครื่องวัดในการใช้งาน ช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิจะถูกติดตั้งถาวรเข้ากับท่อหรือถังแบบมาตรฐานด้วยการเชื่อม (welded), ขันเกลียว (threaded), หรือหน้าแปลน (flanged) หรือวิธีการอื่นๆดังรูปที่ 2-22, รูปที่ 2-27, รูปที่ 2-34 และ รูปที่ 2-36



รูปที่ 2-36 รูปร่างโดยทั่วไปของการติดตั้งช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ

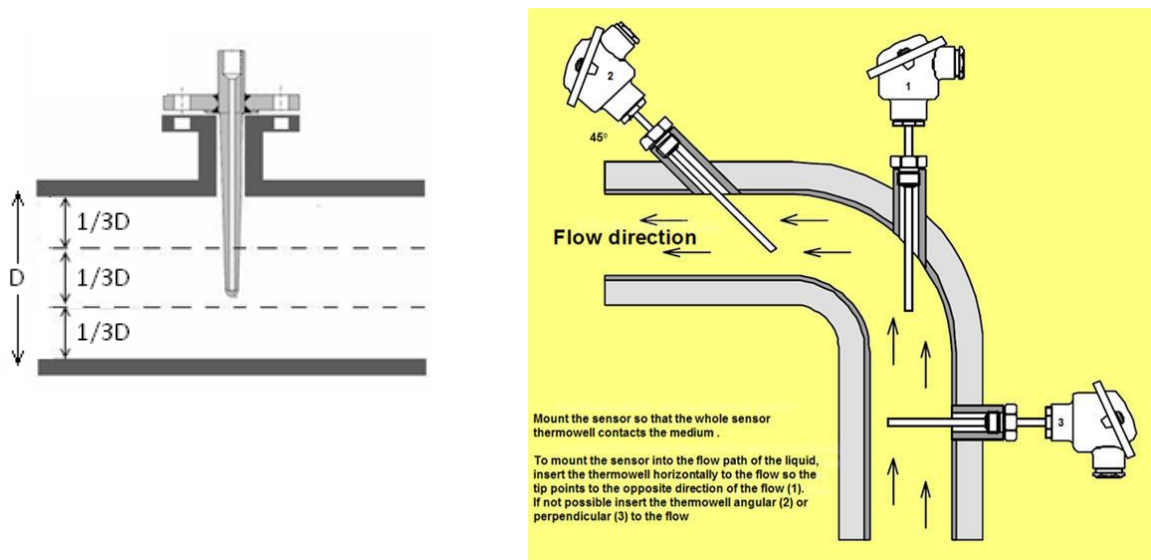


รูปที่ 2-37 ช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermowell) ประเภทต่างๆ

ในการเลือกใช้ช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิให้เหมาะสมกับการวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (dynamic temperature measurement) ภายในระบบท่อ, ถังวงแบบมาตรา หรือทางเข้ามาตรวัดแบบมาตรา เป็นต้น ควรคำนึงถึง

1. อุณหภูมิและความดันใช้งาน (Temperature and Pressure Rating) ควรเลือกช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิที่ได้รับการออกแบบเพื่อให้สามารถทนต่อความดันใช้งานและอุณหภูมิใช้งานได้อย่างปลอดภัยกับระบบที่ต้องการวัดอุณหภูมิ

2. การติดตั้ง (Mounting) ต้องคำนึงว่าการติดตั้งช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานต่าง ๆ หรือตามความต้องการของผู้ผลิต ซึ่งการติดตั้งช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิอาจจะเป็นชนิดแบบเกลียว, แบบเชื่อม หรือแบบหน้าแปลน ขึ้นอยู่กับการออกแบบ



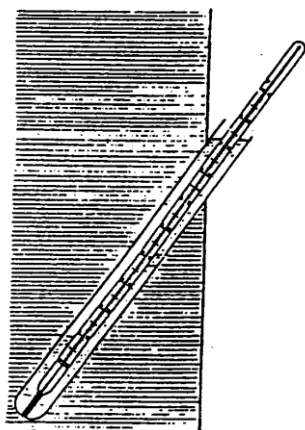
รูปที่ 2-38 ระยะความลึกและตำแหน่งของช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิที่เหมาะสมในท่อ โดยเฉพาะรูปทางขวามือตำแหน่งที่ 1 จะเหมาะสมมากที่สุดเพราะส่วนปลายของ sensor จะวัดอุณหภูมิมากที่สุดในกรณี RTD

ระยะความลึกของช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ (thermowell immersion depth) เข้าไปภายในท่อหรือถังตวงแบบมาตราครมีระยะมากพอทำให้ภายหลังติดตั้งช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิแล้วอิทธิพลของการนำความร้อน (effects of thermal conductivity) ของโลหะต้องดีมากเพียงพอต่อการลดหรือไม่ให้มีผลกระทบหรือผลผิดจากการนำความร้อน (conduction error) ด้วยเหตุนี้หลักการทั่วไปจึงกำหนดให้ระยะของช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิควร

- มีค่าน้อยสุดเท่ากับ 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ใช้ทำช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ หรือ
- มีค่าน้อยสุดเท่ากับ 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ หรือ
- พิจารณายืดเอาความยาวของส่วนที่เป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (sensor element) บวก 75 มิลลิเมตรกำหนดเป็นระยะความลึกของช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิก็ได้ หรือ
- ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระยะ 1 ใน 3 ส่วนตรงกลาง

3. วัสดุ (material) โดยปกติแล้ววัสดุที่ใช้ทำช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิต้องไม่ทำปฏิกิริยากับของเหลวที่ต้องการวัดอุณหภูมิอีกทั้งควรมีความสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี โดยปกติแล้วในกิจกรรมทางด้านปิโตรเลียม (น้ำมันเชื้อเพลิง) มักจะใช้ stainless steel 304, 310, 316, 321, 347SS เป็นต้น

4. การนำความร้อน (thermal conductivity) ในกรณีที่ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (temperature sensor) ไม่ได้สัมผัสโดยตรงกับผนังของช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ (thermowell) ช่องว่างระหว่างตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (sensor) กับผนังของช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิควรเติมด้วยสารตัวกลางที่มีความสามารถนำความร้อน (heat-conducting media) ที่เหมาะสมจะช่วยให้มีการนำความร้อนระหว่างตัวตรวจวัดอุณหภูมิกับผนังของช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิได้ดีขึ้น เพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องวัดอุณหภูมิได้ทำการวัดอุณหภูมิของเหลวที่ต้องการวัดจริงไม่ใช่เป็นการวัดอุณหภูมิของอากาศบริเวณภายในช่องเสียบอุณหภูมิแต่อย่างใด อีกทั้งช่วยลดระยะเวลาของการตอบสนองการวัด (response time) ของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ ดังแสดงใน รูปที่ 2-39



รูปที่ 2-39 ใช้น้ำเป็นตัวกลางนำความร้อนมายังเครื่องวัดอุณหภูมิในช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ

แต่อย่างไรก็ตาม ในการเลือกและการติดตั้งช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิต้องดำเนินการคำนวณอย่างรอบคอบจากผู้รู้หรือเจ้าของผลิตภัณฑ์เนื่องจากต้องคำนึงถึงหลายปัจจัยในคราวเดียวกัน ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิ ความดัน ความเร็วของเหลวที่ทำการวัด Stress และ Strain กระทำต่อช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ และ ฯลฯ

ชนิดของช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermowell type) มีด้วยกัน 2 ชนิด

1. **ช่องเสียบสำหรับการทดสอบหรือตรวจสอบ (Test Wells)** เป็นช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิสำหรับใช้เพื่อทดสอบหรือตรวจสอบระบบนั้นๆ ซึ่งปกติแล้วจะทำการติดตั้งเพื่อใช้งานในบางโอกาส เช่น ใช้ในการตรวจสอบเครื่องวัดอุณหภูมิเดิมซึ่งติดตั้งถาวรอยู่ภายในระบบมาตรวัด ดังนั้นช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิชนิดนี้ควรจัดให้มีฝาปิดไว้และควรปิดฝาทุกครั้งหลังจากทำงานเสร็จทุกครั้งเพื่อป้องกันการสะสมของสิ่งสกปรกภายในช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิดังกล่าว

2. **ช่องเสียบวัดอุณหภูมิ (Sensor Wells)** เป็นช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิที่ถูกติดตั้งสำหรับเครื่องตรวจวัดอุณหภูมิอย่างถาวรเพื่อตรวจวัดอุณหภูมิของเหลว ดังนั้นชนิดและขนาดของช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิจำเป็นต้องเหมาะสมกับเครื่องตรวจวัดอุณหภูมินั้นๆทั้งในทอมความแข็งแรงทนทาน หรือในทอมของการกัดกร่อน หรือไม่เป็นอุปสรรคทำให้ผลการวัดผิดไป เป็นต้น

ตำแหน่งติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature Sensor Placement)

การติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิไม่ว่าจำนวน, ตำแหน่ง และค่าความละเอียด (discrimination) ควรพิจารณาข้อแนะนำใน API Manual of Petroleum Measurement Standards, Chapter 7 Temperature Determination, Section 2 Dynamic Temperature Determination แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการวัดอุณหภูมิในการสอบเทียบหรือตรวจสอบให้คำรับรองเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง จึงพิจารณาเป็นรายกรณีไป

1. มาตรวัด (Meters หรือ Flow Meter)

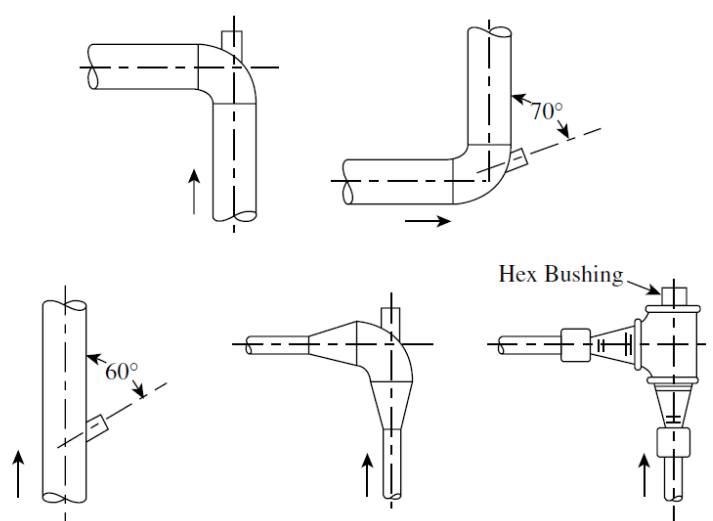
ในการวัดอุณหภูมิของเหลวภายในมาตรวัดขณะทำการวัดปริมาตรเพื่อนำค่าอุณหภูมิไปใช้ในการแก้ไขปรับค่าปริมาตรอันเนื่องจากอิทธิพลทางความร้อน (Thermal effects) กระทำต่อของเหลวซึ่งถูกวัดปริมาตรนั้น จึงมีมาตรวัดบางยี่ห้อออกแบบให้มีจุดติดตั้งตรวจวัดอุณหภูมิของเหลวภายในตัวมาตรวัด แต่อย่างไรก็ตามก็มีมาตรวัดบางแบบให้ผลการวัดอุณหภูมิภายในมาตรวัดไม่เป็นที่พอใจอันเนื่องจากรูปทรงของตัวมาตรวัดเอง หรือตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (temperature sensor) ที่ใช้งานไม่เหมาะสมกับจุดที่มาตรวัดออกแบบไว้ ดังนั้นในทางปฏิบัติหากพบว่าไม่สามารถติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (temperature sensor) ภายในตัวมาตรวัดได้โดยตรงให้ทำการติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิทันทีก่อนทางเข้าและทันทีหลังทางออกของมาตรวัดซึ่งผลการวัดอุณหภูมิดังกล่าวสามารถให้ค่าที่พอยอมรับได้ โดยนำค่าของอุณหภูมิที่วัดได้ทั้ง 2 ค่ามาหาค่าเฉลี่ยและใช้เป็นค่าอุณหภูมิตัวแทนของอุณหภูมิของเหลวภายในมาตรวัดขณะทำการวัด

ในกรณีการติดตั้งมาตรวัดเป็นแบบขนานนำมาเรียงขนานกันโดยมีท่อรวม (header) ร่วมกันด้านทางเข้าและมีท่อย่อยแยกออกไปเพื่อให้ของไหลแยกไหลเข้ามาตรวัดแต่ละตัวนั้น เราสามารถติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิเพียงตัวเดียวบริเวณท่อรวมก่อนทางเข้ามาตรวัดซึ่งต่อเรียงขนานกันก็สามารถทำได้ซึ่งผลการวัดอุณหภูมิพอเป็นที่ยอมรับได้ แต่หากเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่มาตรวัดวัดได้แต่ละตัวกับตำแหน่งที่ติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (temperature sensor) บริเวณท่อรวมวัดได้ซึ่งให้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้เป็นค่าอุณหภูมิของเหลวทั้งหมดค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่วัดได้ทั้ง 2 ค่าดังกล่าวนี้ต้องมีค่าไม่แตกต่างกันเกินกว่าค่าความสามารถอ่านได้ละเอียดสุด (discrimination) ตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2-2 ด้วยเหตุนี้ จึงควรมีช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ (thermowell) ในแต่ละชุดระบบมาตรวัด (meter run) เพื่อสามารถทดสอบค่าความแตกต่างของอุณหภูมิดังกล่าวกับระบบมาตรวัดแต่ละชุด

แต่อย่างไรก็ตามไม่ว่ากรณีใดๆ ตัวตรวจวัดอุณหภูมิจะต้องถูกติดตั้งอยู่ภายในแนวทางการไหลทั้งหมดของเหลว (total liquid stream) เพื่อเครื่องวัดอุณหภูมิสามารถให้ผลการวัดได้มีความถูกต้องแม่นยำเชื่อถือ ตัวอย่างตำแหน่งที่ควรติดตั้งในระบบท่อดังรูปที่ 2-40

2. ท่อทดสอบความจุ (Pipe Provers หรือ Conventional Pipe Prover)

เมื่อเราต้องการหาค่าอุณหภูมิของเหลวที่ไหลผ่านท่อทดสอบความจุเพื่อใช้ค่าอุณหภูมิดังกล่าวในการแก้ไขปรับค่าอิทธิพลทางความร้อน (thermal effect) ซึ่งมีผลต่อของเหลวที่ไหลผ่านท่อทดสอบความจุ อีกทั้งมีผลต่อตัวท่อทดสอบความจุด้วย ดังนั้นในการวัดอุณหภูมิของเหลวซึ่งไหลผ่านท่อทดสอบความจุในทางปฏิบัติจึงทำการวัดค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ใกล้ที่สุดกับทางเข้าท่อทดสอบความจุและ ณ ตำแหน่งที่ใกล้ที่สุดกับทางออกท่อทดสอบความจุจากนั้นนำค่าอุณหภูมิทั้ง 2 ค่ามาเฉลี่ยถือเป็นค่าอุณหภูมิของเหลวที่ไหลผ่านภายในท่อทดสอบความจุ



รูปที่ 2-40 ตำแหน่งช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิในท่อขนาด 3 นิ้วลงมา

ในหลายกรณีที่อุณหภูมิของของเหลว ณ ทางเข้าและทางออกท่อทดสอบความจุ มีค่าเท่ากัน ยกตัวอย่างเช่นในกรณีที่อัตราการไหลสูง ๆ ผ่านท่อทดสอบความจุ หรือท่อทดสอบความจุมีฉนวนหุ้ม เป็นต้น ดังนั้นภายในเงื่อนไขดังกล่าวนี้พอเป็นที่ยอมรับได้ในการที่จะติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (temperature sensor) เพียงหนึ่งตัว ณ ตำแหน่งทางด้านนอก (outlet) ของท่อทดสอบความจุแต่หากจะกำหนดให้มีช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ (thermowell) บริเวณทางเข้าท่อทดสอบความจุ อีกหนึ่งจุดสำหรับการตรวจสอบเป็นระยะ ๆ เพื่อให้แน่ใจว่าค่าอุณหภูมิของเหลว ณ ทางเข้าและทางออกท่อทดสอบความจุ มีค่าสอดคล้องกันก็สามารถทำได้ ในปัจจุบันเราไม่ค่อยได้พบท่อทดสอบความจุมีใช้งานอยู่มากนัก

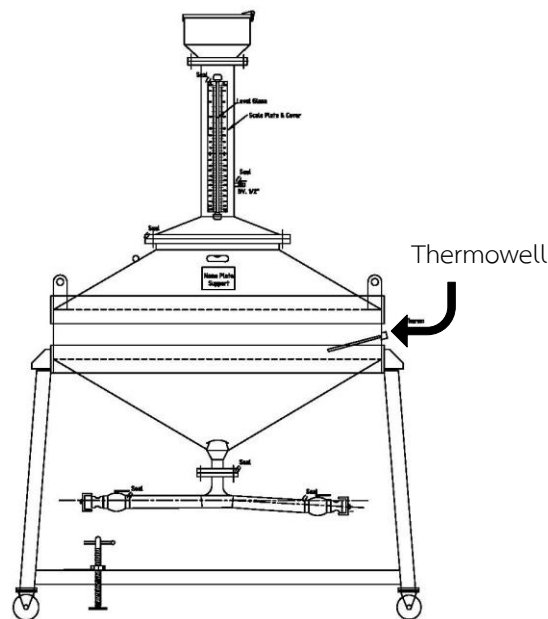
3. ถังตวงแบบมาตรา (Prover Tanks)

เมื่อเราต้องการหาค่าอุณหภูมิของเหลวซึ่งอยู่ภายในถังตวงแบบมาตราเพื่อใช้ค่าอุณหภูมิดังกล่าวแก้ไขปรับค่าปริมาตรอันเนื่องจากอิทธิพลทางความร้อน (thermal effect) ซึ่งมีผลต่อของเหลวภายในถังตวงแบบมาตราและวัสดุที่ใช้ทำถังตวงแบบมาตรา ดังนั้นจำนวนและตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิของเหลวภายในถังตวงแบบมาตราจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยจำนวนของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (temperature sensor) ที่ควรมีสำหรับถังตวงแบบมาตราทั้งชนิดที่มีฉนวนหุ้มและไม่มีฉนวนหุ้ม ดังนี้

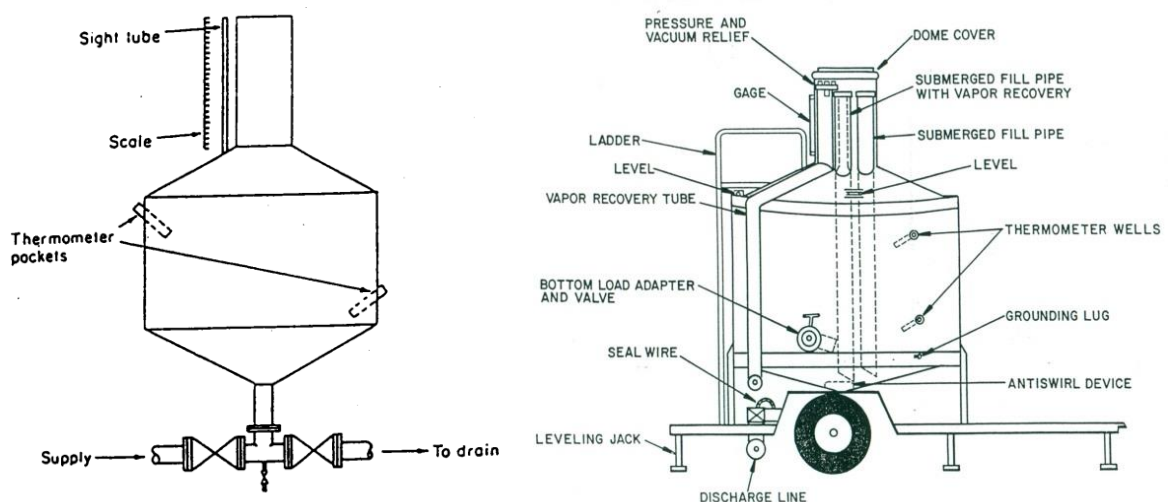
- ถังตวงแบบมาตรา ตั้งแต่ขนาด 5 จนถึง 500 ลิตร 1 จุด
- ถังตวงแบบมาตรา ตั้งแต่ขนาด 500 จนถึง 2,000 ลิตร 2 จุด
- ถังตวงแบบมาตรา ตั้งแต่ขนาด 2,000 ลิตรขึ้นไป 3 จุด

ในกรณีที่ทำการติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิจำนวน 1 จุด ตำแหน่งที่ควรติดตั้งได้แก่ตำแหน่งกึ่งกลางความสูงของถังตวงแบบมาตรา ดังรูปที่ 2-41

ในกรณีที่ทำการติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิจำนวน 2 จุด ให้ทำการแบ่งความสูงของถังตวงแบบมาตราออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน จากนั้นติดตั้งที่ระยะ 1 ใน 3 วัดจากส่วนปลายถังตวงแบบมาตราลงมาและติดตั้งที่ระยะ 1 ใน 3 วัดจากส่วนล่างถังตวงแบบมาตราขึ้นไป ดังแสดงในรูปที่ 2-42



รูปที่ 2-41 ข้องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิในถังตวงแบบมาตราพิกัดกำลัง 5 ลิตรจนถึง 500 ลิตร



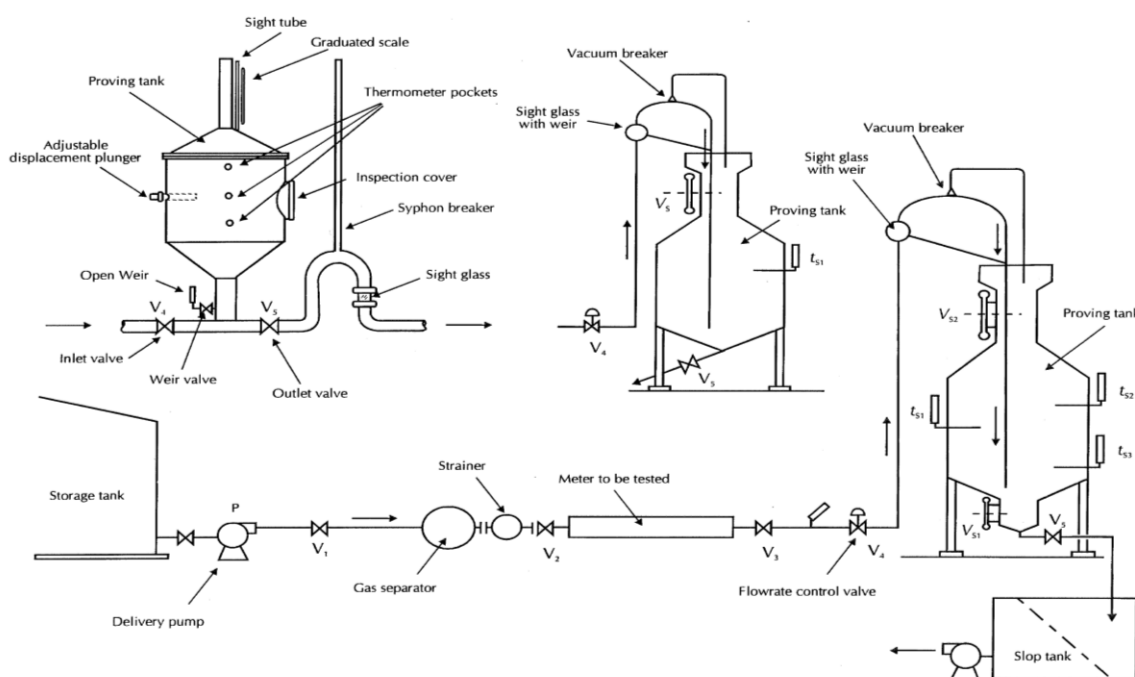
รูปที่ 2-42 ข้องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิในถังตวงแบบมาตราพิกัดกำลัง 500 ลิตรจนถึง 2,000 ลิตร

ในกรณีที่ทำการติดตั้งทำการวัดอุณหภูมิจำนวน 3 จุด ตำแหน่งที่ควรติดตั้งให้ทำการแบ่งความสูงของถังตวงแบบมาตรออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน จากนั้นติดตั้งที่ระยะ 1 ใน 3 ของความสูงวัดจากส่วนบนถึงตวงแบบมาตรลงมา 1 ตำแหน่ง, ตำแหน่งกึ่งกลางความสูงของถังตวงแบบมาตร 1 ตำแหน่ง และที่ระยะ 1 ใน 3 ของความสูงวัดจากส่วนล่างของถังตวงแบบมาตรขึ้นไป

สำหรับในกรณีที่ทำการติดตั้ง ตัวตรวจวัดอุณหภูมิมากกว่า 2 ตัวขึ้นไป ระยะห่างของการติดตั้งของตัวตรวจวัดอุณหภูมิต้องแบ่งให้มีระยะห่างเท่า ๆ กันในแต่ละระยะเส้นรอบวงของถังตวงแบบมาตร หรือหากต้องการติดตั้งที่เส้นรอบวงถังตวงแบบมาตรที่เส้นเดียวกันก็ให้แบ่งระยะห่างของเส้นรอบวงให้เท่า ๆ กันด้วย

เป็นที่รู้กันและยอมรับว่าถ้าหากถังตวงแบบมาตรเป็นชนิดหุ้มฉนวน และ/หรือ รอบการทำการสอบเทียบเสร็จอย่างรวดเร็ว การใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิเพียง 2 ตัวสำหรับถังตวงแบบมาตรที่มีขนาดมากกว่า 2,000 ลิตร ก็เพียงพอแล้ว

ระยะยื่นเข้าไปในถังตวงแบบมาตรของตัวตรวจวัดอุณหภูมิควรยื่นเข้าไปในถังตวงแบบมาตรไม่น้อยกว่า 30 ซม. แต่อย่างไรก็ตามส่วนของตัวตรวจวัดอุณหภูมิดังกล่าวจะต้องไม่ยื่นล้ำเลยจุดศูนย์กลางของถังตวงแบบมาตรอย่างเด็ดขาด



รูปที่ 2-43 ถังตวงภาคสนาม (field standard)

4. ถังตวงภาคสนาม (Field Standards)

โดยปกติแล้วขนาดของถังตวงภาคสนาม (field standards หรือ standard test measure) มีหลายขนาดจนถึง 50 ลิตร แล้วแต่ประเทศที่ใช้งาน แต่ใน OIML R120 กำหนดแยกประเภทไว้ดังในตารางที่ 2-11 ดังนั้นการใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแช่เข้าไปในจุดกึ่งกลางของถังตวงภาคสนามผ่านคอหรือปากทางเข้าก็พอเป็นที่ยอมรับได้ ด้วยเหตุนี้จึงควรเลือกใช้เทอร์โมมิเตอร์ชนิดกระเปาะแก้วหรือเครื่องวัดอุณหภูมิชนิด RTD โดยทำการ

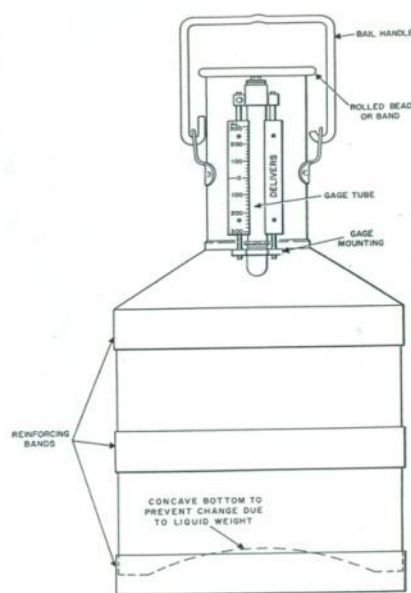
อ่านค่าปริมาตรที่วัดได้ทันทีก่อนที่นำเครื่องวัดอุณหภูมิจุ่มลงไปในถังตวงภาคนาม อีกทั้งต้องระมัดระวังและแน่ใจว่าไม่ได้อ่านค่าปริมาตรจากถังตวงภาคนามขณะที่เครื่องวัดอุณหภูมิแช่อยู่

Table 1

Description of standard capacity measures	Nominal capacity (L)
Standard flasks	0.1 – 0.2 – 0.5 1 – 2 – 5 – 10
Standard test measures	5 – 10 – 20
Proving tanks	20 or more
Standard flasks for special uses	0.25 – 2.5

ตารางที่ 2-11 ตารางกำหนดพิสัยกำลังของเครื่องตวงแบบมาตรา (OIML R120)

สำหรับถังตวงภาคนามที่มีขนาดใหญ่ขึ้น การวัดอุณหภูมิของเหลวภายในถังตวงภาคนามอาจจัดให้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิอยู่ในลำการไหลของเหลวซึ่งถูกระบายออกจากถังตวงภาคนามในตำแหน่งทันทีหลังจากของเหลวออกจากถังตวงภาคนามก็พอทำได้ อย่างไรก็ตามอาจจะมีอีกหลายวิธีการที่จะหาอุณหภูมิของเหลวภายในถังตวงภาคนามตามความต้องการและขึ้นอยู่กับผลการวัดซึ่งมีเงื่อนไขการทำงานพิเศษ หรือแล้วแต่ผลของการวัดของตัวตรวจวัดอุณหภูมิเป็นเฉพาะ ๆ ชนิดไป



รูปที่ 2-44 ถังตวงภาคนาม 20 ลิตร

5. อุปกรณ์เสริมสำหรับทดสอบ (Test Facilities)

ควรจัดให้มีช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ (thermometer well) ไว้ตรวจสอบการทำงานของเครื่องวัดอุณหภูมิซึ่งถูกติดตั้งอยู่อย่างถาวร โดยให้มีตำแหน่งการติดตั้งใกล้เคียงมากที่สุดเท่าที่จะกระทำได้อกับตำแหน่งของตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (temperature sensors) ซึ่งติดตั้งถาวรอยู่กับระบบท่อ เช่น ระบบมาตรวัด (meter run) หรือระบบสอบเทียบมาตรวัด (meter prover system) เพื่อที่จะสามารถทำการสอบเทียบอุณหภูมิระหว่างตัว

ตรวจวัดอุณหภูมิซึ่งติดตั้งถาวรดังกล่าวกับเทอร์โมมิเตอร์แบบมาตราซึ่งได้รับการสอบเทียบย้อนกลับได้ไปยังแบบมาตราของประเทศ (national standard)

ข้อกำหนดเครื่องวัดอุณหภูมิ (Temperature Requirements)

ในการติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (temperature sensors) ของเครื่องวัดอุณหภูมิที่มีหลักการทำงานแต่ละชนิด ย่อมมีช่วงเวลาตอบสนอง (responding time) แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อทำการติดตั้งตัวตรวจวัดอุณหภูมิตามคำแนะนำของผู้ผลิตให้อยู่ในตำแหน่งของทิศทางการไหลของเหลว และ/หรือ ต้องให้สัมผัสกับของเหลวที่ต้องการทำการวัดอยู่เป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งก่อนเพื่อให้อุณหภูมิของเหลวและตัวตรวจวัดอุณหภูมิมีการปรับตัวให้ใกล้เคียงกันเสียก่อนก่อนที่จะอ่านค่าอุณหภูมิที่วัดได้หรือบันทึกค่า ทั้งควรเว้นระยะเวลาก่อนอ่านค่าตามความเหมาะสมของเครื่องวัดอุณหภูมิแต่ละชนิด

1. **ข้อกำหนดอุณหภูมิสำหรับการสอบเทียบ (Temperature Requirements for Prover Calibration)** ขั้นตอนการสอบเทียบจำเป็นต้องใช้เครื่องวัดอุณหภูมิมีค่าอ่านค่าละเอียดได้ต่ำสุด (discrimination) จนถึง 0.05°C (0.1°F) เช่นในกรณีเทอร์โมมิเตอร์ชนิดกระเปาะแก้ว (mercury-filled glass stem thermometers) ควรมีขีดชั้นหมายมาตราละเอียดถึง 0.1°C (0.2°F) และอ่านได้ถึง 0.05°C (0.1°F) เมื่อนำเทอร์โมมิเตอร์ดังกล่าวไปใช้ในการสอบเทียบ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามเครื่องวัดอุณหภูมิทุกชนิดควรได้รับการตรวจสอบและสอบเทียบกับแบบมาตราซึ่งได้รับการสอบเทียบย้อนกลับได้ไปยังแบบมาตราของประเทศ (national standard) ก่อนนำมาใช้งาน

1.1 **การสอบเทียบท่อทดสอบความจุ (pipe prover)** ต้องการเครื่องวัดอุณหภูมิอ่านได้ละเอียดถึง 0.05°C (0.1°F) สำหรับอุณหภูมิภายในท่อทดสอบความจุ (เรียก “prover temperature”) และอุณหภูมิภายในแบบมาตรา (test measure) (เรียก “withdrawal temperature”) เมื่อใช้น้ำเป็นตัวกลางทดสอบ

1.2 **การสอบเทียบถังตวงแบบมาตรา (prover tank)** ต้องการเครื่องวัดอุณหภูมิอ่านได้ละเอียดได้ถึง 0.05°C (0.1°F) สำหรับอุณหภูมิภายในถังตวงแบบมาตรา (tank prover) (เรียก “prover temperature”) และอุณหภูมิภายในแบบมาตรา (test measure) (เรียก “withdrawal temperature”)

1.3 **การสอบเทียบมาตรวัดแบบมาตรา (master meter) ด้วยท่อทดสอบความจุ (pipe prover), ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (small volume prover หรือ compact prover) หรือถังตวงแบบมาตรา (tank prover)**

ถ้าใช้ถังตวงแบบมาตราในการสอบเทียบมาตรวัดแบบมาตรา การติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ต้องเป็นไปข้อกำหนดก่อนหน้านี้ และเทอร์โมมิเตอร์ต้องอ่านได้ถึง 0.05°C (0.1°F)

ถ้าใช้ท่อทดสอบความจุ หรือท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก ในการสอบเทียบมาตรวัดแบบมาตรา เทอร์โมมิเตอร์ต้องสามารถอ่านได้ถึง 0.05°C (0.1°F)

อย่างไรก็ตามทั้ง 2 กรณีนี้เครื่องวัดอุณหภูมิของเหลวภายในมาตรวัดแบบมาตราต้องสามารถอ่านได้ถึง 0.05°C (0.1°F)

2. **ข้อกำหนดอุณหภูมิสำหรับการสอบเทียบมาตรวัด (Temperature Requirements for Meter Proving)** ขั้นตอนการสอบเทียบมาตรวัดต้องการเครื่องวัดอุณหภูมิอ่านได้ถึง 0.25°C (0.5°F)

- การสอบเทียบมาตรวัดโดยใช้ถังตวงแบบมาตรา (prover tank) การติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิซึ่งกำหนดให้ก่อนหน้านี้จะต้องอ่านค่าอุณหภูมิได้ถึง 0.25 °C (0.5 °F)
 - การสอบเทียบมาตรวัดโดยใช้ท่อทดสอบความจุหรือท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก เครื่องวัดอุณหภูมิต้องอ่านที่อุณหภูมิได้ถึง 0.25 °C (0.5 °F) ทั้งที่ตัวมาตรวัดและท่อทดสอบความจุ
- ดังนั้นในการสอบเทียบมาตรวัดด้วยวิธีการใดๆ เมื่อนำค่าอุณหภูมิที่อ่านได้มาเฉลี่ยแล้วจะต้องปัดค่าให้มีค่าใกล้เคียง 0.25 °C (0.5 °F) มากที่สุดก่อนที่จะนำไปใช้ในการคำนวณตามข้อกำหนดของ API chapter 12.2 ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดอีกครั้งหนึ่ง

3. ข้อกำหนดอุณหภูมิสำหรับตัวหรือเอกสารบันทึกค่าอุณหภูมิ (Temperature Requirements for Measurement Tickets) โดยปกติแล้วต้องการค่าอ่านได้ละเอียดต่ำสุด (discrimination) มีค่าใกล้เคียง 0.5 °C (1.0 °F)

Table 1—Hierarchy of Accuracies

Paragraph	Level	Correction Factors and Intermediate Calculations to	Volumes. Significant Digits	Temperature Discrimination. to at least. °F
12.2.6	Prover calibration	6 decimal places*	5	0.1
12.2.7	Meter proving	4 decimal places	5	0.5
12.2.8	Measurement tickets	4 decimal places	5	1.0

* Values are not valid beyond four decimal places for the purpose of correcting volumes to 60°F. However, for correcting for small temperature differences between a meter and a prover, linear interpolation to more decimal places is acceptable.

ตารางที่ 2-12 ค่าอ่านค่าได้ละเอียดต่ำสุดของเครื่องวัดอุณหภูมิ (Temperature Discrimination)

จาก API MPMS Chapter 12 Section 2

การสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ

การตรวจสอบและสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิควรดำเนินการเป็นระยะ เพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องวัดอุณหภูมิดังกล่าวซึ่งใช้ในการสอบเทียบมาตรวัด (meter), ถังตวงแบบมาตรา (prover tank) และเครื่องวัดปริมาณอื่น ๆ ยังคงมีความแม่นยำถูกต้องอยู่ ดังนั้นจึงเป็นหน้าที่ของเจ้าหน้าที่ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดซื้อขายแบบคราวละมากๆ (whole sale) ร้องขอใบรายงานผลสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิก่อนทำการสอบเทียบมาตรวัดดังกล่าวบ้าง เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่อความเที่ยงมาตรวัดของเหลวปิโตรเลียม

มาตรการเสริมสำหรับงานในภาคสนาม เมื่อไม่มั่นใจว่าเครื่องวัดอุณหภูมิที่ใช้ เช่น RTD มี Temperature Transmitter ส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานเข้าเครื่อง Flow Computer เป็นต้น ในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองให้ผลการวัดที่ถูกต้อง ให้ทำการจัดหาอุปกรณ์เสริมเพื่อทำการตรวจสอบเครื่องวัดอุณหภูมิเทียบกับเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงที่ใบรายงานผลสอบเทียบโดยห้องปฏิบัติการที่ได้รับมาตรฐาน ISO 17025 เพื่อสามารถสอบย้อนกลับไปยังแบบมาตราของชาติได้ ซึ่งอาจติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิงเข้าไปในระบบท่อซึ่งจัดให้มีช่องเสียบเครื่องวัดอุณหภูมิ (test well) หากพบว่าค่าที่อ่านได้ระหว่างเครื่องวัดอุณหภูมิทั้ง 2 มีค่ามากเกินไประดับหนึ่งดังในตารางที่ 2-13 นั้นหมายถึงจำเป็นต้องทำการเปลี่ยนเครื่องวัดอุณหภูมิใหม่หรือทำการสอบเทียบใหม่

ในการตรวจสอบเครื่องวัดอุณหภูมิควรเลือกเครื่องวัดอุณหภูมิมาตรฐานมีค่าขีดชั้นหมายมาตราอย่างน้อยเท่ากับหรือดีกว่า 50% ของเครื่องวัดอุณหภูมิที่จะถูกทำการตรวจสอบ

Service	°F	°C
Meter prover calibration	0.1	0.05
Meter proving	0.2	0.10
Measurement tickets	0.5	0.25

ตารางที่ 2-13 ค่าความแตกต่างที่ให้ได้ระหว่างเครื่องวัดอุณหภูมิเทียบกับเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง

บทที่ 3

การหาค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Dynamic Pressure Determination)

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวปัจจัยที่มีผลต่อการสอบเทียบให้มีความแม่นยำถูกต้องในการคำนวณผลการสอบเทียบทางด้านปริมาตรไปแล้วหนึ่งปัจจัยคือ “อุณหภูมิ” ในบทนี้เราจะพิจารณาปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่งคือ “ความดัน” เป็นความดันของเหลวในขณะที่ทำการวัดปริมาณอยู่ (ไม่ใช่ความดันสุญญากาศ !!) ความดันของของเหลวมีบทบาทเด่นรองลงมาจากอุณหภูมิและจะมีผลกระทบเล็กน้อยในกรณีที่ใช้น้ำสะอาดเป็นตัวกลางสอบเทียบแต่มีบทบาทเด่นหากใช้ของเหลวผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมเป็นตัวกลางในการสอบเทียบ

ปัญหาการหาความดันในระบบปิด เช่น ระบบท่อ, ท่อทดสอบความจุ เป็นต้น ขณะทำการสอบเทียบหรือตรวจสอบให้คำรับรองแบบมาตราหรือเครื่องชั่งตวงวัด ก็เป็นปัญหาที่มีลักษณะคล้ายๆ เช่นเดียวกับการหาอุณหภูมิ นั่นคือ ตำแหน่งไหนละที่เราต้องทำการติดตั้งเครื่องวัดความดัน แล้วหากความดันเกิดการเปลี่ยนแปลงเราจะใช้ค่าความดันใดในการคำนวณ หรือปัญหาที่ว่าเราวัดความดันเพียงจุดเดียวในระบบปิดแล้วเราใช้เป็นค่าตัวแทนความดันในการสอบเทียบทั้งหมดได้เลยหรือไม่ เช่นในกรณีสอบเทียบมาตรวัด (flowmeter) ด้วยมาตรวัดแบบมาตรา (master flowmeter) เราวัดค่าความดันทางเข้ามาตรวัดที่ต้องการสอบเทียบเพียงจุดเดียวได้หรือไม่ เป็นต้น หรือในการสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (compact prover) เราควรทำการวัดความดันขณะที่ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กอยู่ตำแหน่ง standby (S_0) หรือตำแหน่งพร้อมที่จะ run (S_1) หรือตำแหน่งหลังจากถูกสูบลูกสูบ (S_2) หรือวัดความดันทั้ง 3 จุดแล้วมาหาค่าเฉลี่ยความดัน หรือวัดเพียง 2 จุดแล้วมาหาค่าเฉลี่ยความดัน อย่างไหนละถูกต้อง และ ฯลฯ นั้นแหละคือปัญหาที่ต้องทำความเข้าใจและตกลงกันเป็นแนวทางปฏิบัติเดียวกันเพราะเมื่อเวลาเปลี่ยนความเข้าใจเปลี่ยน การบอกผ่านหรือถ่ายทอดความรู้ยิ่งเบี่ยงเบนไป หรืออื่นๆ อีกมากมาย

ความดันสุญญากาศ ความดันบรรยากาศ ความดันสัมบูรณ์ และความดันเกจ (Vacuum, Atmospheric Pressure, Absolute Pressure and Gauge Pressure)

แต่ก่อนอื่นต้องทำความเข้าใจหน่วยวัดความดันกันเสียก่อน เนื่องจากเครื่องวัดความดันถูกนำเข้ามาจากต่างประเทศด้วยความหลากหลายยี่ห้อและชนิดรวมทั้งหน่วยวัดความดันที่ติดมากับเครื่องวัด ส่งผลให้เกิดปัญหาการแปลงหน่วยความดันที่แตกต่างๆ ตลอดจนการใช้ค่าความดันที่ถูกต้องในการคำนวณค่าต่างๆ ในสมการ แต่อีกเรื่องหนึ่งที่ต้องทำความเข้าใจคือ ภายใต้พระราชบัญญัติมาตราชั่งตวงวัด พ.ศ. 2466 จากนั้นอดีตจนถึงปัจจุบันเป็นพระราชบัญญัติมาตราชั่งตวงวัด พ.ศ. 2542 นั้นได้กำหนดให้หน่วยวัดที่ใช้ในการซื้อขายในประเทศไทยเป็นหน่วยวัดมาตราเมตริก หรือ SI Unit ด้วยเหตุนี้หน่วยวัดความดันจึงมีหน่วยเป็น “ปาสคาล (Pa)” มีค่าเท่ากับ

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}^2} \quad (\text{Eq.3-1})$$

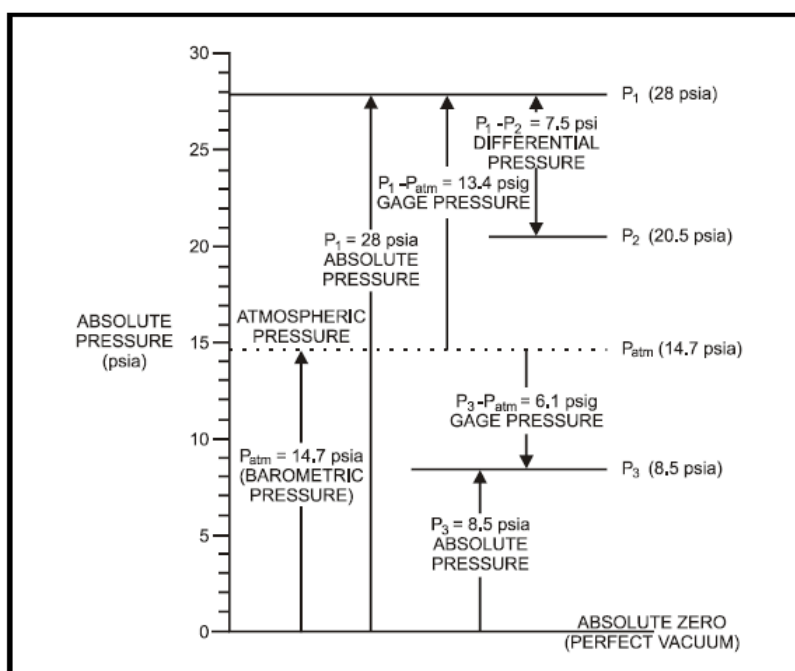
ในการปฏิบัติงานในภาคสนาม หลายคนมีความสับสนหรืออาจรู้แล้วแต่ลืมไป ด้วยเหตุนี้เรามาทำความเข้าใจและนิยามความหมายของค่าความดันที่ใช้กันอยู่

1. ความดันศูนย์สัมบูรณ์ (Absolute Zero Pressure) เป็นความดันมีค่าเท่ากับ 0 เป็นจุดอ้างอิงของการวัดค่าความดัน
2. ความดันสุญญากาศ (Vacuum Pressure; P_{vac}) คือ ความดันจากความดันศูนย์สัมบูรณ์ไปจนถึงความดันบรรยากาศ เป็นค่าซึ่งต่ำกว่าความดันบรรยากาศ เครื่องวัดความดันมีค่าเป็นลบ
3. ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Pressure; P_{atm}) คือ ความดันสภาวะบรรยากาศปกติ ที่มีค่าเท่ากับ 1.013 บาร์ ในระบบ SI หรือ 1.033 กิโลกรัมแรง/ตารางเซนติเมตร ในระบบเมตริก หรือ 14.7 ปอนด์/ตารางนิ้ว ในระบบอังกฤษ ความดันที่เกิดขึ้น ณ จุดต่างๆ บนผิวโลกจะแตกต่างกันตามระดับความสูง, อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ อีกทั้งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาบ้างน้อยบ้าง (นึกเอวามวลของอากาศกดทับเรา)
4. ความดันเกจ (Gauge Pressure; P_{gauge}) คือ ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดความดันของของไหลที่ต่อกับความดันเกจและความดันบรรยากาศ เป็นความดันที่แสดงค่าสูงกว่าความดันบรรยากาศ เครื่องวัดความดันมีค่าเป็นบวกและจะมีค่าเป็นศูนย์ในสภาวะปกติหรือความดันบรรยากาศ
5. ความดันสัมบูรณ์ (Absolute Pressure; P_{abs}) คือ ความดันบรรยากาศตั้งแต่ความดันสุญญากาศถึงความดันเกจ โดยรวมกับความดันบรรยากาศ

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{gauge}} \quad (\text{Eq.3-2})$$

และ

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{vac}} \quad (\text{Eq.3-3})$$



รูปที่ 3-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันบรรยากาศ ความดันสัมบูรณ์ และความดันเกจ

ดังนั้นการแปลงหน่วยความดันที่แตกต่างกัน ให้มีค่าในหน่วย “ปาสคาล (Pa)” เป็นไปตามตารางที่ 3-1

Pressure Conversion

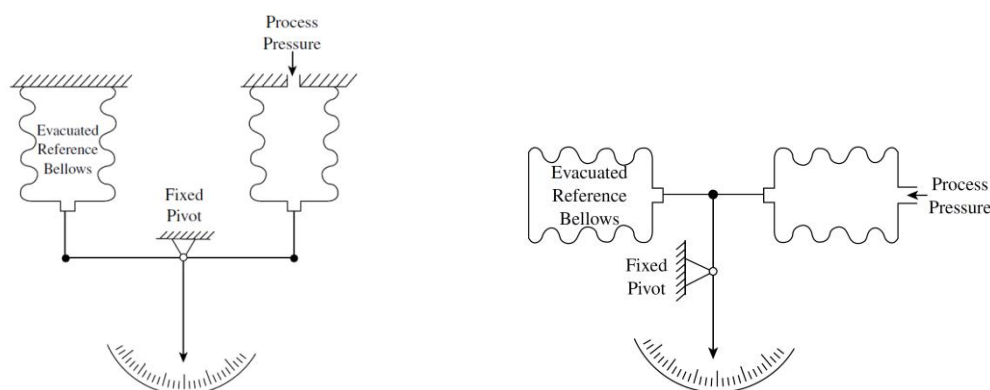
To Convert to Pascals (Pa) From	Multiply by
atmosphere, standard (atm)	1.01325 E+05
bar (bar)	1.0 E+05
centimeter of mercury (0 °C)	1.33322 E+03
centimeter of mercury, conventional (cmHg)	1.333224 E+03
centimeter of water (4 °C)	9.80638 E+01
centimeter of water, conventional (cmH ₂ O)	9.80665 E+01
dyne per square centimeter (dyn/cm ²)	1.0 E-01
foot of mercury, conventional (ftHg)	4.063666 E+04
foot of water (39.2 °F)	2.98898 E+03
foot of water, conventional (ftH ₂ O)	2.989067 E+03
gram-force per square centimeter (gf/cm ²)	9.80665 E+01
inch of mercury (32 °F)	3.38638 E+03
inch of mercury (60 °F)	3.37685 E+03
inch of mercury, conventional (inHg)	3.386389 E+03
inch of water (39.2 °F)	2.49082 E+02
inch of water (60 °F)	2.4884 E+02
inch of water, conventional (inH ₂ O)	2.490889 E+02
kilogram-force per square centimeter (kgf/cm ²)	9.80665 E+04
kilogram-force per square meter (kgf/m ²)	9.80665
kilogram-force per square millimeter (kgf/mm ²)	9.80665 E+06
kip per square inch (ksi) (kip/in ²)	6.894757 E+06
millibar (mbar)	1.0 E+02
millimeter of mercury, conventional (mmHg)	1.333224 E+02
millimeter of water, conventional (mmH ₂ O)	9.80665
poundal per square foot	1.488164
pound-force per square foot (lbf/ft ²)	4.788026 E+01
pound-force per square inch (psi) (lbf/in ²)	6.894757 E+03
psi (pound-force per square inch) (lbf/in ²)	6.894757 E+03
torr (Torr)	1.333224 E+02

ตารางที่ 3-1 ตารางแปลงค่าความดันจากหน่วยวัดต่างๆเป็น “ปาสคาล (Pa)”

เครื่องวัดความดัน (Pressure Devices)

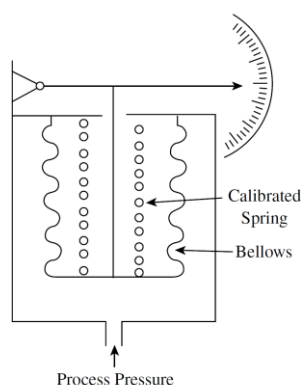
ปกติแล้วการแบ่งประเภทของเครื่องวัดอาจแบ่งตามช่วงการวัดความดัน บ้างก็แบ่งตามหลักการทำงาน หรือบ้างก็แบ่งตามการนำไปใช้งาน ซึ่งพอมิแนวทางพิจารณาดังตารางที่ 3-5 ดังนั้นเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องเลือกเครื่องวัดความดันเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานและลักษณะของงานที่ต้องการวัดความดัน

1. Bellows-Type Pressure Sensors ตัว bellow หรือ “หีบเพลง” ทำจากท่อไร้ตะเข็บจากวัสดุ เช่น brass beryllium copper, phosphor bronze, Monel, Inconel, และ stainless steel หรือนำแผ่นโลหะ มาเชื่อมต่อกันโดยเป็นวัสดุจำพวก Ni-Span C, Monel, Inconel-X และ stainless steel ด้วยตัวหีบเพลงนี้เอง จึงมีข้อดีคือได้ระยะยืดหดมีช่วงระยะกว้างขึ้น ส่งผลให้รองรับแรงดันที่สูงขึ้น จึงเหมาะกับการนำไปเชื่อมต่อโดยตรงกับส่วนแสดงค่า ความไว (sensitivity) ของเครื่องวัดความดันชนิดนี้จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหีบเพลง เครื่องวัดความดันชนิดนี้โดยทั่วไปมีช่วงการใช้งานระหว่าง 0 - 10 psi ในส่วนข้อจำกัดนั้นคือหีบเพลงได้รับผลกระทบหรือไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม, มีแรงเสียดทานภายในกลไกตลอดจนการยืดหยุ่นของโลหะที่ใช้ทำหีบเพลง ซึ่งล้วนมีผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำของเครื่องวัด



รูปที่ 3-2 เครื่องวัดความดันวัดค่าความดันสมบูรณ์ (Absolute Pressure Sensors)

ซ้าย : Beam balance sensor ขวา : Opposed bellows detector



รูปที่ 3-3 เครื่องวัดความดันวัดค่าความดันเกจเทียบความดันบรรยากาศอ้างอิง (Atmospheric Reference Sensors) ซึ่งได้จากการตั้งค่าแรงดันของสปริง

หากเครื่องวัดความดันถูกออกแบบมาเพื่อใช้หาค่าความดันสมบูรณ์ (Absolute Pressure Sensors) เครื่องวัดจะมีตัว bellow 2 ตัว ตัวหนึ่งใช้วัดค่าความดันและอีกตัวหนึ่งใช้เป็นค่าความดันอ้างอิงด้วยการผนึกซีลแน่น ผลการวัดความดันเกิดจากสถานะสมดุลของระบบแรงที่กระทำต่อหีบเพลงทั้ง 2 ดังรูปที่ 3-2

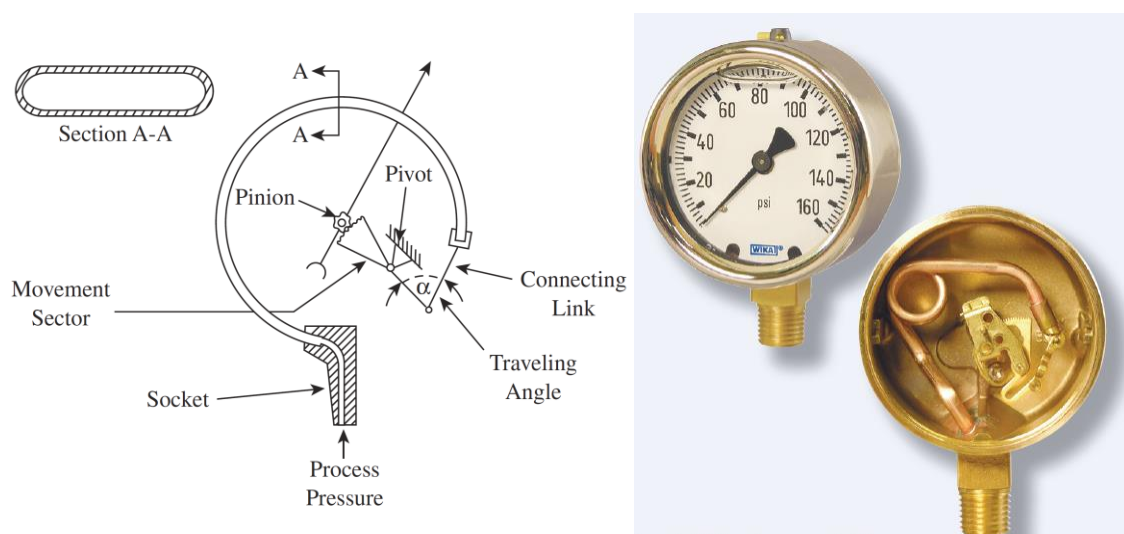
ส่วนเครื่องวัดความดันที่ใช้วัดค่าความดันโดยใช้ค่าความดันบรรยากาศอ้างอิง (Atmospheric Reference Sensors) เครื่องวัดจะมีตัว bellow 1 ตัว สัมผัสความดันบรรยากาศโดยตรง ดังรูปที่ 3-3

สำหรับพิกัดกำลังของเครื่องวัดความดันชนิดนี้โดยทั่วไปมีค่าดังตารางที่ 3-5

<i>Minimum and Maximum Spans of Standard Bellows</i>		
<i>Type of Bellows</i>	<i>Minimum Span</i>	<i>Maximum Span</i>
Large diameter brass	0–5 in. H ₂ O (0–127 mm H ₂ O)	0–90 in. H ₂ O (0–22.3 kPa)
Small diameter brass	0–90 in. H ₂ O (0–22.3 kPa)	0–450 in. H ₂ O (0–111 kPa)
Small diameter stainless steel	0–15 PSIG (0–103 kPa)	0–40 PSIG (0–276 kPa)

ตารางที่ 3-2 พิกัดกำลังของเครื่องวัดความดัน Bellows-Type Pressure Sensors

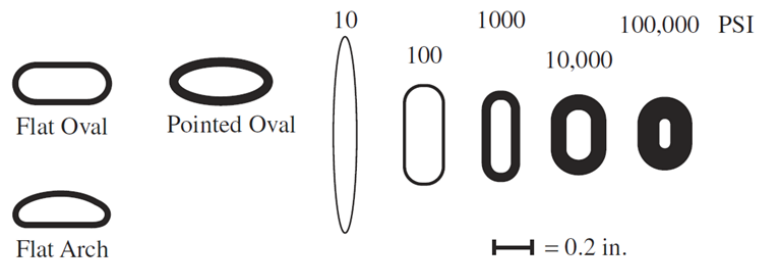
2. Bourdon and Helical Pressure Sensors เครื่องวัดความดันชนิดนี้ใช้ Bourdon tube สำหรับตรวจวัดความดันที่สูง (ช่วงวัดเกิน 30 PSI หรือ 200 kPa) เนื่องจากคุณสมบัติความเป็นสปริง (spring gradient) ไม่เพียงพอต่อการตรวจวัดความดันต่ำหรือความดันสุญญากาศ ลักษณะของ Bourdon tube จะมีทั้งการดัดทอให้เป็นรูปตัว C หรือการนำมาดัดเป็นรูปเกลียวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกันดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 ลักษณะของ Bourdon tube รูปตัว C เป็นวง 270 องศาโดยประมาณ

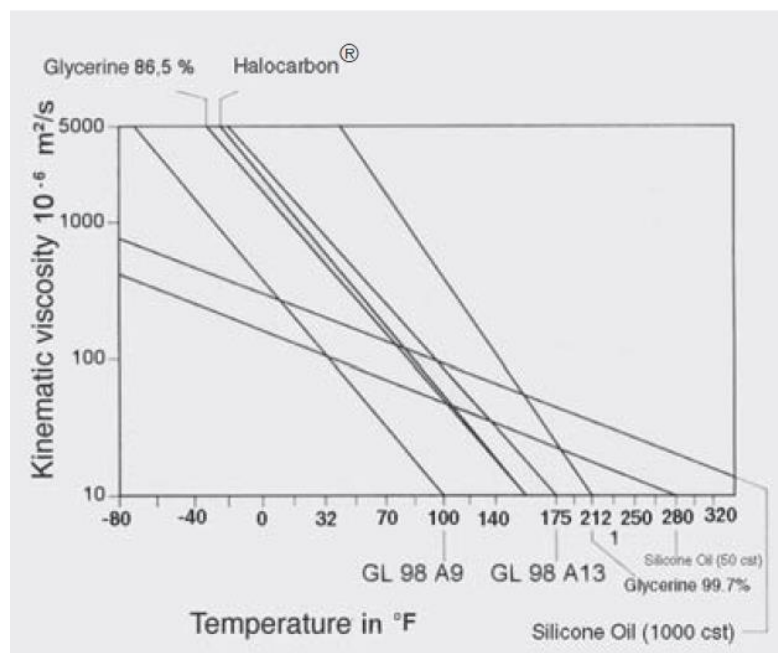
โดยรูปแบบของท่อดังกล่าวยังมีทั้งหน้าตัดทรงกลมหรือวงรีดังรูปที่ 3-5 ในการใช้งาน ปลายท่อ Bourdon tube ซึ่งถูกยึดไว้กับตัวเรือนจะถูกต่อเข้ากับความดันที่ต้องการวัด ในขณะที่ปลายสุดอีกด้านของ Bourdon tube เป็นปลายปิด เนื่องจากความแตกต่างของรัศมีภายในและภายนอกของ Bourdon tube ก่อให้เกิดแรงกระทำต่อ Bourdon tube ไม่เท่ากันโดยท่อจะพยายามยืดตัวตรงเมื่อรับความดันเข้ามาภายในท่อ ผลที่ตามมาทำให้ปลายสุดของ Bourdon tube เคลื่อนตัวไปไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear motion) เพื่อนำการเคลื่อนที่ดังกล่าวมาใช้เป็นประโยชน์จึงทำการเชื่อมต่อกลไกเข้าไปเพื่อปรับการเคลื่อนที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นการ

การหมุนที่เป็นเชิงเส้นด้วยเข็มชี้ค่า (linear rotational pointer) ด้วยเทคนิคต่างๆ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนการวัดให้มากที่สุด ให้นำมาซึ่งความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นตรงระหว่างระยะการหมุนเทียบกับความดันที่กระทำต่อ Bourdon tube



รูปที่ 3-5 ลักษณะและพื้นที่หน้าตัดของ Bourdon tube ตามช่วงความดันใช้งาน (WIKA Instrument Corporation)

นอกจากนี้อาจทำการใส่ของเหลวเช่น กลีเซอริน (glycerine) เข้าไปในหน้าปัดเพื่อช่วยหน่วงลดการแกว่งตัวอย่างรุนแรงของเข็มวัด (pointer) หากทำการวัดความดันที่มีการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมอย่างรุนแรง (จากร้อนจัดแล้วเย็นจัด) หรือจุดที่วัดมีการสั่นสะเทือนตลอดเวลาซึ่งเมื่อใช้งานไปเป็นเวลานานจะมีผลทำให้กลไกของ Pressure Gauge ติดขัดสึกหรอได้ แต่ก็มีผลเสียเช่นกันคือความหนืดของกลีเซอรินจะส่งผลให้การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความดัน (responding time) จะช้ากว่าปกติจะต้องรอจนกระทั่งความดันไม่เปลี่ยนแปลงก่อนที่จะอ่านค่าและบันทึกผล หรือหากเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างของไหลที่ต้องการวัดความดันกับของเหลวที่ใส่ภายในหน้าปัดเครื่องวัดความดัน



รูปที่ 3-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง kinematic viscosity กับอุณหภูมิของของเหลวที่ใส่ภายในหน้าปัดเครื่องวัดความดัน (WIKA Instrument Corporation)

TABLE 5.4d

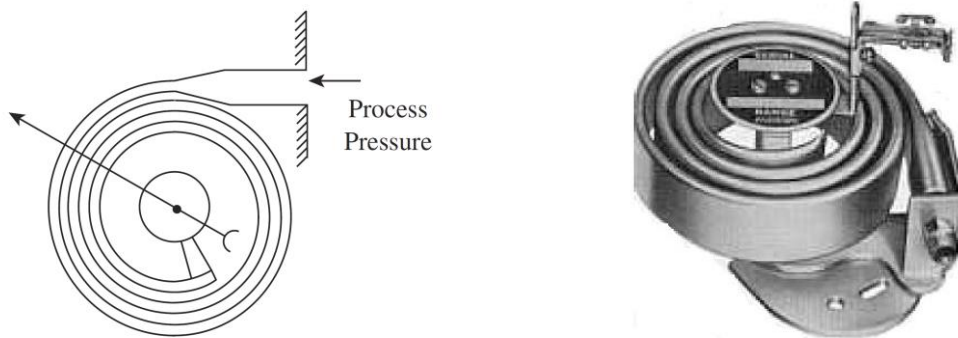
Pressure Ranges and Other Characteristics of the Different Bourdon Tube Materials (1 PSI = 6.9 kPa = 0.069 bars)

Tube Material	Corrosion	Spring Rate	Temp. Coefficient	Hysteresis	Maximum Pressure
Phosphorus bronze	P	F	P	F	800 PSIG
Beryllium copper	P	G	P	G	5000 PSIG
316 Stainless steel	G	P	P	P	10,000 PSIG
403 Stainless steel	G	P	P	P	20,000 PSIG
Ni-Span C	G	G	G	G	12,000 PSIG
K-Monel	G	P	P	P	20,000 PSIG

P = poor; F = fair; G = good.

ตารางที่ 3-3 ข้อเด่น ข้อด้อย ของวัสดุที่ใช้ทำ Bourdon tube

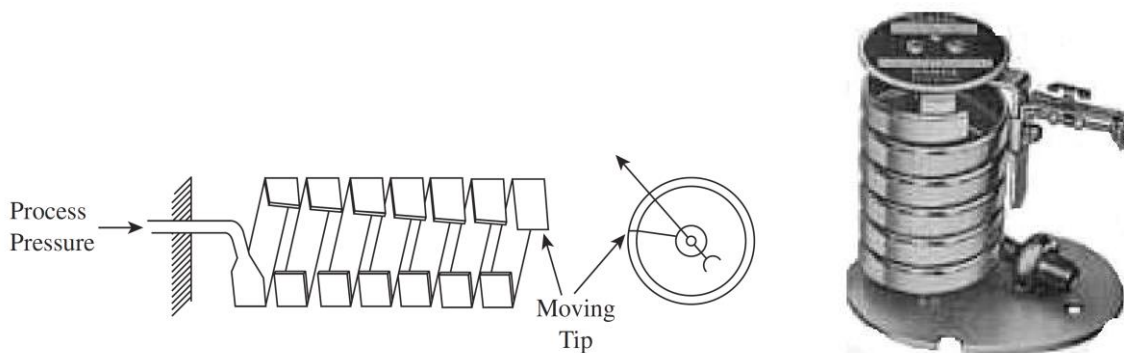
สำหรับลักษณะของ Bourdon tube เป็นท่อถูกนำมาขดเป็นรูปเกลียวที่มีจุดศูนย์กลางเดียวกันลักษณะเป็นลายกันหอย หรือ “Spiral Bourdon Pressure Sensors” ดังรูปที่ 3-7 เป็นการพัฒนาต่อมาจาก Bourdon tube รูปตัว C เนื่องจากระยะการเคลื่อนที่ด้านปลายสุดของท่อรูปตัว C มีไม่เพียงพอหากต้องนำระยะการเคลื่อนที่ดังกล่าวไปแปลงเป็นสัญญาณมาตรฐานในการทำงานร่วมกับ Transmitter เป็นต้น ดังนั้นเมื่อมีความดันอัดเข้า Bourdon tube ตัว Bourdon tube ลายกันหอยจะเริ่มคลายเกลียวและมีระยะการเคลื่อนที่ด้านปลายสุดด้วยระยะมากเพียงพอโดยไม่จำเป็นต้องมีกลไกขยายเพิ่มระยะเคลื่อนที่ ผลที่ตามมาคือเครื่องวัดความดันที่มี Bourdon tube ชนิดนี้จะเพิ่ม sensitivity และมีความแม่นยำเพิ่มขึ้น เพราะไม่ต้องสูญเสียพลังงานหรือแรงเสียดทานให้กับกลไกที่ต้องมาต่อพ่วงออกไป



รูปที่ 3-7 ลักษณะของ Bourdon tube รูปลายกันหอย หรือ Spiral Bourdon Pressure Sensors

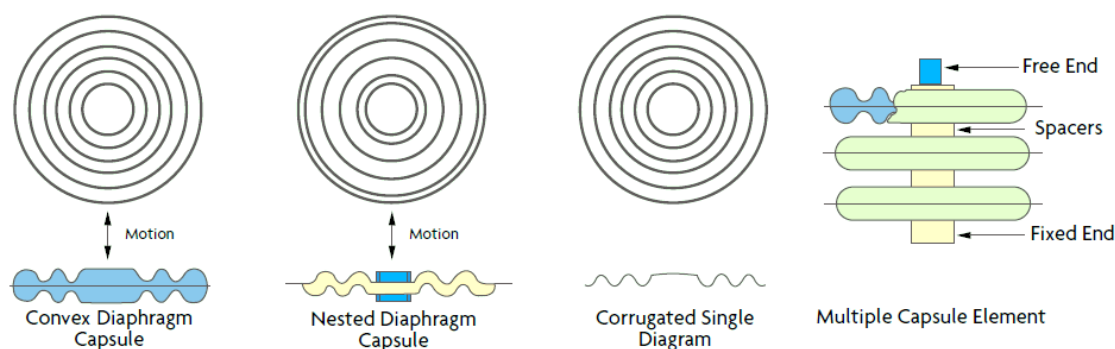
นอกจากนี้ยังมีเครื่องวัดความดันที่มี Bourdon tube ลักษณะเกลียวยาวออกมาเกิดจากการท่อถูกขดเป็นรูปเกลียวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกัน เรียกว่า “Helical Bourdon Pressure Sensors” (รูปที่ 3-8) ส่งผลให้ระยะการเคลื่อนที่ด้านปลายสุดของท่อชนิดนี้มีระยะเคลื่อนที่มากกว่าเมื่อเทียบกับ Bourdon tube ลายกันหอย และไม่จำเป็นต้องมีกลไกขยายเพิ่มระยะเคลื่อนที่เช่นกัน อีกทั้งมีขีดความสามารถรองรับกับการวัดความดันที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องตลอดเวลา รวมถึงความคงทนต่อความดันสูงเกินกว่าพิกัดกำลังความดันของเครื่องวัดได้หลายเท่าตัวจึงมีความปลอดภัยสูงในการใช้งานเมื่อเทียบกับเครื่องวัดความดันที่มี Bourdon tube แบบอื่นๆ

พิกัดกำลังของเครื่องวัดความดันชนิดนี้ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่นำมาขด, ความหนาของท่อ, จำนวนรอบของการขด รวมทั้งชนิดวัสดุของท่อ ตัวอย่างเช่น เครื่องวัดความดันที่มีพิกัดกำลังสูงจะมีจำนวนขด 20 รอบในขณะที่พิกัดกำลังต่ำอาจมีจำนวน 2 ขดโดยพื้นฐานของขนาด, ความหนา และวัสดุท่อที่นำมาใช้ทำ Bourdon tube เดียวกับ ด้วยเหตุนี้เครื่องวัดความดันชนิดนี้จึงมีช่วงการวัดที่กว้างมากตั้งแต่ 0–30 PSI (0–200 kPa) ถึง 0–80,000 PSIG (0–550 MPa)



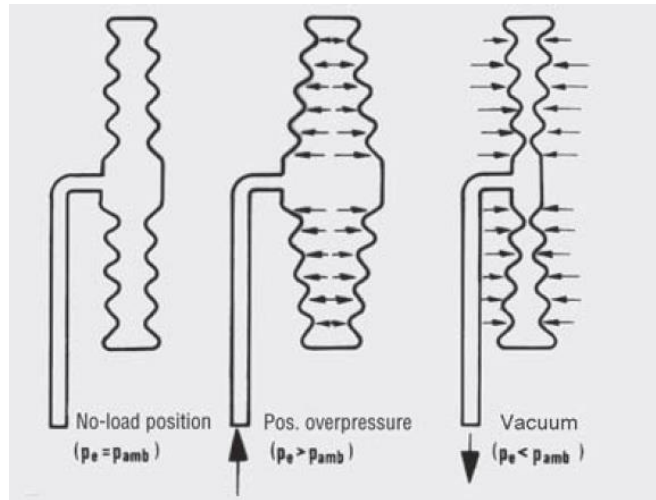
รูปที่ 3-8 ลักษณะของ Bourdon tube ชนิด Helical Bourdon Pressure Sensors

3. Diaphragm or Capsule-Type Sensors ตัวตรวจวัดความดันเป็นแผ่นไดอะแฟรม จากแผ่นโลหะขึ้นรูปเป็นลอนรวมกัน อาจอยู่เป็นแผ่นเดียวซึ่งจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความดันที่วัด หรือขึ้นรูปร่วมกันเป็น capsule ซึ่งช่วยให้รองรับความดันที่ต้องการวัดเพิ่มสูงขึ้น หรืออาจนำ capsule ต่อกันเป็นหลาย capsule ซึ่งช่วยให้เพิ่มระยะการเคลื่อนที่ของด้านทางออกของสัญญาณเมื่อวัดความดันเท่ากันเมื่อเทียบกับมี capsule เดียว ดังรูปที่ 3-9 และ รูปที่ 3-13

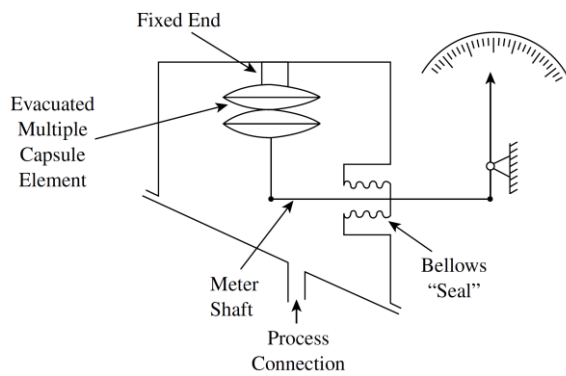


รูปที่ 3-9 ลักษณะของตัวตรวจวัดความดันชนิด Diaphragm

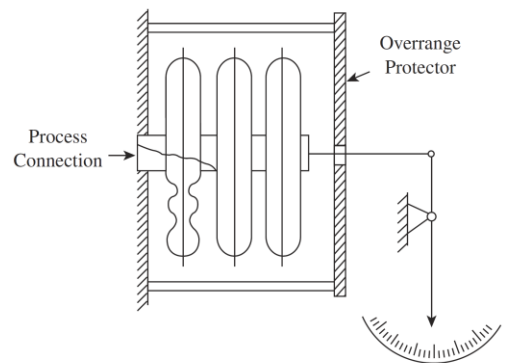
ในการทำงานหากภายใน capsule เป็นสุญญากาศ เครื่องวัดความดันชนิดนี้ก็จะทำการวัดค่าเป็นความดันสัมบูรณ์ (รูปที่ 3-11) แต่ถ้าหากอัดความดันเข้า capsule โดยตรงและ capsule ติดตั้งในสภาวะบรรยากาศปกติผลการวัดจะให้ค่าเป็นความดันเกจ (รูปที่ 3-12)



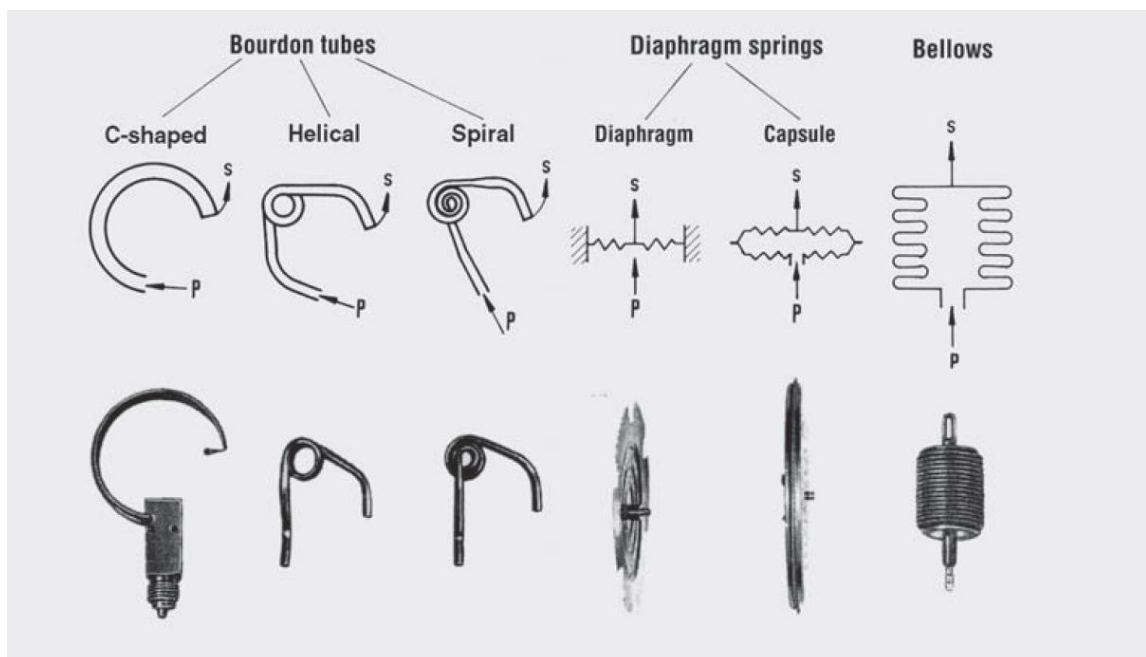
รูปที่ 3-10 การทำงานของตัวตรวจวัดความดันชนิด Capsule



รูปที่ 3-11 วัดความดันสมบูรณ์

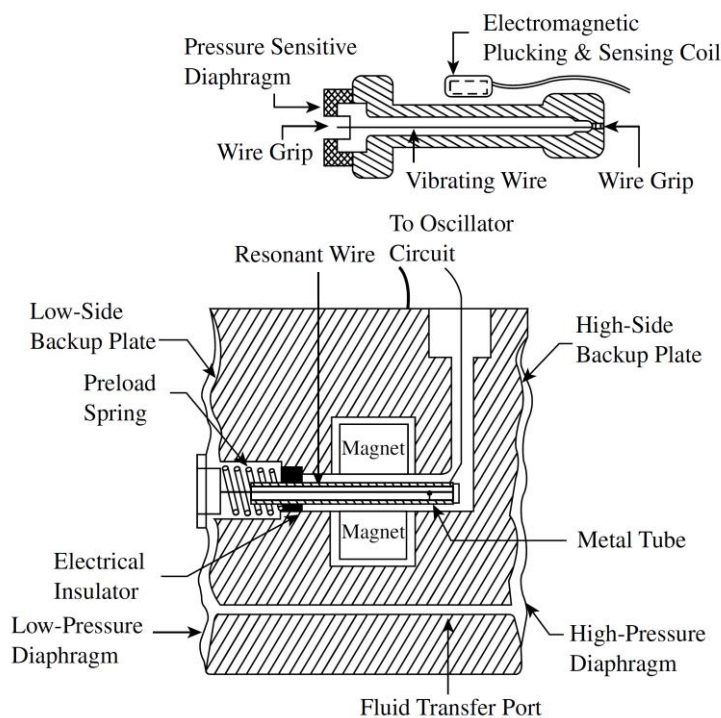


รูปที่ 3-12 วัดความดันเกจ



รูปที่ 3-13 ชนิดของส่วนวัดความดัน (Types of flexible measuring elements)

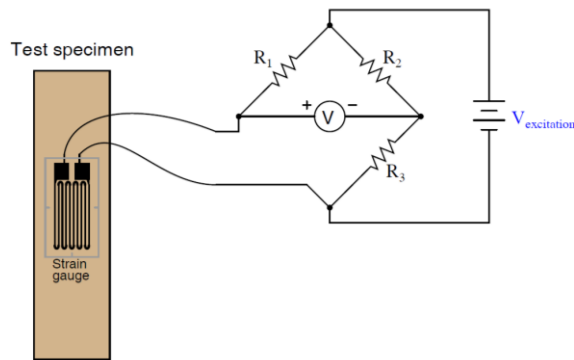
4. **เครื่องวัดความดันอิเล็กทรอนิกส์ (Digital Pressure)** เป็นเครื่องวัดความดันชนิดอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งนำเอาตัวตรวจจับความดันที่มีหลักการทำงานหลากหลาย เช่น strain gauge type, capacitance type, potentiometric type, resonant wire type, piezoelectric type, reductive type และ inductive types เป็นต้น มาใช้ทำงานจึงสามารถนำไปใช้งานได้ตามความต้องการ, ช่วงการวัด และความแม่นยำที่หลากหลาย



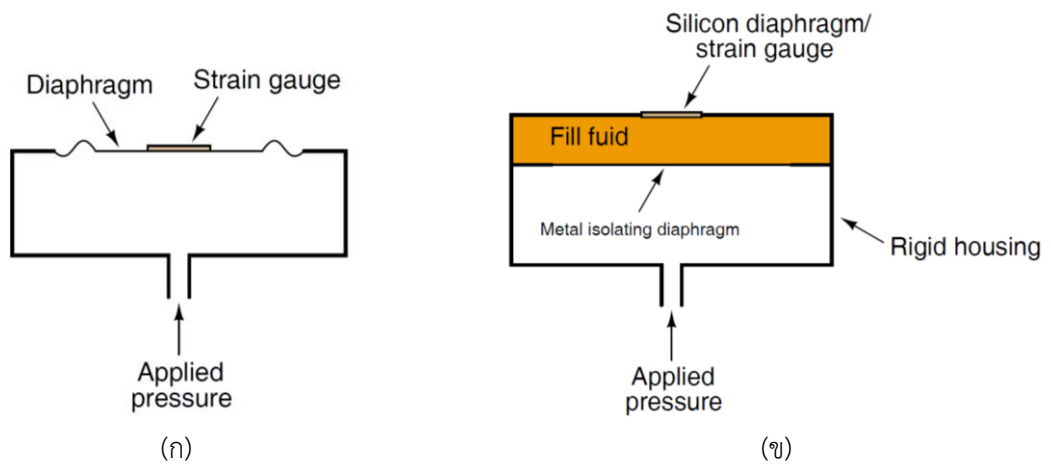
รูปที่ 3-14 เครื่องวัดความดันอิเล็กทรอนิกส์ชนิด resonant wire type differential pressure sensor (Foxbora Invensys)

เครื่องวัดความดันอิเล็กทรอนิกส์ชนิด **Piezoelectric Type** ในส่วน Pressure Transducer ชนิดนี้จึงเป็นรูปแบบความก้าวหน้าหนึ่งของตัวตรวจจับความดัน (pressure sensor element) โดยตัวตรวจจับความดันจะเปลี่ยนแปลงค่าความดันไปเป็นค่าทางด้านปริมาณทางไฟฟ้าเพื่อสามารถนำไปประมวลผลการวัดด้วย Strain gauge โดยภายในตัว Pressure Transducer ประกอบด้วยตัวเรือนและตัวตรวจจับความดันซึ่งประกอบด้วย Strain gauge ติดตั้งบนไดอะแฟรม (diaphragm) ที่มีจุดเชื่อมต่อกับความดันที่ต้องการวัด ดังในรูปที่ 3-16 (ก) จะใช้ silicon strain gauge elements ติดตั้งบนไดอะแฟรมเพื่อตรวจวัดความดันที่กระทำต่อไดอะแฟรมโดยตรง ในส่วนรูปที่ 3-16 (ข) เป็นการออกแบบอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งจะใช้ silicon wafer จำนวน 1 ตัวทำหน้าที่ทั้งเป็นไดอะแฟรมและ Strain gauge ภายในตัวเดียวกันซึ่งส่งผลให้สามารถนำข้อดีของคุณสมบัติทางกลของซิลิคอน นั่นคือ คุณสมบัติเชิงเส้นดีมาก (high linearity) ในการให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่กระทำต่อการยืดหดตัวของซิลิคอนและการยืดหยุ่นต่อการแตกหัก (low fatigue) อย่างไรก็ตาม ซิลิคอนเองไม่สามารถใช้งานได้กับการวัดความดันของสารของเหลวหรือไอได้โดยตรงเนื่องจากขีดความสามารถการไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารที่ต้องการวัดดีไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้ความดันของสารหรือระบบที่ต้องการวัดอัดแรงดันผ่านสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับซิลิคอน (non-reactive filled fluid) ได้แก่ ของเหลวจำพวก silicone-based or fluorocarbon-based liquid ไปยัง silicon strain gauge elements อีกทอดหนึ่ง

Piezoresistive หมายถึง ความต้านทานที่ไวต่อความดัน (pressure-sensitive resistance)



รูปที่ 3-15 ใช้ stain gauge ในวงจร Wheatstone bridge



รูปที่ 3-16 ติดตั้ง stain gauge บนไดอะแฟรม

โดยทั่วไปแล้วแรงดันไฟฟ้าด้านทางออกของ Pressure Transducer จะมีค่าอยู่ระหว่าง 10 mV จนถึง 100 mV ขึ้นอยู่กับชนิดตัวตรวจจับความดัน (pressure sensor element) ซึ่งแรงดันไฟฟ้างกล่าวมาไม่ใช่สัญญาณมาตรฐาน ในการผลิต Piezoresistive pressure transducers จะมีขั้นตอนผลิตที่ยุ่งยากและซับซ้อนดังรูปที่ 3-17 และมีหลากหลายรูปแบบดังรูปที่ 3-18 และ รูปที่ 3-19

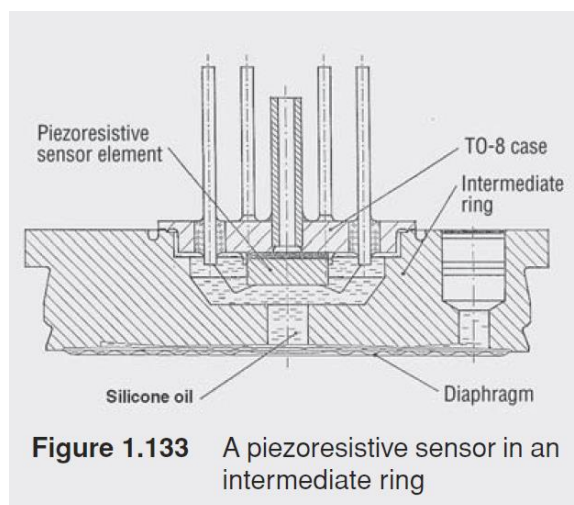
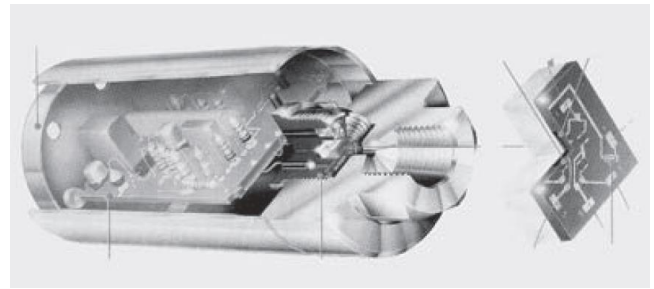
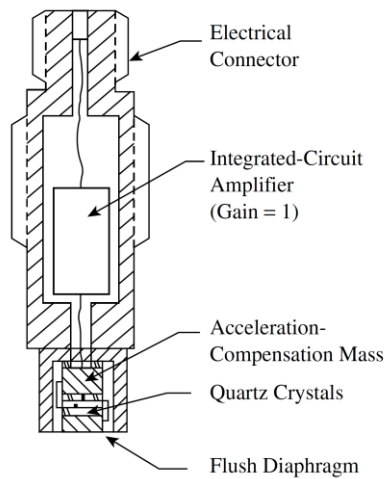
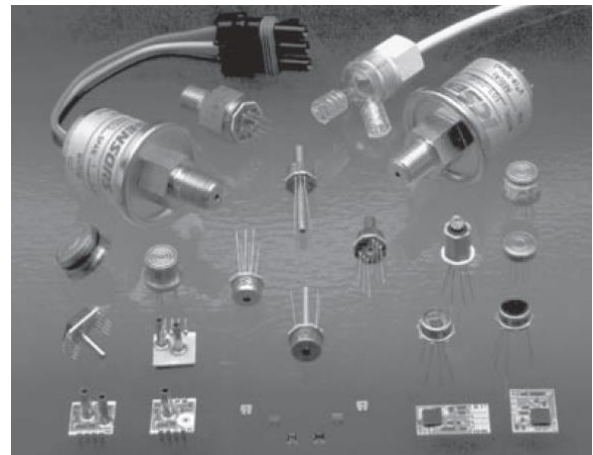
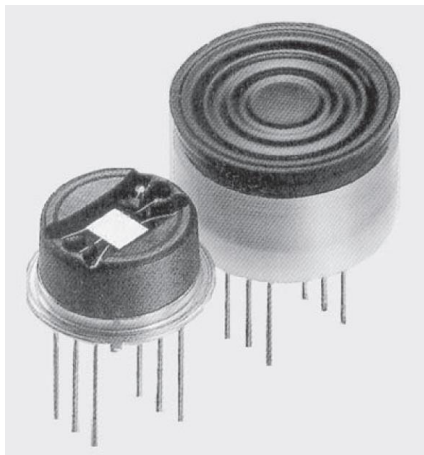


Figure 1.133 A piezoresistive sensor in an intermediate ring

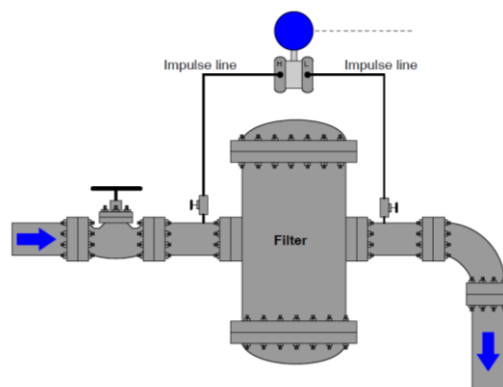
รูปที่ 3-17 Piezoresistive sensor ในตัวเรือน Pressure Transducer



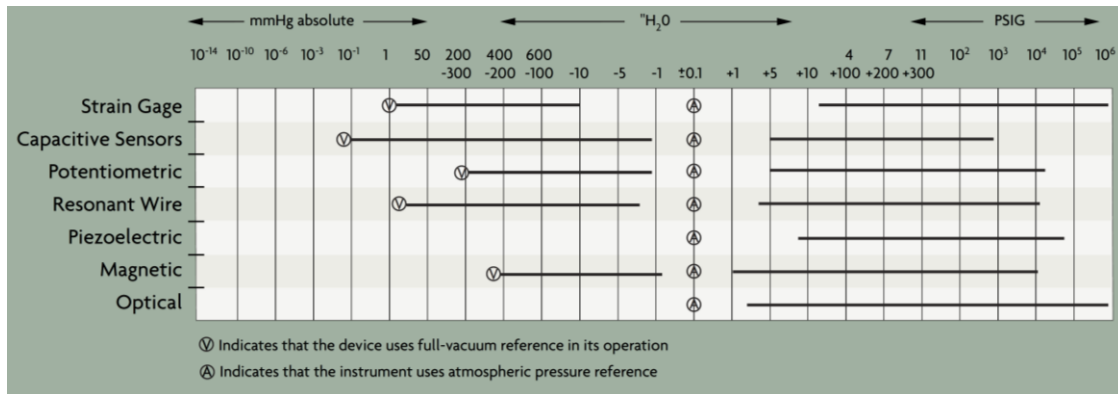
รูปที่ 3-18 เครื่องวัดความดันอิเล็กทรอนิกส์ชนิด Piezoelectric type pressure sensor (PCB Piezotronics Inc)



รูปที่ 3-19 เครื่องวัดความดันอิเล็กทรอนิกส์ชนิด Piezoelectric pressure sensor หรือ Piezoresistive sensor ประกอบด้วย a plastic diaphragm (ซ้ายมือ) และ Piezoresistive pressure transducers ในรูปแบบต่างๆ (ขวามือ)



รูปที่ 3-20 เครื่องวัดความดันที่ใช้ silicon strain gauge ใช้วัดผลต่างความดันระหว่าง 2 จุด (Foxboro model IDP10; Differential Pressure Transmitter)



รูปที่ 3-21 ช่วงการวัดได้ของเครื่องวัดความดันอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ

มาตรฐาน ASME B40.1 Pressure Gauge

เครื่องวัดความดันที่เป็นไปตามมาตรฐาน ASME B40.1 ได้จัดชั้นความเที่ยงไว้ 8 grades ดังในตารางที่ 3-4 โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่มหลักคือ

- ASME Grades 2A, 3A & 4A เหมาะสำหรับการวัดที่ต้องการความละเอียดสูงในห้องปฏิบัติการหรือ workshop ซึ่งเป็นเกรดที่เราควรเลือกใช้สำหรับงานสอบเทียบ
- ASME Grades A & 1A เหมาะสำหรับการวัดความดันในภาคอุตสาหกรรมของเครื่องมืออุปกรณ์ จนกระทั่งระบบท่อทางต่างๆ
- ASME Grades B, C & D เหมาะสำหรับการวัดความดันด้วยวัตถุประสงค์ตรวจติดตาม (monitor) ความดันในการใช้งานซึ่งไม่ต้องการความแม่นยำ

Table 1 Accuracy Grades

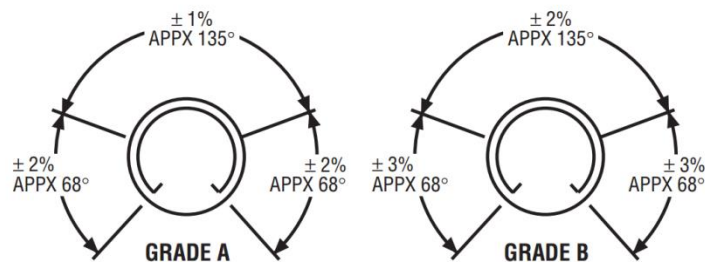
Accuracy Grade	Permissible Error (± Percent of Span) (Excluding Friction)			Maximum Friction (Percent of Span)	Minimum Recommended Gauge Size (270 deg Dial Arc)
	Lower ¼ of Scale	Middle ½ of Scale	Upper ¼ of Scale		
4A	←	0.1	→	[Note (1)]	8½
3A	←	0.25	→	0.25	4½
2A	←	0.5	→	0.5	2½
1A	←	1.0	→	1.0	1½
A	2.0	1.0	2.0	1.0	1½
B	3.0	2.0	3.0	2.0	1½
C	4.0	3.0	4.0	3.0	1½
D	5.0	5.0	5.0	3.0	1½

GENERAL NOTE: Light tapping of the gauge case is permissible at each pressure reading.

NOTE:

(1) Grade 4A gauges must remain within specified tolerance before and after being lightly tapped.

ตารางที่ 3-4 ชั้นความเที่ยง (Accuracy Grade) และช่วงผลผิด (Error Limits) ตาม ASME B40.100-2005



รูปที่ 3-22 ตัวอย่างความหมาย Lower ¼ , Lower ½, และ Upper ¼ of scale ของ Grade A และ B

ตัวอย่างเช่น เครื่องวัดความดัน แบบ Bourdon Tube Pressure Gauge ออกแบบตามมาตรฐาน ASME B40.100-2005, Model 332.34, WIKA มี Accuracy

- $\pm 0.25\%$ of span (ASME B40.100 Grade 3A) for pressure range ≤ 600 psi (40 bar)
- $\pm 0.5\%$ of span (ASME B40.100 Grade 2A) for pressure range > 600 psi (40 bar) and $< 2,000$ psi (160 bar)
- $\pm 0.25\%$ of span (ASME B40.100 Grade 3A) for pressure range $\geq 2,000$ psi (160 bar)



รูปที่ 3-23 Bourdon Tube Pressure Gauge Solid-front Test Gauge, Type Model 332.34, (WIKAI)

TABLE 5.1a
Orientation Table for Pressure Detectors

Features		Applicable Pressure Ranges																											
		mmHg absolute (1 mmHg = 133 Pa)										"H ₂ O (1" H ₂ O = 250 Pa)								PSIG (1 PSIG = 6.9 kPa)									
		10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁶	10 ⁻³	10 ⁻¹	1	50	200	400	600	-300	-200	-100	-10	-5	-1	±0.1	+1	+5	+10	+100	+200	+300	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	
Type of Design																													
Bellows	Abs. Press. Motion Balance	✓						⊗										⊗											
	Abs. Press. Force Balance	✓						⊗										⊗											
	Atm. Press. Ref. Motion Bal.	✓																⊗											
	Atm. Press. Ref. Force Bal.	✓																⊗											
	Aneroid Manostats	✓																	⊗										
Bourdon	C-Bourdon	✓																⊗											
	Spiral Bourdon	✓																⊗											
	Helical Bourdon	✓																⊗											
	Quartz Helix	✓																⊗											
Diaphragm	Abs. Press. Motion Balance	✓																⊗											
	Abs. Press. Force Balance	✓																⊗											
	Atm. Press. Ref. Motion Bal.	✓																⊗											
	Atm. Press. Ref. Force Bal.	✓																⊗											
Electronic	Strain Gauge	✓																⊗											
	Capacitive Sensors	✓																⊗											
	Potentiometric	✓																⊗											
	Resonant Wire	✓																⊗											
	Piezoelectric	✓																⊗											
	Magnetic	✓																⊗											
	Optical	✓																⊗											
High-Press. Sensors	Dead Weight Piston Gauge	✓																⊗											
	Bulk Modulus Cell	✓																⊗											
	Manganin Cell	✓																⊗											
Manometers	Inverted Bell	✓																⊗											
	Ring Balance	✓																⊗											
	Float Manometer	✓																⊗											
	Barometers	✓																⊗											
	Visual Manometers	✓																⊗											
	Micromanometers	✓																⊗											
Pressure Repeaters,	D/P Cell	✓																⊗											
	Sd. Diaphragm	✓																⊗											
	Button Diaphragm	✓																⊗											
Ioniza-	Hot Cathode	✓																⊗											
	Cold Cathode	✓																⊗											

บทที่ 4

ตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณ (Correction Factors)

เนื่องจากที่ผ่านมาเราจะพบว่ามีปัญหาในการคำนวณค่าการวัดปริมาตรของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมเป็นอย่างมาก ผ่านมา 20 กว่าปีก็ยังเหมือนเดิม ทั้งนี้ก็อาจจะมีเหตุผลด้วยกันหลายสาเหตุ อาทิเช่น ความรู้และความเข้าใจกันของแต่ละหน่วยงาน, บริษัท และผู้ที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับงานด้านการวัดปริมาตรของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว คนเก่าออกไปคนใหม่เข้ามา การใช้ภาษาและความหมายสัญลักษณ์การคำนวณผลการวัดหรือปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำการวัดที่แตกต่างกัน หรือแม้แต่ค่าทศนิยมหลังจากการคำนวณควรเป็นกี่ตำแหน่งก็ยังเป็นปัญหาและมักจะมีการถกเถียงไม่แน่ชัดเท่าที่ควร หรือผลของการคำนวณด้วยเครื่องคิดเลขแบบพกพาต่างกับผลคำนวณด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ หรือการนำค่าอุณหภูมิและความดันจากตำแหน่งใดของแบบมาตราในการสอบเทียบเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณค่าการวัดปริมาตร หรือการเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ในการคำนวณไม่ถูกต้อง หรือการใช้เครื่องวัดอุณหภูมิต้องละเอียดเท่าไรและต้องใช้ตัวเลขค่าแก้ไขในใบรายงานผลสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิหรืออ่านตัวเลขอุณหภูมิเท่าใดก็ใช้นั้นไปเลยในการคำนวณ (แล้วทำไมต้องสอบเทียบล่ะ) หรืออื่นๆ อีกมากมายของปัญหา สถาบัน API (American Petroleum Institute) กำหนดหลักการเพื่อลดปัญหาและสร้างความเข้าใจไปในทิศทางเดียวกัน ดังใน API Manual of Petroleum Measurement Standards; Chapter 12 Calculation of Petroleum Quantities หนังสือเล่มนี้ก็พยายามทำในสิ่งเดียวกัน

ในบทนี้จะกล่าวถึงที่มาที่ไป, การเลือกใช้, ข้อยกเว้น, ข้อควรระวังและการปฏิบัติตามของตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณ แต่ก่อนอื่นเราต้องขีดวงจำกัดให้ชัดเจนเสียก่อนว่า “ขอบเขต” ของหนังสือเล่มครอบคลุมถึงอะไรก็เขียนแบบเอกสารระดับโลกหน่อย ถือว่าเป็น “scope” ก็แล้วกัน

ภายใต้ขอบเขตการคำนวณค่าการวัดปริมาตรของเหลวในเล่มนี้ ของเหลวต้องมีคุณสมบัติดังนี้

1. ของเหลวที่ทำการวัดต้องอยู่ในสถานะของเหลวอย่างเดียว (single - phase liquid) เท่านั้น ยังรวมทั้งเป็นของเหลวที่สะอาดไม่มีตะกอน แต่ไม่ครอบคลุมและไม่สามารถใช้กับการวัดของไหลที่มีสถานะเป็น 2 สถานะ (two-phase fluids) เช่น ของเหลวกับไอ หรือของเหลวกับตะกอน เป็นต้น (หวังว่าในอนาคตเราจะขยายงานไปยังการวัด 2 เฟสได้)

2. ของเหลวต้องเป็นของเหลวที่มีเนื้อเดียวสม่ำเสมอ (Homogeneous Liquid) อธิบายง่ายๆ เช่นว่า ไมใช่ของเหลวกั้นภาชนะมีความหนืดมากกว่าของเหลวที่อยู่ด้านบนภาชนะอะไรทำนองนี้

3. เป็นของเหลวชนิด Newtonian (Newtonian Liquid) โดยเฉพาะสำหรับกับของเหลวไฮโดรคาร์บอน (Liquid hydrocarbons) ที่มีความหนาแน่นจำเพาะมากกว่า 0.500 และน้อยกว่า 1.000 ในการสอบเทียบปริมาณการไหลผ่านมาตรวัด (meter), ท่อทดสอบความจุ (pipe prover), ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (compact prover) และถังตวงแบบมาตรา (tank prover) เป็นต้น

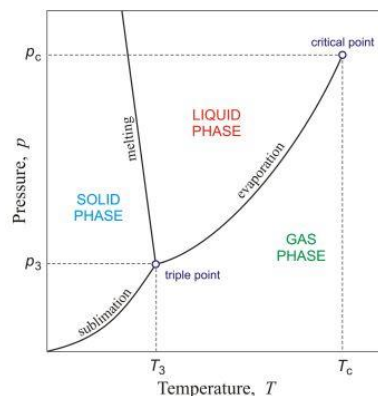
หากของเหลวมีคุณสมบัติแตกต่างไปจาก 3 ข้อนี้แล้ว ถือว่าไม่อยู่ในขอบข่ายของหนังสือเล่มนี้ครับ

Petroleum Liquid	Relative Densities	API Gravity Range
Crude oil	1.000 – 0.780	10 - 50
Fuel Oils, Jet Fuel	0.875 – 0.780	30 - 50
Gasoline	0.780 – 0.685	50 – 75
Natural Gas Liquids	0.680 – 0.500	75 – 100
Butanes - Propane	0.695 – 0.505	75 – 115

ตารางที่ 4 -1 ช่วงความหนาแน่นโดยทั่วไปของของเหลวผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

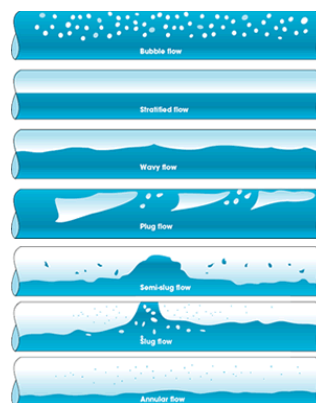
ของเหลวที่ทำการวัดต้องอยู่ในสถานะของเหลวอย่างเดียว (Single - Phase Liquid)

โดยปกติแล้วสิ่งของสารจะอยู่ใน 3 สถานะหลักคือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งมีจุดตัดกันของทั้ง 3 สถานะที่เรียกว่า Triple point ดังรูปที่ 4-1 ในการคำนวณผลการสอบเทียบทางด้านปริมาตรในเล่มนี้จึงพูดถึงเฉพาะภายใต้เงื่อนไขสถานะของเหลว และเป็นของเหลวสถานะเดียวล้วนๆ ไม่มีการปนกันระหว่างของเหลวกับก๊าซ หรือของเหลวผสมกับของแข็ง อย่างเด็ดขาด



รูปที่ 4-1 สถานะของสารที่ความสัมพันธ์ความดันและอุณหภูมิ

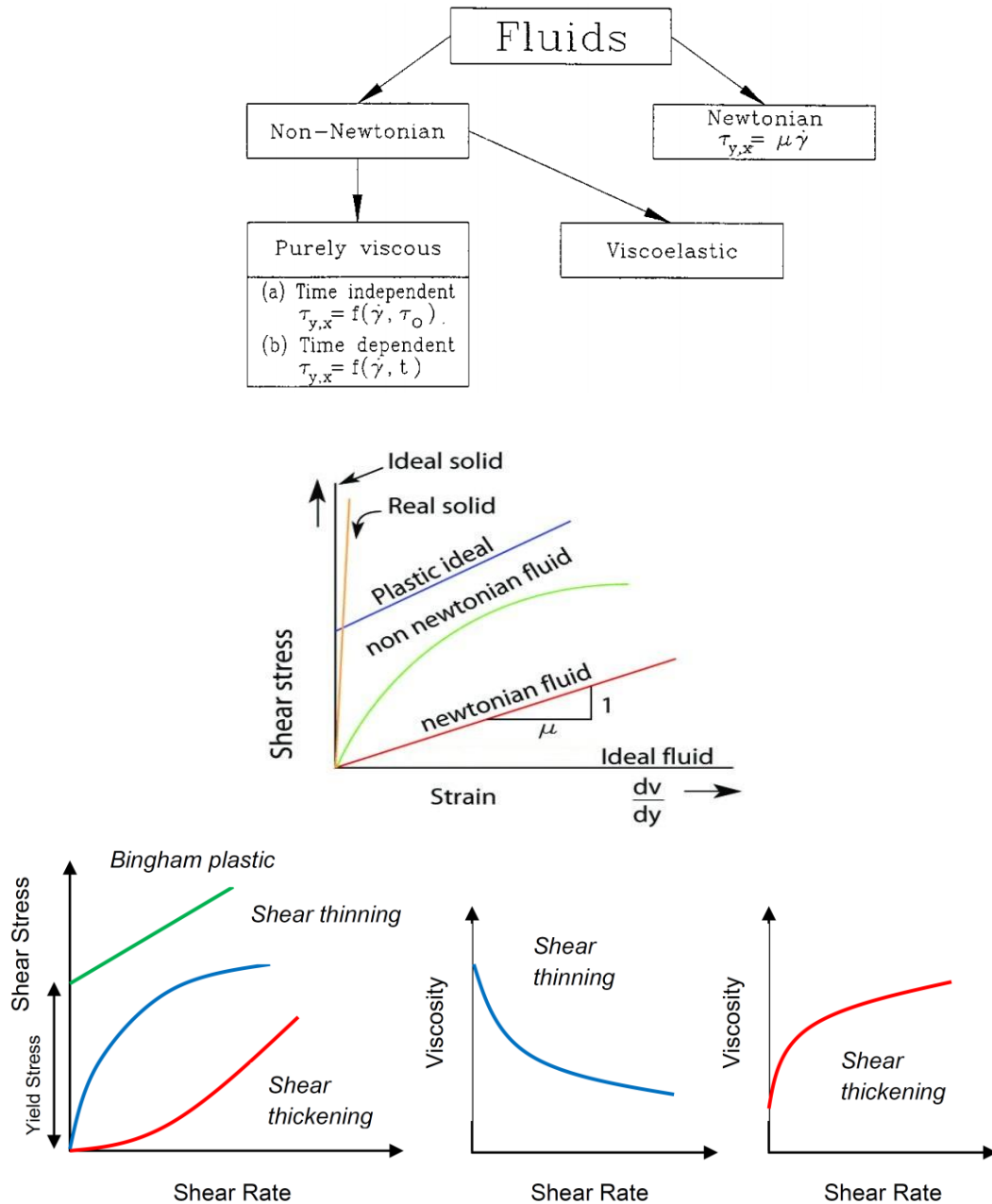
ในกรณีของเหลวที่ไหลภายในท่อก็ต้องเป็นของเหลวเต็มปริมาตรภายในท่อ หากของเหลวภายในท่อไม่มีการไหลที่ไม่สมบูรณ์ เช่น มีฟองอากาศ หรือของเหลวไหลไม่เต็มท่อดังรูปที่ 4-2 จะทำให้ผลการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองจะผิดพลาดคลาดเคลื่อนมากน้อยแตกต่างกันไป ด้วยเหตุนี้การกำหนดให้มีอุปกรณ์เช่น เครื่องกำจัดไอ (Gas Eliminator) ในระบบท่อสำหรับมาตรวัดของเหลวจึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง



รูปที่ 4-2 รูปแบบการไหลภายในท่อที่ไม่เป็น single - phase liquid

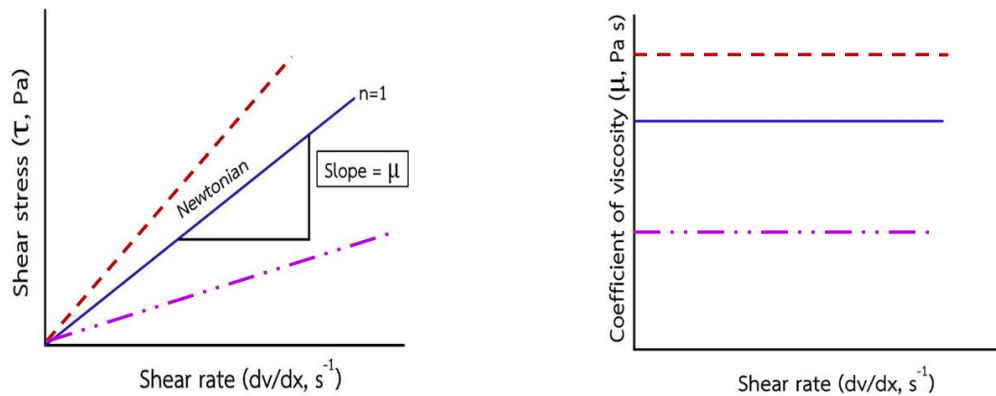
ของเหลวชนิด Newtonian (Newtonian Liquid)

ของไหลแบบนิวตันเนียน (Newtonian Fluid) หมายถึง ของไหลที่มีคุณสมบัติเมื่อทดสอบแล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (Shear Stress) กับอัตราเฉือน (Shear Rate หรือ Strain) เป็นเส้นตรง และเส้นกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวเริ่มต้นหรือผ่านจุดกำเนิด (0,0) ซึ่งเป็นไปตามหลักของนิวตัน (Sir Isaac Newton)



รูปที่ 4-3 คุณสมบัติของเหลวชนิด Newtonian Liquid กับ Non Newtonian Liquid

ทั้งนี้พบว่าค่าความชันของเส้นกราฟ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด (Coefficient of Viscosity) หรือเรียกสั้นๆ ว่า “ความหนืด (Viscosity)” หรือ “ความหนืดสมบูรณ์ (Dynamic Viscosity; μ)” ซึ่งค่าความหนืดของไหลประเภทนิวตันเนียนจะมีค่าคงที่ (ที่อุณหภูมิคงที่) ไม่ขึ้นกับอัตราเฉือนของไหล



รูปที่ 4-4 คุณสมบัติความหนืดสมบูรณ (Dynamic Viscosity; μ) ของเหลวชนิด Newtonian Liquid

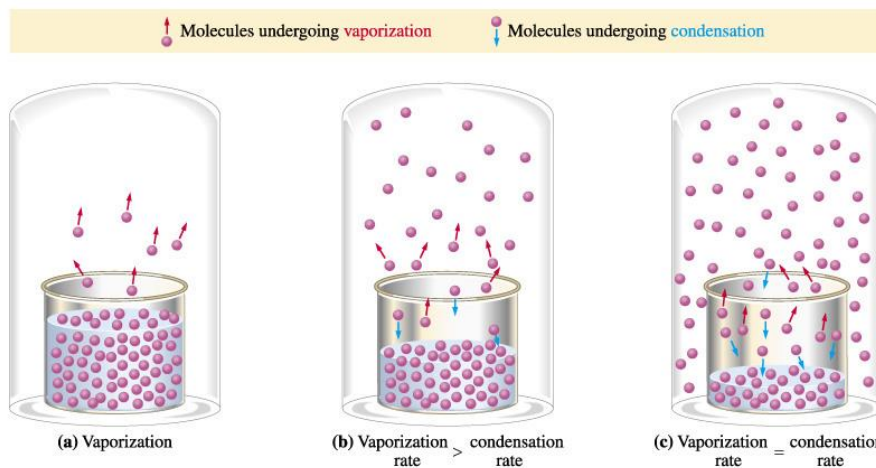
เมื่ออ่านถึงตรงนี้บางคนอาจสงสัยว่าตกลงเราพูดถึง “ของไหล” หรือ “ของเหลว” กันแน่ก็ขอล่าวไว้สักระยะหนึ่งว่าคำว่าของไหล (Fluid) อาจเป็นของเหลว (liquid) หรือก๊าซ (gas) หรือสารแขวนลอย หรือ ฯลฯ ก็ได้ขอให้ไหลได้ตั้งนั้นของไหลจึงเป็นคำที่มีความหมายกว้างขวางกว่าที่เท่านั้นเองครับ ไม่ใช่เป็นการเล่นสำนวนโวหารแต่อย่างใด หรืออย่างเช่นคำว่า “ปริมาณ” ก็จะครอบคลุมถึง ปริมาตร, ความยาว หรือน้ำหนัก ซึ่งจะใช้กับงานสินค้าหีบห่อเช่นกันครับ เช่น “ปริมาณสุทธิ” อาจเป็นปริมาตรสุทธิ, ความยาวสุทธิ, หรือน้ำหนักสุทธิ เป็นต้น

สภาวะอ้างอิง (Reference Condition) หรือ สภาวะมาตรฐาน (Standard Condition)

หากศึกษาอ่านเอกสารหลายชุดจากหลากหลายสำนัก จะพบกับความสับสนในของการใช้คำและคำนิยามของคำที่ใช้เหล่านั้น หนึ่งในคำที่เราเจอคือคำว่า “สภาวะอ้างอิง (Reference Condition)” หรือ “สภาวะมาตรฐาน (Standard Condition)” หรือ “สภาวะพื้นฐาน (Base Condition)” เอาเป็นว่าในหนังสือเล่มนี้เราจะตีกรอบไว้ก่อนแล้วกันคือ สภาวะอ้างอิง หรือสภาวะมาตรฐาน หรือสภาวะพื้นฐาน เป็นสภาวะที่มีองค์ประกอบการระบุอุณหภูมิและความดัน เท่านั้นคือ

1. ความดันอ้างอิง (Reference Pressure) การกำหนดความดันอ้างอิงของแต่ละชนิดของเหลวมีการกำหนดที่แตกต่างกันไป ได้แก่

- 1.1. น้ำมันดิบ และผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมสำเร็จรูป และน้ำ ความดันไอของของเหลวมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิอ้างอิง กำหนดให้ ความดันอ้างอิงมีค่าเท่ากับ ความดันบรรยากาศ 101.325 kPa_a หรือ 14.696 psia (0.0 psig)
- 1.2. ของเหลวไฮโดรคาร์บอน (Liquid Hydrocarbon) ของเหลวที่มีอนุพันธ์ของ คาร์บอน – ไฮโดรเจน (C-H) เช่น น้ำมันดิบ และผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ เป็นต้น มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity; SG) มากกว่า 0.50 จนถึงน้อยกว่า 1.00 ความดันไอของของเหลวที่มีค่าสูงกว่าความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิอ้างอิง ดังนั้นจึงกำหนดให้ความดันอ้างอิงมีค่าเท่ากับ ความดันไอสมดุล (the Equilibrium Vapor Pressure) ที่อุณหภูมิอ้างอิง โดยความหมายของความดันไอสมดุลก็คือ สภาวะที่อัตราการระเหยของเหลวกลายเป็นไอมีค่าเท่ากับอัตราการควบแน่นของไอลงมาเป็นของเหลวนั่นเอง ดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 อัตราการระเหยของเหลวกลายเป็นไอมีค่าเท่ากับอัตราการควบแน่นของไอกลับมาเป็นของเหลว

2. อุณหภูมิอ้างอิง (Reference Temperature) ในเอกสารมาตรฐานของต่างประเทศซึ่งอยู่ในพื้นที่เขตนาวจะกำหนดอุณหภูมิอ้างอิงไว้ที่ 15 °C (60 °F) ส่วนประเทศเขตร้อนเช่นประเทศไทยในทางปฏิบัติที่ผ่านมาเรากำหนดกันไว้ที่ 30 °C ซึ่งถือเป็นค่าตัวเลขกลมๆ ของอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปีของประเทศไทยนั่นเอง

ทำไมต้องมีการกำหนดสถานะอ้างอิงกัน แล้วมันมีประโยชน์อย่างไร เป็นคำถามที่ต้องเกิดขึ้นมาในใจของผู้ที่ทำงานด้านนี้เป็นครั้งแรกเสมอ คำตอบที่พอจะให้ได้ดีเพราะว่า การกำหนดปริมาตรที่เป็นลิตรของน้ำมันเชื้อเพลิง (ตามพระราชบัญญัติการค้าน้ำมันเชื้อเพลิง พ.ศ.2543)

“น้ำมันเชื้อเพลิง” หมายความว่า

(1) ก๊าซธรรมชาติ, ก๊าซปิโตรเลียมเหลว, น้ำมันดิบ, น้ำมันเบนซิน, น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน, น้ำมันก๊าด, น้ำมันดีเซล, น้ำมันเตา และน้ำมันหล่อลื่น

(2) สิ่งอื่นที่ใช้หรืออาจใช้เป็นวัตถุดิบในการกลั่นหรือผลิตเพื่อให้ได้มา ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ใช้หรืออาจใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือเป็นสิ่งหล่อลื่น หรือสิ่งอื่นที่ใช้หรืออาจใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือเป็นสิ่งหล่อลื่น ทั้งนี้ตามที่รัฐมนตรีประกาศกำหนดในราชกิจจานุเบกษา

นั่นพบว่าปริมาตรน้ำมันเชื้อเพลิงจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะแวดล้อมอุณหภูมิและความดัน โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลกระทบที่รุนแรงกว่าการเปลี่ยนแปลงความดัน ด้วยเหตุนี้หากทำการซื้อขายกันที่สภาวะแตกต่างกันย่อมเกิดความได้เปรียบและเสียเปรียบกัน ทางผู้ประกอบการธุรกิจในซีกโลกตะวันตกก็จึงกำหนดสถานะอ้างอิงเพื่อให้เกิดความยุติธรรมในการซื้อขายกันโดยกำหนด

International System (SI) Units

Pressure : 14.696 psia (101.325 kPaa)

Temperature : 59.0 °F (15.00 °C)

United States Customary (API MPMS Chapter 12 - Section 2, 1995)

Pressure : 14.696 psia (101.325 kPaa)

Temperature : 60.0 °F (15.56 °C)

Kingdom of Thailand

Pressure : 14.696 psia (101.325 kPaa)

Temperature : 30 °C

ด้วยเหตุนี้สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิง เฉพาะน้ำมันสำเร็จรูป เราให้ “สภาวะอ้างอิง (Reference Condition)” หรือ “สภาวะมาตรฐาน (Standard Condition)” หรือ “สภาวะพื้นฐาน (Base Condition)” คือ สภาวะที่ 30°C และความดันบรรยากาศ (equilibrium pressure) (0.0 psig) แต่ในกรณีก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) นั้นกำหนดไว้ ที่ 15°C และความดันไอสมดุล อาจเป็นเพราะการซื้อขาย LPG คิดอยู่บนหน่วยน้ำหนักเมตริกตันกระมัง

ตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณ (Correction Factors)

ตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณ (Correction Factors) ซึ่งจะมีบทบาทอย่างมากในการคำนวณหาค่าปริมาณของการวัดมีอยู่ด้วยกัน 6 ตัวแปร ซึ่งตัวแปรทั้งหมดนี้จัดเป็น “ตัวแปรคูณ (Multipliers)”

ตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณตัวแรกคือ Meter Factor (MF) ส่วนที่เหลืออีก 5 ตัวคือ C_{tw} (CTW), C_u (CTL), C_{ts} (CTS), C_{ps} (CPS) และ C_{pl} (CPL) จะถูกใช้ในการคำนวณหาค่าปริมาณของเหลวอันเนื่องมาจากได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิและความดันขณะทำการวัดปริมาตรดังกล่าว ซึ่งอุณหภูมิและความดันดังกล่าวก่อให้เกิดผลกระทบต่อนั่งถังแบบมาตรา, meter, pipe prover หรือ compact prover เป็นต้น อีกทั้งมีผลกระทบต่องานที่ทำการวัดปริมาตรอยู่ขณะนั้น ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเหลวภายในถังแบบมาตรา, meter, pipe prover หรือ compact prover ดังกล่าว เราแบ่งบทบาทตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณ 5 ตัวที่เหลือเป็น 2 กลุ่มใหญ่ในการทำหน้าที่แก้ไขปรับค่าปริมาณ คือ

1. **Liquid Density Correction Factors** การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น (ปริมาตร) ของของเหลว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของของเหลว ซึ่งได้แก่ C_u (CTL), C_{pl} (CPL) และ C_{tw} (CTW)
2. **Prover and Field Measure Steel Correction Factors** การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของแบบมาตราและเครื่องชั่งตวงวัดที่ต้องการสอบเทียบเมื่ออุณหภูมิและความดันของแบบมาตราและเครื่องชั่งตวงวัดที่ต้องการสอบเทียบมีอุณหภูมิและความดันสอบเทียบต่างจากอุณหภูมิและความดันอ้างอิง ได้แก่ C_{ts} (CTS), C_{ps} (CPS) และ C_{tw} (CTW)

สังเกตว่า C_{tw} (CTW) ตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณเดียวทำหน้าที่ครอบคลุมการแก้ไขปรับค่าปริมาณพร้อมกันทั้ง 2 ปัจจัยเลยทีเดียว ซึ่งเราจะพูดถึงลงในรายละเอียดในแต่ละหัวข้อถัดไปจากนี้

1. มิเตอร์แฟคเตอร์ (Meter Factor; MF)

มิเตอร์แฟคเตอร์เป็นตัวแปรที่ไม่มีหน่วย (non-dimensional valve หรือ Dimensionless valve) ถูกใช้เพื่อทำการแก้ไขปรับค่าปริมาตรซึ่งแสดงโดยมาตรวัดไปเป็นค่าปริมาตรที่แท้จริง (true volume)

การวัดปริมาณในการซื้อขายหรือขนถ่ายผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมซึ่งกระทำกันภายใต้สภาวะเงื่อนไขการวัดที่คงที่สภาวะหนึ่งโดยทำการปรับแต่งให้มาตรวัดให้สามารถวัดปริมาณการส่งจ่ายและการซื้อขายให้ถูกต้องแม่นยำสามารถกระทำได้ง่าย แต่ในทางปฏิบัติมักจะพบว่ามาตรวัดตัวหนึ่งซึ่งติดตั้งอยู่จำเป็นต้องถูกใช้กับการวัดปริมาณการส่งจ่ายหรือซื้อขายกันที่สภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น การเปลี่ยนอัตราการไหลของเหลวผ่านมาตรวัด, การเปลี่ยนชนิดผลิตภัณฑ์ซึ่งแต่ละผลิตภัณฑ์มีความหนืดและคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน เป็นต้น ดังนั้นจึงเป็นเรื่องยากที่จะทำการปรับแต่งมาตรวัดเพื่อให้อ่านค่าได้ถูกต้องตรงกับปริมาณที่ส่งจ่ายจริงทุก

ครั้งที่กระทำการจ่ายเพื่อให้สอดคล้องกับปัจจัยต่างๆ ที่เปลี่ยนไป การแก้ปัญหาในทางปฏิบัติจึงแก้ปัญหาด้วยการสอบเทียบหรือตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดและจัดให้มาตรวัดมีค่า “มิเตอร์แฟคเตอร์” ค่าหนึ่งภายในช่วงแคบๆ ภายใต้สภาวะการทำงานเงื่อนไขช่วงหนึ่งซึ่งอาจจะใช้กลไกการทดเชิงกลหรือการปรับแต่งค่าด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการปรับแต่งหลังจากการสอบเทียบหรือตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ออกแบบมาตรวัดชนิดนั้นๆ ด้วยเหตุนี้เราจึงจำเป็นต้องทำการซีลตัวปรับแต่งมาตรวัดเพื่อป้องกันการปรับแต่งใดๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นโดยไม่ได้รับอนุญาต

วัตถุประสงค์หลักที่เราต้องการหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดก็คือ ต้องการความแน่ใจว่าการส่งจ่ายผลิตภัณฑ์แต่ละครั้งมีความแม่นยำมากเพียงพอภายในช่วงสภาวะการทำงานแคบๆ โดยไม่คำนึงถึงว่าสภาวะการวัดของมาตรวัดจะเปลี่ยนแปลง เช่น ความหนาแน่น, ความหนืด, อัตราการไหล, อุณหภูมิ, ความดันและความสามารถหล่อลื่นได้ของเหลว (lubricating properties) เป็นต้น ถึงแม้ในการสอบเทียบมาตรวัดจะกระทำภายใต้สภาวะที่กำหนดจำเพาะก็ตาม หากสภาวะการทำงานของมาตรวัดจำเพาะหนึ่งๆ เกิดเปลี่ยนแปลงไป เช่น อัตราการไหลเปลี่ยนแปลงมากเกินไป, ความหนืดของเหลวที่วัดอยู่เปลี่ยนไปมาก เป็นต้น เราต้องดำเนินการสอบเทียบหรือตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดใหม่เพื่อหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ใหม่ จึงเป็นหลักการในทางปฏิบัติของการสอบเทียบหรือตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดนั่นคือ ให้ทำการสอบเทียบมาตรวัดภายใต้สภาวะการทดสอบหรือตรวจสอบให้คำรับรองใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานจริงของมาตรวัดให้มากที่สุดเพื่อได้ค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดให้ผลการวัดมีความแม่นยำมากที่สุดนั่นเอง ภาษาประกิตก็คือ “Trailer Made” (ตัดเสื้อให้พอดีตัวกับคนใส่ นั่นๆ)

ถามต่อไปว่า “สภาวะการทำงานจริงของมาตรวัด” ครอบคลุมในแง่ใดบ้าง ครอบคลุมในแง่ชนิดของเหลวที่ทำการวัดต้องเป็นชนิดเดียวกับของเหลวที่ใช้สอบเทียบ, ช่วงอัตราการไหลหรือค่าอัตราการไหลคงที่ที่ต้องการวัดก็ต้องเป็นช่วงหรือค่าอัตราการไหลเดียวกับที่ใช้สอบเทียบ, ช่วงความดันที่ต้องการวัดจริงก็ต้องเป็นค่าความดันเดียวกับที่ใช้สอบเทียบ รวมทั้งช่วงอุณหภูมิที่วัดจริงก็ต้องเป็นค่าช่วงอุณหภูมิเดียวกับที่ใช้สอบเทียบนั่นเอง

คำจำกัดความของมิเตอร์แฟคเตอร์จึงหมายถึง อัตราส่วนของปริมาตรจริงที่ผ่านมาตรวัดขณะทำการสอบเทียบ (proving) เทียบกับปริมาตรที่วัดได้จริงจากมาตรวัด

$$MF = \frac{V}{V_m} \quad (\text{Eq.4-1})$$

เมื่อ V = ปริมาตรจริงที่ผ่านมาตรวัด ณ.สภาวะการทำงานของมาตรวัด
 V_m = ปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัด

แต่พบว่าระหว่างทำการสอบเทียบ (proving) อุณหภูมิและความดันภายในมาตรวัดและแบบมาตรา (prover) มีผลกระทบอย่างมากต่อการคำนวณหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ ทั้งนี้เพราะการหาค่าปริมาตรจริงๆ ของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดระหว่างทำการสอบเทียบต้องหาจากปริมาตรจริงที่วัดได้ของแบบมาตราซึ่งค่อนข้างเป็นวิธีทางอ้อมและมีปัญหาเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันระหว่างของเหลวไหลผ่านมาตรวัดกับถังตวงแบบมาตรามีค่าต่างกัน ดังนั้นเพื่อให้เป็นมาตรฐานการปฏิบัติเดียวกันจึงกำหนดความหมายมิเตอร์แฟคเตอร์ใหม่

$$MF = \frac{V_{pc}}{V_{mc}} \quad (\text{Eq.4-2})$$

เมื่อ MF = มิเตอร์แฟคเตอร์มาตรฐาน (standard meter factor) หรือ (Mechanical meter factor)

V_{pc} = ปริมาตรของเหลวภายในแบบมาตราแก้ไขค่าไปยังสภาวะมาตรฐาน (30 °C หรือ 15 °C, 0.0 psig)

V_{mc} = ปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดแก้ไขค่าไปยังสภาวะมาตรฐาน (30 °C หรือ 15 °C, 0.0 psig)

เนื่องจากมิเตอร์แฟคเตอร์นี้ (MF) สามารถนำไปใช้กับมาตรวัดทำงานหรือวัดปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง (30 °C หรือ 15 °C) และความดันบรรยากาศ ซึ่งในทางปฏิบัติเหตุการณ์ดังกล่าวแทบจะเป็นไปไม่ได้ ด้วยเหตุนี้เมื่อทำการวัดปริมาตรด้วยมาตรวัดที่อุณหภูมิและความดันใดๆ จำเป็นต้องคูณปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดด้วยค่าตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{dl} และ C_{pl} เสียก่อนที่จะนำไปคูณกับค่ามิเตอร์แฟคเตอร์มาตรฐาน ดังนั้นค่าปริมาตรที่สภาวะมาตรฐานที่ไหลผ่านมาตรวัดจึงหาได้จาก

$$V_0 = V_{mr} \times MF \times (C_{dlm} \times C_{plm}) \quad (\text{Eq.4-3})$$

เมื่อ V_0 = ปริมาตรที่ไหลผ่านมาตรวัดจริงที่สภาวะมาตรฐาน (standard condition)

V_{mr} = ปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดที่สภาวะใช้งาน (operating condition)

C_{dlm} = ค่าแก้ไขค่าอุณหภูมิ โดยการปรับค่าปริมาตรที่สภาวะทำงานของมาตรวัดไปเป็นค่าปริมาตรที่สภาวะมาตรฐานอันเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิ

C_{plm} = ค่าแก้ไขค่าความดัน โดยการปรับค่าปริมาตรที่สภาวะทำงานของมาตรวัดไปเป็นค่าปริมาตรที่สภาวะมาตรฐานอันเนื่องจากอิทธิพลของความดัน

นอกจากนี้ยังมีมิเตอร์แฟคเตอร์อีกชนิดหนึ่งซึ่งเรียกว่า “*composite meter factor*” ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$CMF = \frac{V_{pc}}{V_{mtc}} \quad (\text{Eq.4-4})$$

เมื่อ CMF = composite meter factor

V_{pc} = ปริมาตรของเหลวภายในแบบมาตราแก้ไขค่าไปยังสภาวะมาตรฐาน (30 °C หรือ 15 °C, 0.0 psig)

V_{mtc} = ปริมาตรอ่านได้จากมาตรวัดแก้ไขค่าไปยังอุณหภูมิมาตรฐานเท่านั้น (30 °C หรือ 15 °C)

ดังนั้นเมื่อความดันขณะทำการสอบเทียบและความดันใช้งานของมาตรวัดมีค่าใกล้เคียงกันเราสามารถนำค่า composite meter factor ไปคูณกับปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดได้โดยตรง เพื่อหาปริมาตรที่ไหลผ่านมาตรวัดจริงที่สภาวะมาตรฐาน

$$V_0 = V_{mr} \times CMF \times C_{dlm} \quad (\text{Eq.4-5})$$

เมื่อ V_0 = ปริมาตรที่ไหลผ่านมาตรวัดจริงที่สภาวะมาตรฐาน (standard condition)
 V_{mr} = ปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดที่สภาวะใช้งาน (operating condition)

จากสมการดังกล่าวข้างบนจึงสรุปได้ว่า

$$CMF = MF \times C_{plm} \quad (\text{Eq.4-6})$$

มาตรวัดชนิดที่มีตัวชดเชยอุณหภูมิ (temperature compensated meter) เมื่อต้องการรู้ค่าปริมาตรจริงที่วัดได้ดังนั้นจึงต้องคูณปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดซึ่งเป็นค่าปริมาตรที่ถูกปรับไปที่อุณหภูมิมาตรฐานแล้ว (นั่นคือปริมาตรที่อ่านได้ ณ สภาวะทำงานถูกคูณด้วย C_{dlm} แล้ว) ด้วย *composite meter factor* ไม่ใช่คูณด้วยมิเตอร์แฟคเตอร์ เมื่อ composite meter factor คือ ผลคูณของ MF กับ C_{plm} นั้นเอง เพราะฉะนั้นจึง**ควรระวังความสัมพันธ์ระหว่าง standard meter factor กับ composite meter factor**

$$V_o = V_{mrct} \times CMF \quad (\text{Eq.4-7})$$

เมื่อ V_{mrct} = ปริมาณที่อ่านได้จากมาตรวัดที่มีตัวชดเชยอุณหภูมิ

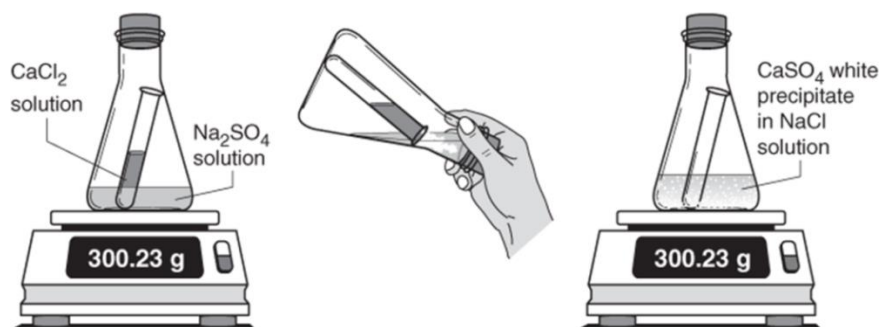
เนื่องจากเราสามารถใช้ค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ที่คำนวณจากสมการข้างบนได้เฉพาะในช่วงอุณหภูมิทำงาน (operating temperature) และความดันทำงาน (operating pressure) จำกัดค่าหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นต้องคำนึงเสมอว่าอุณหภูมิและความดันขณะทำการวัดปริมาตรด้วยมาตรวัดจริงๆ ในทางปฏิบัติต้องมีค่าไม่แตกต่างไปจากค่าอุณหภูมิและความดันขณะเมื่อทำการสอบเทียบมากจนเกินไปจนเป็นสาเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะและขนาดของโครงสร้างภายในตัวมาตรวัดหรือส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของเหลวที่ทำการวัดอยู่ นั้นหมายถึงมิเตอร์แฟคเตอร์อาจเปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างใดก็ตามเมื่อสภาวะการทำงานของมาตรวัดเปลี่ยนแปลงไปจากสภาวะเงื่อนไขการสอบเทียบก็ควรทำการสอบเทียบใหม่ทุกครั้งแม้ในทางทฤษฎีค่ามิเตอร์แฟคเตอร์จะไม่เปลี่ยนแปลงไปก็ตาม

สรุปหวัข้อมิเตอร์แฟคเตอร์ได้ว่า

- ใช้กับมาตรวัดปริมาตรของเหลวหรือมาตรวัดซื้อขาย (Flowmeter) มาตรวัดแบบมาตรา (Master Flowmeter)
- ใช้คู่กับอัตราการไหลคงที่ค่าหนึ่งต่อมิเตอร์แฟคเตอร์ค่าหนึ่งเท่านั้น
- ใช้เปรียบเทียบปริมาตรที่วัดได้ด้วยแบบมาตราเทียบกับปริมาตรวัดได้ของมาตรวัด บนพื้นฐานการคำนวณที่สภาวะอ้างอิงทั้ง 2 ค่า
- ใช้ในช่วงอุณหภูมิทำงาน (operating temperature) และความดันทำงาน (operating pressure) จำกัดค่าหนึ่งเท่านั้น
- ใช้ได้เฉพาะคุณสมบัติของเหลวชนิดหนึ่งเท่านั้น หากเปลี่ยนคุณสมบัติของเหลวมิเตอร์แฟคเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไป มากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดหลักการทำงานของมาตรวัดนั้นๆ

2. การแก้ไขค่าสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อน้ำ (Correction for the Effect of Temperature on Water); C_{tw} (CTW)

คือ ค่าแก้ไขปริมาตรของน้ำจากปริมาตรน้ำที่อุณหภูมิหนึ่งไปเป็นปริมาตรน้ำที่อีกอุณหภูมิหนึ่งเนื่องจากความหนาแน่นของน้ำเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อเรารู้ค่าปริมาตรของน้ำที่อุณหภูมิสถานะมาตรฐานหนึ่งเราสามารถหาค่าปริมาตรของน้ำที่อีกอุณหภูมิหนึ่งได้จากหลักการที่ว่า “ค่าของมวลน้ำที่สถานะใดๆ ย่อมมีค่าคงที่ถึงแม้ค่าความหนาแน่นและปริมาตรของน้ำจะเปลี่ยนแปลงก็ตาม” ซึ่งใช้หลักการตาม “principle of mass conservation” ดังนี้



รูปที่ 4-6 Principle of Mass Conservation

$$M_T = M_0$$

$$V_T \rho_T = V_0 \rho_0$$

$$V_T = V_0 \frac{\rho_0}{\rho_T}$$

$$V_T = V_0 \times C_{tw} \quad (\text{Eq.4-8})$$

เมื่อ

$$C_{tw} = \frac{\rho_0}{\rho_T} \quad (\text{Eq.4-9})$$

ตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิกระทำต่อน้ำ เราเรียกว่า C_{tw} (the correction factor for the effect of temperature on water) ซึ่งตัวแปรดังกล่าวนี้ได้รวมการแก้ไขค่าปริมาณความแตกต่างของปริมาตรของน้ำทั้งของปริมาตรภายในถังตวงแบบมาตราและถังที่ต้องการสอบเทียบอันเนื่องจากผลกระทบของการเพิ่มของอุณหภูมิ คือ

1. Liquid Density Correction Factors การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น (ปริมาตร) ของน้ำ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำภายในถังตวงแบบมาตราและถังที่ต้องการสอบเทียบ เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ปริมาตรน้ำเต็มถังตวงแบบมาตรา และ/หรือ ถังที่ต้องการสอบเทียบจนถึงสิ้นสุดระยะบายน้ำออกจากถังตวงแบบมาตรา และ/หรือ ถังที่ต้องการสอบเทียบ
2. Prover and Field Measure Steel Correction Factors การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของถังตวงแบบมาตราและถังตวงที่ต้องการสอบเทียบเมื่ออุณหภูมิของถังตวงทั้ง 2 ต่างจากอุณหภูมิ

สอบเทียบของถังตวงแบบมาตรา (the calibration temperature of the measure) เนื่องจากการขยายตัวของถังตวงแบบมาตราและถังตวงที่ต้องการสอบเทียบ ด้วยเหตุนี้ค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการคำนวณตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิกระทำต่อน้ำ (C_{tw}) จึงต้องเป็น “อุณหภูมิน้ำเฉลี่ย”

มาถึงตรงนี้ทำไมต้องพูดกันถึงแต่น้ำ ทำไมไม่พูดถึงของเหลวชนิดอื่นๆ ละ เหตุผลก็คือการสอบเทียบแบบมาตราด้านปริมาตรที่ใช้ในการปฏิบัติงานซึ่งตวงวัดในเชิงกฎหมาย (Legal Metrology) นั้นได้ถูกถ่ายทอดความถูกต้องเที่ยงตรงลงมาจากค้อนน้ำหนักแบบมาตราผ่านเครื่องชั่งที่มีความละเอียดสูง และ/หรือ Mass comparator โดยการใช้ “น้ำสะอาด” หรือ “น้ำบริสุทธิ์” เป็นตัวกลางในการถ่ายทอดแบบมาตราลงมา ด้วยเหตุผลเพราะน้ำมีคุณสมบัติที่เด่นมาก เราพิจารณาใน 3 ปัจจัยหลักคือ

ก. ด้าน “อุณหภูมิ”

ก.1. สัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ (Low Coefficient of Expansion) ส่งผลให้ปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงค่อนข้างน้อยหากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

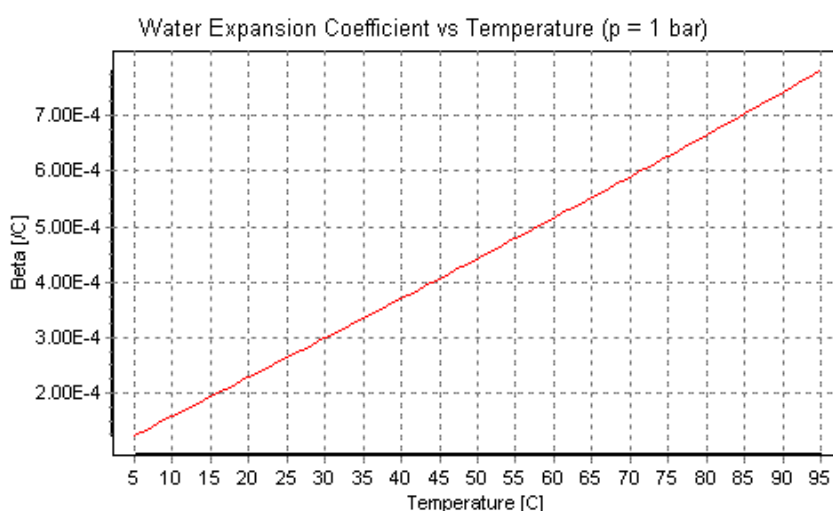
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนตามบาศก์ (Coefficient of cubical expansion per $^{\circ}\text{C}$) หรือ Thermal Expansion Coefficient ของของไหล เป็นสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นในปริมาตรจำเพาะ หรือสัดส่วนที่ลดลงในความหนาแน่น เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 1°C

$$\beta(T) = \frac{1}{V_s} \frac{\partial V_s}{\partial T} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \quad (\text{Eq.4-10})$$

สัมประสิทธิ์การขยายตัวของน้ำ (Water volumetric thermal expansion coefficient) มีค่า เท่ากับ

$$\beta(T) = 7.957 \times 10^{-5} + 7.315 \times 10^{-6} T \quad \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \quad (\text{Eq.4-11})$$

เมื่อ $T =$ อุณหภูมิน้ำ องศาเซลเซียส $^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4-7 สัมประสิทธิ์การขยายตัวของน้ำ (Water volumetric thermal expansion coefficient)

ก.2. ความจุความร้อนสูง (High Heat Capacity) เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงไปหากไม่มากนักน้ำยังคงรักษาค่าอุณหภูมิของน้ำได้ค่อนข้างคงที่ หรือพูดอีกนัยหนึ่งว่า หากให้ความร้อนกับน้ำ น้ำยังคงรักษาค่าอุณหภูมิของน้ำได้ค่อนข้างคงที่ภายในช่วงเวลานานกว่าของเหลวที่มีความจุความร้อนน้อย

ความจุความร้อน (Heat Capacity; C) คือ อัตราส่วนจำนวนพลังงานที่ดูดซับเข้าไปของสสารต่ออุณหภูมิสูงขึ้น หน่วยเป็น J/°C หรือ cal/°C

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (\text{Eq.4-12})$$

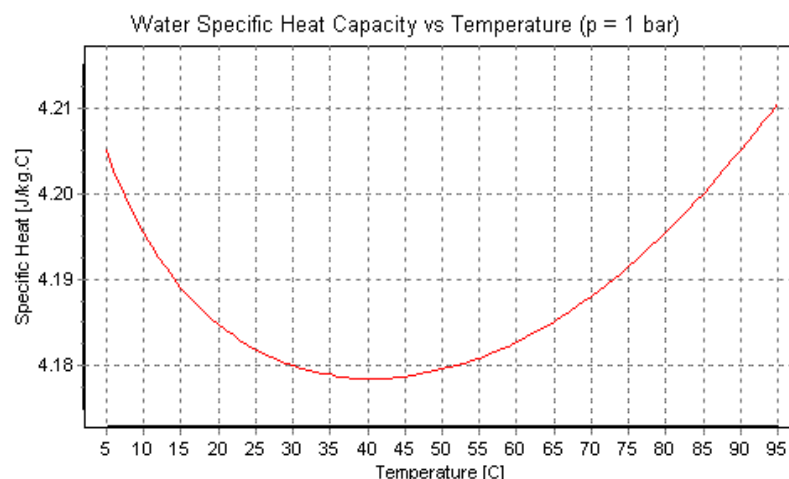
ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity; c_p) คือ ความจุความร้อนของสสารต่อหน่วยมวล ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ 4,186 J/kg °C หรือ 1.0 cal/g °C, ทอง (Gold) 129 J/kg °C และ เงิน (Silver) 234 J/kg °C

$$c_p = \frac{C}{m} = \frac{1}{m} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \quad (\text{Eq.4-13})$$

จาก International Association for Properties of Water and Steam Industrial Formulation 1997 (IAPWS IF-97) ที่ความดัน 1 bar และอุณหภูมิมีค่า $5^\circ\text{C} \leq T \leq 95^\circ\text{C}$ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (Water Specific Heat Capacity; c_p)

$$c_p(T) = 4.214 - 2.286 \times 10^{-3}T + 4.991 \times 10^{-5}T^2 - 4.519 \times 10^{-7}T^3 + 1.857 \times 10^{-9}T^4 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \quad (\text{Eq.4-14})$$

เมื่อ $T =$ อุณหภูมิ น้ำ องศาเซลเซียส $^\circ\text{C}$



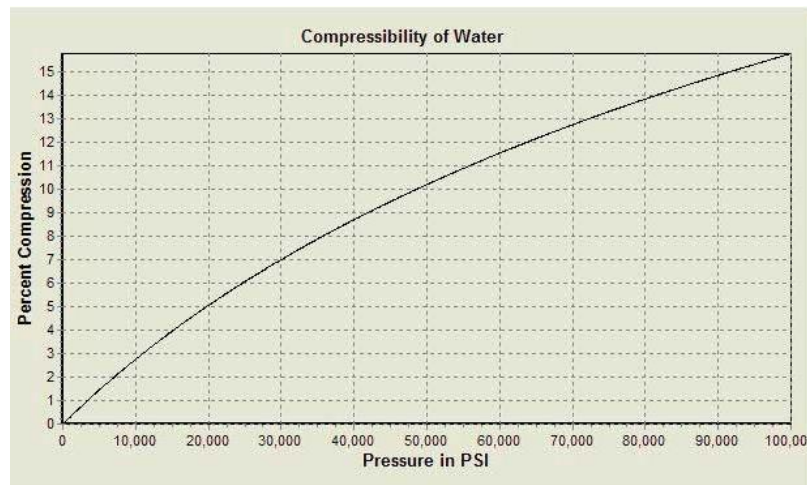
รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (Water Specific Heat Capacity; c_p) กับ อุณหภูมิ

ข. ด้าน “ความดัน”

ความสามารถในการถูกบีบอัดต่ำ (Low Compressibility) น้ำในทางเทคนิคแทบถือว่าเป็น incompressibility liquid คือเป็นของเหลวที่ถูกบีบอัดได้น้อยมากจนถือว่าเหมือนหนึ่งไม่สามารถบีบอัดได้ ซึ่งคุณสมบัติข้อดีของน้ำในข้อนี้จึงยังถูกใช้เป็นของเหลวตัวกลางในการสอบเทียบปริมาตรพื้นฐานของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (small volume prover หรือ compact prover)

ค. ด้าน “ความหนาแน่น” จากคุณสมบัติที่กล่าวมาทั้ง 2 ข้อถือเป็นปัจจัยเสริม แต่ปัจจัยหลักในการเลือกใช้น้ำเป็นตัวกลางในการสอบเทียบและถ่ายทอดแบบมาตรฐานนั้นคือ ค่าความหนาแน่นของน้ำที่มีค่าคงที่แน่นอนภายในช่วงอุณหภูมิเปลี่ยนไปช่วงแคบๆ ปัจจัยนี้เองเป็นปัจจัยตัวชี้ขาดสำหรับการถ่ายทอดแบบ

มาตราจากตัมน้ำหนักแบบมาตราซึ่งมีหน่วยเป็น “กิโลกรัม” เปลี่ยนมาเป็นเครื่องตวงแบบมาตรามีหน่วยเป็น “ลูกบาศก์เมตร” ด้วยการใช้คุณสมบัติความหนาแน่นของน้ำหน่วยเป็น “กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร” ขอรับ



รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ความสามารถในการถูกบีบอัดของน้ำ (Compressibility of Water) กับ อุณหภูมิ

ในกรณีที่ใช้น้ำบริสุทธิ์เราสามารถหาค่าความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้จากในหนังสือคุณสมบัติของสารต่างๆ ซึ่งได้จัดทำไว้เป็นตารางทั่วไปไปแล้ว ในขณะเดียวกันเรายังสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้จากค่าความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ (ρ_w) ที่ความดันบรรยากาศจากสมการของ H. Wagenbreth และ W. Blanke, PTB¹ โดยใช้สเกลอุณหภูมิ ITS-90

$$\rho_w = \frac{\sum_{n=0}^5 a_n \times t^n}{1 + bt} \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (\text{Eq.4-15})$$

เมื่อ	ρ_w = ค่าความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ที่ความดันบรรยากาศ	kg/m^3
	a_0 = 9.9983952×10^2	kg/m^3
	a_1 = 1.6952577×10	$^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ kg/m}^3$
	a_2 = $-7.9905127 \times 10^{-3}$	$^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ kg/m}^3$
	a_3 = -4.624175×10^{-5}	$^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ kg/m}^3$
	a_4 = 1.0584601×10^{-7}	$^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ kg/m}^3$
	a_5 = $-2.8103006 \times 10^{-10}$	$^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ kg/m}^3$
	b = 1.6887236×10^{-2}	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
	t = อุณหภูมิ	$^{\circ}\text{C}$

¹ H. Wagenbreth, and W. Blanke, The Density of Water in the International System of Units and International Practical Temperature Scale of 1968, PTB Mitteilungen. 81, 412 (1971)

°C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	999,8396	999,8463	999,8528	999,8591	999,8653	999,8713	999,8771	999,8827	999,8882	999,8934
1	999,8985	999,9035	999,9082	999,9128	999,9172	999,9214	999,9254	999,9293	999,9330	999,9365
2	999,9399	999,9431	999,9461	999,9489	999,9516	999,9541	999,9565	999,9587	999,9607	999,9625
3	999,9642	999,9657	999,9670	999,9682	999,9692	999,9701	999,9708	999,9713	999,9717	999,9719
4	999,9720	999,9718	999,9716	999,9711	999,9705	999,9698	999,9689	999,9678	999,9666	999,9652
5	999,9637	999,9620	999,9602	999,9582	999,9560	999,9537	999,9513	999,9487	999,9459	999,9430
6	999,9399	999,9367	999,9334	999,9299	999,9262	999,9224	999,9184	999,9143	999,9101	999,9057
7	999,9011	999,8964	999,8916	999,8866	999,8815	999,8762	999,8708	999,8652	999,8595	999,8537
8	999,8477	999,8416	999,8353	999,8289	999,8223	999,8157	999,8088	999,8019	999,7947	999,7875
9	999,7801	999,7726	999,7649	999,7571	999,7492	999,7411	999,7329	999,7246	999,7161	999,7075
10	999,6987	999,6898	999,6808	999,6717	999,6624	999,6530	999,6434	999,6337	999,6239	999,6140
11	999,6039	999,5937	999,5834	999,5729	999,5623	999,5516	999,5408	999,5298	999,5187	999,5074
12	999,4961	999,4846	999,4730	999,4612	999,4494	999,4374	999,4253	999,4130	999,4007	999,3882
13	999,3756	999,3628	999,3500	999,3370	999,3239	999,3106	999,2973	999,2838	999,2702	999,2565
14	999,2427	999,2287	999,2146	999,2004	999,1861	999,1717	999,1571	999,1424	999,1276	999,1127
15	999,0977	999,9826	999,0673	999,0519	999,0364	999,0208	999,0051	998,9892	998,9733	998,9572
16	998,9410	998,9247	998,9083	998,8917	998,8751	998,8583	998,8414	998,8244	998,8075	998,7901
17	998,7728	998,7553	998,7378	998,7201	998,7023	998,6845	998,6665	998,6483	998,6301	998,6118
18	998,5934	998,5748	998,5562	998,5374	998,5185	998,4995	998,4804	998,4612	998,4419	998,4225
19	998,4030	998,3833	998,3636	998,3438	998,3238	998,3037	998,2836	998,2633	998,2429	998,2224
20	998,2019	998,1812	998,1604	998,3395	998,1185	998,0973	998,0761	998,0548	998,0334	998,0119
21	997,9902	997,9685	997,9467	997,9247	997,9027	997,8805	997,8583	997,8360	997,8135	997,7910
22	997,7683	997,7456	997,7227	997,6998	997,6767	997,6536	997,6303	997,6070	997,5835	997,5600
23	997,5363	997,5126	997,4887	997,4648	997,4408	997,4166	997,3924	997,3680	997,3436	997,3191
24	997,2944	997,2697	997,2449	997,2200	997,1950	997,1699	997,1446	997,1193	997,0939	997,0685
25	997,0429	997,0172	996,9914	996,9655	996,9396	996,9135	996,8873	996,8611	996,8347	996,8083
26	996,7818	996,7551	996,7284	996,7016	996,6747	996,6477	996,6206	996,5934	996,5661	996,5388
27	996,5113	996,4837	996,4561	996,4284	996,4005	996,3726	996,3446	996,3165	996,2883	996,2600
28	996,2316	996,2032	996,1746	996,1460	996,1172	996,0884	996,0595	996,0305	996,0014	995,9722
29	995,9430	995,9136	995,8842	995,8546	995,8250	995,7953	995,7655	995,7356	995,7056	995,6756
30	995,6454	995,6152	995,5848	995,5544	995,5239	995,4934	995,4627	995,4319	995,4011	995,3701
31	995,3391	995,3080	995,2768	995,2456	995,2142	995,1828	995,1512	995,1196	995,0879	995,0561
32	995,0243	994,9923	994,9603	994,9282	994,8960	994,8637	994,8313	994,7988	994,7663	994,7337
33	994,7010	994,6682	994,6353	994,6024	994,5693	994,5362	994,5030	994,4697	994,4364	994,4029
34	994,3694	994,3358	994,3021	994,2683	994,2345	994,2005	994,1665	994,1324	994,0982	994,0640
35	994,0296	993,9952	993,9607	993,9261	993,8915	993,8567	993,8219	993,7870	993,7521	993,7170
36	993,6819	993,6467	993,6114	993,5760	993,5406	993,5050	993,4694	993,4338	993,3980	993,3622
37	993,3263	993,2903	993,2542	993,2181	993,1818	993,1455	993,1092	993,0727	993,0362	992,9996
38	992,9629	992,9261	992,8893	992,8524	992,8154	992,7784	992,7412	992,7040	992,6668	992,6294
39	992,5920	992,5545	992,5169	992,4792	992,4415	992,4037	992,3658	992,3279	992,2899	992,2518
40	992,2136									

ตารางที่ 4 -2 ค่าความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ (ρ_w) ที่ความดันบรรยากาศจากสมการของ
H.Wagenbreth และ W. Blanke

หรือค่าความหนาแน่นของน้ำได้จากสมการ Polynomial Equation จาก ISO 8222: 1987 (INTERNATION ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION Petroleum measurement systems - Calibration - Temperature corrections for use with volumetric reference measuring systems) สำหรับอุณหภูมิของน้ำบริสุทธิ์ตั้งแต่อุณหภูมิ 0.05 °C ถึง 45 °C ค่าความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ (ρ_w) ที่ความดันบรรยากาศมีค่าเท่ากับ

$$\rho_W = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (\text{Eq.4-16})$$

เมื่อ ρ_W = ค่าความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ที่ความดันบรรยากาศ kg/m^3

a_0 = 999.839 563 9

a_1 = + 0.067 982 999 89

a_2 = - 0.009 106 025 564

a_3 = + 0.000 100 527 299 9

a_4 = - 0.000 001 126 713 526

a_5 = + 0.000 000 006 591 795 606

t = อุณหภูมิน้ำ องศาเซลเซียส $^{\circ}\text{C}$

ค่าความละเอียดถึงทศนิยม 6 ตำแหน่งสำหรับความหนาแน่นน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0.05 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 45 $^{\circ}\text{C}$

นอกจากนี้ยังมีค่าความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ (ρ_W) ที่ความดันบรรยากาศจากสมการของ Tanaka²

$$\rho_W = a_5 \left[1 - \frac{(t+a_1)^2(t+a_2)}{a_3(t+a_4)} \right] \quad \frac{\text{g}}{\text{mL}} \quad (\text{Eq.4-17})$$

เมื่อ ρ_W = ค่าความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ที่ความดันบรรยากาศ kg/m^3

a_1 = - 3.983035 $^{\circ}\text{C}$

a_2 = 301.797 $^{\circ}\text{C}$

a_3 = 522528.9 $(^{\circ}\text{C})^2$

a_4 = 69.34881 $^{\circ}\text{C}$

a_5 = 0.999974950 g/mL

t = อุณหภูมิน้ำ องศาเซลเซียส $^{\circ}\text{C}$

หมายเหตุ ค่า a_5 เป็นค่าความหนาแน่นของน้ำ SMOW (Standard Mean Ocean Water; SMOW Water) ภายใต้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ t เมื่อมีการใช้น้ำประปาหรือน้ำสะอาด ต้องทำการปรับค่า a_5 ให้เป็นค่าความหนาแน่นของประเภทของน้ำที่ใช้ด้วย

ง. ด้านอื่นๆ

ง.1. ความสามารถในการชอกซอนไปทั่วทุกมุมของภาชนะ ทำให้ทุกพื้นที่เต็มไปด้วยน้ำในปริมาตรของเครื่องตวง แต่อย่างไรก็ตามในการออกแบบเครื่องตวงต้องคำนึงการไล่อากาศออกจากเครื่องตวงให้สะดวกรวดเร็วเป็นประเด็นสำคัญอีกประเด็นหนึ่ง

² Tanaka, M., et. al; Recommended table for the density of water between 0 $^{\circ}\text{C}$ and 40 $^{\circ}\text{C}$ based on recent experimental reports, Metrologia, 2001, 38, 301-309

ง.2. **หาได้ง่ายและราคาถูก** เนื่องจากการสอบเทียบปฏิบัติงานจริงอาจต้องดำเนินการสอบเทียบเครื่องชั่งตวงวัดไม่น้อยกว่า 5 รอบสำหรับสอบเทียบแบบมาตรา และไม่น้อยกว่า 4 รอบสำหรับเครื่องชั่งตวงวัดทั่วไป เพื่อหาค่า repeatability และ uncertainty ของเครื่องชั่งตวงวัด หรือมีการปรับแต่งเครื่องชั่งตวงวัดจนกว่าได้ผลการวัดที่ถูกต้อง หรือด้วยสาเหตุอื่นๆ น้ำจึงตัวกลางที่เหมาะสมกับค่าดำเนินการ

ง.3. **เก็บรักษาง่ายและปลอดภัย** น้ำไม่เป็นสารที่ระเบิดหรือก่อให้เกิดเพลิงไหม้ได้ และน้ำมีคุณสมบัติเป็นมิตรกับคนและสิ่งแวดล้อมตลอดจนเครื่องชั่งตวงวัดทั่วไป การเก็บรักษาน้ำจึงสะดวกปลอดภัย ค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บรักษาน้ำราคาไม่สูง

ด้วยเหตุนี้ตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิกระทำต่อน้ำ C_{tw} (C_{tw}) จึงเป็นตัวแปรแรกที่เราต้องรู้จัก

3. การแก้ไขค่าสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิเฉลี่ยมีผลต่อโลหะ (Correction for the Effect of Temperature on Steel); C_{ts} หรือ (CTS)

ภาชนะบรรจุใดๆ ซึ่งทำด้วยโลหะ เช่น ท่อสอบเทียบ (pipe prover), ถังตวงแบบมาตรา (tank prover) เป็นต้น เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของภาชนะบรรจุ นั่นๆด้วย พบว่าการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรไม่คำนึงถึงรูปร่างของภาชนะ แต่จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนตามบาศก์ (the cubical coefficient of thermal expansion) ของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะนั้นๆ และเป็นภาชนะซึ่งมีผนังชั้นเดียว (Single-Walled Container or Prover) ด้วยเหตุนี้ตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิกระทำต่อโลหะ ซึ่งเรียกว่า C_{ts} (the correction factor for the effect of temperature on steel) คำนวณได้จาก

$$C_{ts} = 1 + \gamma(T - T_0) \quad (\text{Eq.4-18})$$

เมื่อ C_{ts} = ตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิกระทำต่อโลหะ (ไม่มีหน่วย)

T = อุณหภูมิผนังเฉลี่ยของภาชนะบรรจุของเหลว เช่น ท่อสอบเทียบ (pipe prover), ถังตวงแบบมาตรา (tank prover); °C

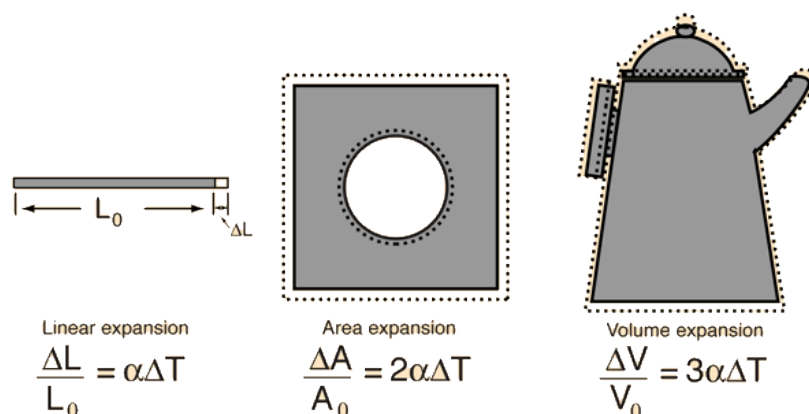
T_0 = อุณหภูมิอ้างอิงของผนังของภาชนะบรรจุของเหลว เช่น ท่อสอบเทียบ (pipe prover), ถังตวงแบบมาตรา (tank prover) : °C

γ = สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนตามบาศก์ (Coefficient of cubical expansion per °C) ของโลหะที่ใช้ทำภาชนะบรรจุของเหลว, /°C ตามตารางที่ 4 -3

C_{ts} เป็นตัวแปรไม่มีหน่วย (non-dimensional value) หากสังเกตจะพบว่า ค่า C_{ts} จะมีค่ามากกว่า 1 เมื่ออุณหภูมิใดๆ (T) มีค่ามากกว่าอุณหภูมิอ้างอิง (T_0) และจะมีค่าน้อยกว่า 1 เมื่ออุณหภูมิใดๆ (T) มีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิอ้างอิง (T_0)

Coefficient of Thermal Expansion at 15 °C				
Material		Linear Coefficient of Expansion α	Square Coefficient of Expansion	Cubical Coefficient of Expansion $\gamma = 3 \times \alpha$
Stainless Steel:				
Type 304	(°C)	0.00001728	0.0000346	0.0000518
	(°F)	0.0000096	0.0000192	0.0000288
Type 316	(°C)	0.0000151	0.0000302	0.0000454
	(°F)	0.0000084	0.0000168	0.0000252
Type 17.4 PH	(°C)			0.0000216
	(°F)			0.0000120
or Type 17.4 PH	(°C)	0.0000108	0.0000216	0.0000324
	(°F)	0.0000060	0.000012	0.000018
Seraphin™	(°C)	0.0000159		0.0000477
	(°F)	0.0000088		0.0000265
Steel				
Mild Steel	(°C)	0.0000116		0.0000335
	(°F)	0.0000062		0.0000186
Low Carbon	(°C)	0.000012		0.0000350
	(°F)			
Template	(°C)	0.000012		0.0000350
Aluminium	(°C)	0.000024		0.0000714
Brass	(°C)	0.000019		0.0000572
Copper	(°C)	0.000017		0.0000500
Glass				
Borosilicate (T1CA)	(°C)			0.0000100
Borosilicate (T1CB)	(°C)			0.0000150
Soda-lime	(°C)			0.0000250
Pyrex-glass	(°C at 20 °C)	0.0000033		0.0000055
	(°F at 20 °C)	0.0000019		0.0000100
Jena III API	(°C)			0.0000230
Invar™	(°C)	0.00000144		0.00000432
	(°F)	0.00000080		

ตารางที่ 4-3 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น (Linear Coefficient of Expansion), สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงพื้นที่ (Square Coefficient of Expansion) และสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนตามบาศก์ (Coefficient of cubical expansion per °C),



รูปที่ 4-10 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนตามบาศก์ (Cubical coefficient of thermal expansion)

ในทางปฏิบัติเราแทบจะไม่สามารถวัดคุณสมบัติของผนังของภาชนะบรรจุของเหลวหลายๆ จุดแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยได้เลย เช่น ถังตวงแบบมาตราหรือมาตรวัดแบบมาตรา เป็นต้น ด้วยเหตุนี้เราจึงต้องใช้คุณสมบัติ

ของของเหลวภายในเครื่องตวงเป็นตัวแทนอุณหภูมิเฉลี่ยผนังของภาชนะบรรจุของเหลวในการคำนวณค่า C_{ts} ดังนั้นเพื่อป้องกันและลดความผิดพลาดเนื่องจากค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของเหลวภายในภาชนะบรรจุของเหลวเราจึงจำเป็นต้องควบคุม

- ความแตกต่างของอุณหภูมิของเหลวภายในภาชนะบรรจุของเหลวกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมหรืออุณหภูมิห้อง เช่น ในกรณีในการสอบเทียบถังตวงแบบมาตราโดยใช้น้ำที่มีอุณหภูมิ 30°C แต่อุณหภูมิห้องภาคสนามหน้าร้อนบริเวณที่ตั้งถังตวงแบบมาตรากลางแดด 37°C อย่างนี้ไม่ควรกระทำ ต้องแก้ไขปัญหาลักษณะทำการย้ายมาทำในที่ร่มเงา หรือทำงานในตอนช่วงเช้าแทน
- ความแตกต่างของอุณหภูมิของเหลวภายในภาชนะบรรจุของเหลวกับอุณหภูมิภาชนะบรรจุของเหลว เช่น เจ้าของถังตวงแบบมาตราจนถึงตวงแบบมาตรามานันท์ 6 ล้อตากแดดมา พอมาถึงสถานที่สอบเทียบทำการสอบเทียบทันทีโดยไม่ให้ถังตวงแบบมาตราปรับตัวกับอุณหภูมิน้ำที่จะใช้สอบเทียบ อย่างนี้ก็ไม่ควรกระทำ แต่แก้ไขปัญหามาโดยเติมน้ำเข้าถังตวงแบบมาตราเพื่อให้สักพักหนึ่งก่อนทำการสอบเทียบ

การควบคุมความแตกต่างของอุณหภูมิดังกล่าวให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่ทำได้ จะนำมาซึ่งผลการสอบเทียบที่แม่นยำสูงขึ้นและน่าเชื่อถือมากขึ้น เพราะค่าความแตกต่างกันของของเหลวภายในภาชนะบรรจุ, ตัวภาชนะบรรจุ และอุณหภูมิห้องมีผลต่อตัวแปร C_{ts} เรื่องนี้อธิบายด้วยการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) ซึ่งไม่ขอลงรายละเอียดในที่นี้

ในการแก้ไขปริมาตรของภาชนะบรรจุโลหะใดๆ เช่น ท่อสอบเทียบ (pipe prover), ถังตวงแบบมาตรา (tank prover) หรือถังตวงแบบมาตราชนิดเคลื่อนที่ได้ (a portable test measure) จากปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง (V_o) ไปเป็นปริมาตรที่อุณหภูมิใดๆ (V_T) จึงหาได้จาก

$$V_T = V_o \times C_{ts} \quad (\text{Eq.4-19})$$

ยกตัวอย่างเช่นถ้าหากถังตวงแบบมาตรามีปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ 30°C ดังนั้นเมื่อเรารู้ค่าปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง (30°C) ก็จะสามารถคำนวณหาปริมาตรที่อุณหภูมิอื่นๆ ได้จาก

$$V_T = V_{30} \times C_{ts} \quad (\text{Eq.4-20})$$

ในทางกลับกันเมื่อเรารู้ค่าปริมาตรที่อุณหภูมิใดๆ ก็จะสามารถคำนวณหาปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิงได้จาก

$$V_{30} = \frac{V_T}{C_{ts}} \quad (\text{Eq.4-21})$$

และนี่เองคือบทบาทของตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิกะทำต่อโลหะ C_{ts}

การเปลี่ยนแปลงค่า C_{ts} ต่ออุณหภูมิ

จากการคำนวณพบว่าพอประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงค่า C_{ts} ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ

$$\begin{aligned} \Delta C_{ts} &= 0.003\% \text{ Per } ^{\circ}\text{C} \\ &= 0.002\% \text{ Per } ^{\circ}\text{F} \end{aligned} \quad (\text{Eq.4-22})$$

หากทุกคนได้อ่านมาถึงจุดนี้บางคนอาจรำคาญใจว่าคนเขียนทำไมเขียนภาษาไทยคำภาษาอังกฤษคำก็ขอชี้แจงว่ามีวัตถุประสงค์อยู่ว่า ต้องการให้คุ้นเคยกับภาษาอังกฤษในศัพท์ที่จำเป็นและหากไปเห็นในเอกสารใดจะได้เข้าใจไม่สับสนหรือหากสับสนเราก็กมออ้างอิงถึงแล้วถามผู้ที่เกี่ยวข้องว่าเป็นคำๆ เดียวกันหรือไม่ เราต้องปรับตัวเพราะความรู้ดังกล่าวเราต้องเรียนรู้จากต่างประเทศซึ่งเขาไม่ใช่ภาษาไทยกัน ประเด็นที่สองคือมันเป็นศัพท์เทคนิคหากต้องแปลเป็นไทยทุกคำเกรงว่าผู้เขียนคงเหนื่อยไม่ไหวเพราะภาษาไทยมีคำมากมายร่ำรวยเหลือเกินที่สำคัญต้องการกระชับทับศัพท์ เมื่อไปพูดคุยหรือฟังภาคเอกชนก็ไม่ต้องกลัวเขาว่าเราไม่รู้ หวังว่าเข้าใจตรงกันนะ

4. การแก้ไขค่าสำหรับอิทธิพลของความดันเฉลี่ยมีผลต่อโลหะ (Correction for the Effect of Pressure on Steel) ; C_{ps} หรือ (CPS)

ภาชนะบรรจุซึ่งทำด้วยโลหะ เช่น ถังตวงแบบมาตรา (prover tank), ท่อทดสอบความจุ (pipe prover) เป็นต้น ขณะใช้งานจะได้รับแรงดันกระทำต่อผนังภายในภาชนะบรรจุส่งผลให้ผนังภาชนะบรรจุมีการยืดขยายตัวหรือหดตัว ด้วยเหตุนี้ปริมาตรของภาชนะบรรจุจึงเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันที่มากกระทำ ซึ่งในทางเป็นจริงแล้วการคำนวณหาค่าการขยายตัวหรือหดตัวของภาชนะค่อนข้างยุ่งยากและลำบากเนื่องจากภาชนะแต่ละชนิดมีรูปทรงที่แตกต่างกันไป แต่ในทางปฏิบัติเพื่อให้ง่ายต่อการทำงานจึงพอสรุปการหาค่าการขยายตัวหรือหดตัว ด้วยตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของความดันมีผลต่อโลหะ C_{ps} หรือ (CPS) (the correction factor for the effect of pressure on the steel) หรือตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของความดันภายใน (internal pressure) กระทำต่อภาชนะบรรจุรูปทรงกระบอก (a cylindrical container)

$$C_{ps} = 1 + \frac{P \times D}{E \times t} \quad (\text{Eq.4-23})$$

เมื่อ	C_{ps}	=	ตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของความดันภายใน
	P	=	ความดันภายในภาชนะบรรจุรูปทรงกระบอก (a cylindrical container) หรือผนัง 1 ชั้น (Single-Walled or One-Case Container or Prover)
			kPag (psig)
	D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (internal diameter)
			cm. (inch)
	E	=	Modulus of Elasticity for Container Material
			kPag (psig)

Table 2—Modulus of Elasticity for Steel Containers (E)

Type of Steel	Modulus of Elasticity		
	(per psi)	(per bar)	(per kPa)
Mild Carbon	3.00E+07	2.07E+06	2.07E+08
304 Stainless	2.80E+07	1.93E+06	1.93E+08
316 Stainless	2.80E+07	1.93E+06	1.93E+08
17-4PH Stainless	2.85E+07	1.97E+06	1.97E+08

ตารางที่ 4 -4 Modulus of Elasticity for Container Material (API MPMS Chapter 12- Section 2, 1995)

t = ความหนาของผนัง (wall thickness of container) cm. (inch)

เมื่อเรารู้ค่าปริมาตรที่ความดันบรรยากาศหรือที่ความดันไอสมดุล (equilibrium pressure); V_o เราสามารถคำนวณหาปริมาตรที่ความดันใดๆ (V_p) ได้จาก

$$V_p = V_o \times C_{ps} \quad (\text{Eq.4-24})$$

หรือ

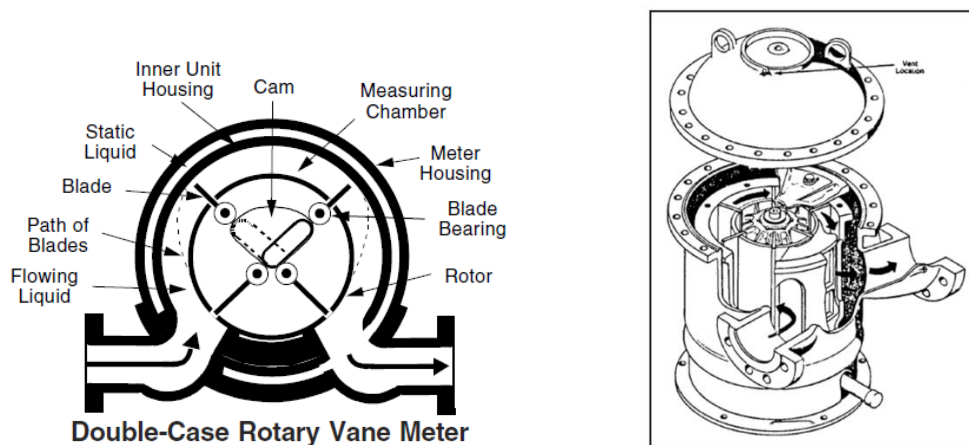
$$V_p = V_{\text{atm}} \times C_{ps} \quad (\text{Eq.4-25})$$

ในทางกลับกันถ้าเรารู้ค่าปริมาตรที่ความดันใดๆแล้วจะสามารถคำนวณหาปริมาตรที่ความดันบรรยากาศมีค่าเท่ากับ

$$V_{\text{atm}} = \frac{V_p}{C_{ps}} \quad (\text{Eq.4-26})$$

ในกรณีภาชนะบรรจุรูปทรงกระบอก (a cylindrical container) มีผนัง 2 ชั้น (Double-Walled or Double-Case Container or Prover) นั่นคือ เครื่องตวง หรือถังตวงแบบมาตรา หรือมาตรวัดแบบมาตราบางชนิดถูกออกแบบให้มีผนังมากกว่า 1 ชั้นเพื่อสร้างสภาวะความสมดุลของแรงดันภายในกับภายนอกของห้องวัด (Calibrated Chamber) ดังนั้นภายในห้องวัดจึงไม่ได้รับความดันสุทธิที่กระทำต่อผนังห้องวัด ดังนั้น

$$C_{ps} = 1.00 \quad (\text{Eq.4-27})$$



รูปที่ 4-11 มาตรวัดแบบมาตราชนิดผนัง 2 ชั้น (Double-Case Meter)

การเปลี่ยนแปลงค่า C_{ps} ต่อความดัน

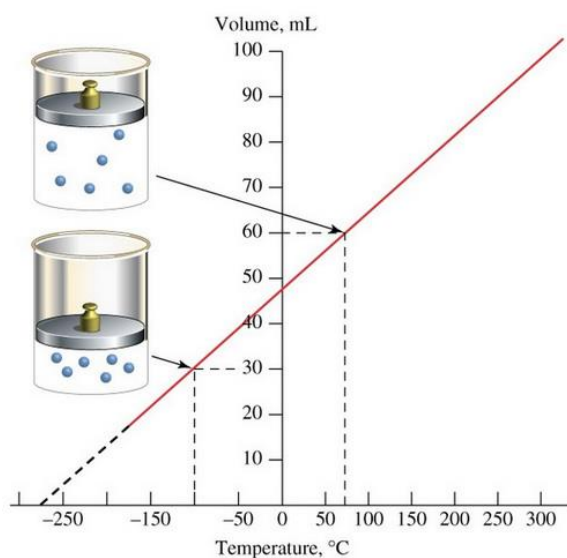
จากการคำนวณพบว่าพอประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงค่า C_{ps} ต่อความดันที่เปลี่ยนแปลงมีค่าประมาณ

$$\begin{aligned} \Delta C_{ps} &= 0.003 \% \text{ Per bar} \\ &= 0.0001\% \text{ Per psig} \end{aligned} \quad (\text{Eq.4-28})$$

5. การแก้ไขค่าสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อของเหลว (Correction for the Effect of Temperature on a Liquid) ; C_{tl} หรือ (CTL)

เมื่อปริมาณของเหลวปิโตรเลียม หรือของเหลวไฮโดรคาร์บอน (Liquid Hydrocarbons) ถูกกระทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลให้ปริมาตรของเหลวปิโตรเลียมเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน โดยปริมาตรจะขยายเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและจะหดตัวลงเมื่ออุณหภูมิลดลง พบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเหลวปิโตรเลียมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ the thermal coefficient of expansion ของเหลว ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่น (API gravity) และอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4-12

สำหรับตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อปริมาตรของเหลวปิโตรเลียม หรือของเหลวไฮโดรคาร์บอน (C_{tl} หรือ CTL; the correction factor for the effect of temperature on the petroleum liquid) ด้วยหลักคิดเช่นเดียวกับ C_{tw} แต่เปลี่ยนเงื่อนไข โดยกำหนดสมมุติฐานให้ความดันกระทำต่อของเหลวปิโตรเลียมหรือของเหลวไฮโดรคาร์บอนด้วยความดันคงที่แต่อุณหภูมิของเหลวปิโตรเลียมหรือของเหลวไฮโดรคาร์บอน (T เปลี่ยน P คงที่)



รูปที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับอุณหภูมิ

$$M_T = M_0$$

$$V_T \rho_T = V_0 \rho_0$$

$$V_0 = V_T \frac{\rho_T}{\rho_0}$$

$$V_0 = V_T \times C_{tl} \quad (\text{Eq.4-29})$$

เมื่อ

$$C_{tl} = \frac{\rho_T}{\rho_0} \quad (\text{Eq.4-30})$$

ดังนั้นในการแก้ไขปริมาตรของเหลวปิโตรเลียมหรือของเหลวไฮโดรคาร์บอนภายในภาชนะบรรจุจากปริมาตรที่อุณหภูมิใดๆ (V_T) ไปเป็นปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิงหรืออุณหภูมิมาตรฐาน (V_0) หาได้จาก

$$V_o = V_T \times C_d$$

ในทางกลับกันถ้าเรารู้ค่าปริมาตรของเหลวปิโตรเลียมหรือของเหลวไฮโดรคาร์บอนภายในภาชนะบรรจุที่อุณหภูมิอ้างอิงหรืออุณหภูมิมาตรฐาน แล้วก็สามารถคำนวณหาปริมาตรที่อุณหภูมิใดๆ ได้

$$V_T = \frac{V_o}{C_d}$$

หากพิจารณาในอีกแง่มุมหนึ่งจะพบว่า ค่า C_d เป็นค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิงกับปริมาตรที่อุณหภูมิ T

$$C_d = \frac{V_o}{V_T} \quad (\text{Eq.4-31})$$

แต่เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ว่าค่ามวลของเหลวที่สถานะใดๆ จะมีค่าคงที่ ดังนั้น เมื่อ 2 สถานะมีค่าความดันคงที่เท่ากัน จะได้ว่า

$$M_o = M_T$$

$$\rho_o V_o = \rho_T V_T$$

$$\frac{V_o}{V_T} = \frac{\rho_T}{\rho_o}$$

ดังนั้น

$$C_d = \frac{\rho_T}{\rho_o}$$

เนื่องจากความรู้ทางด้านนี้เป็นความรู้จากซีกตะวันตก ดังนั้นการคำนวณหรือการจัดทำตารางใดๆ เพื่อหาค่าตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิมิมีผลต่อปริมาตรของเหลว (C_d) จึงตั้งอยู่ที่สถานะมาตรฐานอุณหภูมิที่ 15 °C จาก API MPMS Chapter 11.1, Volume X (ANSI/ASTM D1250-980) แบ่งเป็น 2 กรณีกว้างๆ คือ

1. ตารางการแปลงค่าความหนาแน่นของเหลวปิโตรเลียม หรือของเหลวไฮโดรคาร์บอนในเทอมของความหนาแน่น API ที่อุณหภูมิวัดได้ใดๆ ไปยังค่าความหนาแน่นที่สถานะมาตรฐานอุณหภูมิที่ 15 °C ขึ้นอยู่ชนิดของผลิตภัณฑ์ ได้แก่

- Table 53A,
- Table 53B และ
- Table 53D

2. ตารางแปลงค่าปริมาตรของเหลวปิโตรเลียม หรือของเหลวไฮโดรคาร์บอนไปยังปริมาตรที่สถานะมาตรฐานอุณหภูมิที่ 15 °C โดยใช้ Factor for Reducing Volume หรืออีกนัยหนึ่งคือค่า C_d คือค่าความหนาแน่นของเหลวที่อุณหภูมิใดๆ เทียบกับความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 15 °C เป็นความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นที่ 15 °C กับอุณหภูมิของเหลววัดได้ใดๆ กำหนด C_{d15} ขึ้นอยู่ชนิดของผลิตภัณฑ์ ได้แก่

Table 53
ASTM—IP * Density Reduction to 15°C. 0,555–0,595
25–50°C.

Observed Temper- ature, °C.	Observed Density								
	0,555	0,560	0,565	0,570	0,575	0,580	0,585	0,590	0,595
	Corresponding Density 15°C.								
25,0	0,567	0,572	0,577	0,582	0,587	0,592	0,596	0,601	0,605
25,5	0,568	0,573	0,578	0,583	0,588	0,593	0,597	0,602	0,606
26,0	0,568	0,573	0,578	0,583	0,588	0,593	0,597	0,602	0,606
26,5	0,569	0,574	0,579	0,584	0,589	0,594	0,598	0,603	0,607
27,0	0,569	0,574	0,579	0,584	0,589	0,594	0,598	0,603	0,607
27,5	0,570	0,575	0,580	0,585	0,590	0,595	0,599	0,604	0,608
28,0	0,571	0,576	0,581	0,585	0,590	0,595	0,600	0,604	0,609
28,5	0,571	0,576	0,581	0,586	0,591	0,596	0,600	0,605	0,609
29,0	0,572	0,577	0,582	0,586	0,591	0,596	0,601	0,605	0,610
29,5	0,572	0,577	0,582	0,587	0,592	0,597	0,601	0,606	0,610
30,0	0,573	0,578	0,583	0,587	0,592	0,597	0,602	0,606	0,611
30,5	0,574	0,579	0,584	0,588	0,593	0,598	0,603	0,606	0,611
31,0	0,574	0,579	0,584	0,588	0,593	0,598	0,603	0,607	0,612
31,5	0,575	0,580	0,585	0,589	0,594	0,599	0,604	0,607	0,612
32,0	0,575	0,580	0,585	0,589	0,594	0,599	0,604	0,608	0,613
32,5	0,576	0,581	0,586	0,590	0,595	0,600	0,605	0,608	0,613
33,0	0,577	0,582	0,586	0,591	0,595	0,600	0,605	0,608	0,613
33,5	0,577	0,582	0,587	0,591	0,596	0,601	0,606	0,609	0,614
34,0	0,578	0,583	0,587	0,592	0,596	0,601	0,606	0,609	0,614
34,5	0,578	0,583	0,588	0,592	0,597	0,602	0,607	0,610	0,615
35,0	0,579	0,584	0,588	0,593	0,597	0,602	0,607	0,610	0,615
35,5	0,580	0,585	0,589	0,594	0,598	0,603	0,608	0,611	0,616
36,0	0,580	0,585	0,589	0,594	0,598	0,603	0,608	0,611	0,616
36,5	0,581	0,586	0,590	0,595	0,599	0,604	0,609	0,612	0,617
37,0	0,581	0,586	0,590	0,595	0,599	0,604	0,609	0,612	0,617
37,5	0,582	0,587	0,591	0,596	0,600	0,605	0,610	0,613	0,618
38,0	0,582	0,587	0,591	0,596	0,601	0,605	0,610	0,614	0,619
38,5	0,583	0,588	0,592	0,597	0,601	0,606	0,611	0,614	0,619
39,0	0,583	0,588	0,592	0,597	0,602	0,606	0,611	0,615	0,620
39,5	0,584	0,589	0,593	0,598	0,602	0,607	0,612	0,615	0,620
40,0	0,584	0,589	0,593	0,598	0,603	0,607	0,612	0,616	0,621
40,5	0,585	0,590	0,594	—	—	—	—	—	—
41,0	0,585	0,590	0,594	—	—	—	—	—	—
41,5	0,586	0,591	0,595	—	—	—	—	—	—
42,0	0,586	0,591	0,595	—	—	—	—	—	—
42,5	0,587	0,592	0,596	—	—	—	—	—	—
43,0	0,587	0,592	0,596	—	—	—	—	—	—
43,5	0,588	0,593	0,597	—	—	—	—	—	—
44,0	0,588	0,593	0,597	—	—	—	—	—	—
44,5	0,589	0,594	0,598	—	—	—	—	—	—
45,0	0,589	0,594	0,598	—	—	—	—	—	—
45,5	0,590	0,595	0,599	—	—	—	—	—	—
46,0	0,590	0,595	0,599	—	—	—	—	—	—
46,5	0,591	0,596	0,600	—	—	—	—	—	—
47,0	0,591	0,596	0,601	—	—	—	—	—	—
47,5	0,592	0,597	0,602	—	—	—	—	—	—
48,0	0,593	0,598	0,602	—	—	—	—	—	—
48,5	0,593	0,598	0,603	—	—	—	—	—	—
49,0	0,594	0,599	0,604	—	—	—	—	—	—
49,5	0,594	0,599	0,604	—	—	—	—	—	—
50,0	0,595	0,600	0,605	—	—	—	—	—	—

Table 54
0,570-0,600 Volume Reduction to 15°C. ASTM-IP /
25-50°C.

Observed Temperature, °C.	* Density 15°C.												
	0,570	0,575	0,580	0,585	0,590	0,595	0,600						
	Factor for Reducing Volume to 15°C.												
25,0	0,979	0	0,979	1	0,980	0	0,980	1	0,981	1	0,982	0	0,982
25,5	0,978	0	0,978	1	0,979	0	0,979	1	0,980	1	0,981	1	0,982
26,0	0,977	0	0,977	1	0,978	0	0,978	1	0,979	1	0,980	1	0,981
26,5	0,976	0	0,976	1	0,977	0	0,977	1	0,978	1	0,979	1	0,980
27,0	0,975	0	0,976	1	0,976	0	0,976	1	0,977	1	0,978	1	0,979
27,5	0,974	0	0,974	1	0,975	0	0,975	1	0,976	1	0,977	1	0,978
28,0	0,972	1	0,973	1	0,974	0	0,974	1	0,975	1	0,976	1	0,977
28,5	0,971	1	0,972	1	0,973	0	0,973	1	0,974	2	0,975	1	0,976
29,0	0,970	1	0,971	1	0,972	0	0,972	1	0,973	2	0,974	1	0,975
29,5	0,969	1	0,970	1	0,971	0	0,971	1	0,972	2	0,973	1	0,974
30,0	0,968	1	0,969	1	0,970	1	0,971	1	0,972	1	0,973	1	0,974
30,5	0,967	1	0,968	1	0,969	1	0,970	1	0,971	1	0,972	1	0,973
31,0	0,966	1	0,967	1	0,968	1	0,969	1	0,970	1	0,971	1	0,972
31,5	0,965	1	0,966	1	0,967	1	0,968	1	0,969	1	0,970	1	0,971
32,0	0,963	2	0,965	1	0,966	1	0,967	1	0,968	1	0,969	1	0,970
32,5	0,962	2	0,964	1	0,965	1	0,966	1	0,967	1	0,968	1	0,969
33,0	0,961	2	0,963	1	0,964	1	0,965	1	0,966	1	0,967	1	0,968
33,5	0,960	2	0,962	1	0,963	1	0,964	1	0,965	2	0,966	1	0,967
34,0	0,959	2	0,960	1	0,961	1	0,962	2	0,963	2	0,964	1	0,965
34,5	0,958	2	0,959	1	0,960	1	0,961	2	0,962	2	0,963	1	0,964
35,0	0,957	2	0,958	1	0,959	1	0,960	2	0,961	2	0,962	1	0,963
35,5	0,956	2	0,957	1	0,958	1	0,959	2	0,960	2	0,961	1	0,962
36,0	0,955	2	0,956	1	0,957	1	0,958	2	0,959	2	0,960	1	0,961
36,5	0,953	2	0,955	1	0,956	1	0,957	2	0,958	2	0,959	1	0,960
37,0	0,952	2	0,954	1	0,955	1	0,956	2	0,957	2	0,958	1	0,959
37,5	0,951	2	0,953	1	0,954	1	0,955	2	0,956	2	0,957	1	0,958
38,0	0,950	2	0,951	1	0,952	1	0,953	2	0,954	2	0,955	1	0,956
38,5	0,949	2	0,950	1	0,951	1	0,952	2	0,953	2	0,954	1	0,955
39,0	0,948	2	0,949	1	0,950	1	0,951	2	0,952	2	0,953	1	0,954
39,5	0,947	2	0,948	1	0,949	1	0,950	2	0,951	2	0,952	1	0,953
40,0	0,946	2	0,947	1	0,948	1	0,949	2	0,950	2	0,951	1	0,952
40,5	0,944	2	0,946	1	0,947	1	0,948	2	0,949	2	0,950	1	0,951
41,0	0,943	2	0,945	1	0,946	1	0,947	2	0,948	2	0,949	1	0,950
41,5	0,942	2	0,944	1	0,945	1	0,946	2	0,947	2	0,948	1	0,949
42,0	0,941	2	0,943	1	0,944	1	0,945	2	0,946	2	0,947	1	0,948
42,5	0,940	2	0,942	1	0,943	1	0,944	2	0,945	2	0,946	1	0,947
43,0	0,939	2	0,941	1	0,942	1	0,943	2	0,944	2	0,945	1	0,946
43,5	0,938	2	0,940	1	0,941	1	0,942	2	0,943	2	0,944	1	0,945
44,0	0,936	2	0,938	1	0,940	1	0,941	2	0,942	2	0,943	1	0,944
44,5	0,935	2	0,937	1	0,939	1	0,940	2	0,941	2	0,942	1	0,943
45,0	0,934	2	0,936	1	0,938	1	0,939	2	0,940	2	0,941	1	0,942
45,5	0,933	2	0,935	1	0,937	1	0,938	2	0,939	2	0,940	1	0,941
46,0	0,932	2	0,934	1	0,936	1	0,937	2	0,938	2	0,939	1	0,940
46,5	0,931	2	0,933	1	0,935	1	0,936	2	0,937	2	0,938	1	0,939
47,0	0,930	2	0,932	1	0,934	1	0,935	2	0,936	2	0,937	1	0,938
47,5	0,929	2	0,931	1	0,933	1	0,934	2	0,935	2	0,936	1	0,937
48,0	0,927	2	0,929	1	0,931	1	0,932	2	0,933	2	0,934	1	0,935
48,5	0,926	2	0,928	1	0,930	1	0,931	2	0,932	2	0,933	1	0,934
49,0	0,925	2	0,927	1	0,929	1	0,930	2	0,931	2	0,932	1	0,933
49,5	0,924	2	0,926	1	0,928	1	0,929	2	0,930	2	0,931	1	0,932
50,0	0,923	2	0,925	1	0,927	1	0,928	2	0,929	2	0,930	1	0,931

* See Introduction.

310

ตารางที่ 4 -6 ตัวอย่าง ASTM-IP-API Table 54A

- Table 54A,
- Table 54B, และ
- Table 54D

จากที่กล่าวไว้เนื่องจากเป็นความรู้ชุกตะวันตกและทางตะวันตกเขากำหนดสภาวะอ้างอิง หรือสภาวะมาตรฐานไว้ที่

International System (SI) Units

Pressure	:	14.696 psia (101.325 kPaa)
Temperature	:	59.0 °F (15.00 °C)

ดังนั้นหากเราไปใช้ตารางดังกล่าวจะส่งผลให้ค่าที่เราได้เป็นค่าที่อ้างอิงสภาวะมาตรฐานที่ 15 °C ให้ผล C_u คือ

$$C_{u15} = \frac{P_T}{P_{15}} \quad (\text{Eq.4-32})$$

$$V_{15} = V_T \times C_{u15} \quad (\text{Eq.4-33})$$

ดังนั้นหากต้องการให้สภาวะอ้างอิง หรือสภาวะมาตรฐานของประเทศไทยเป็น

Kingdom of Thailand

Pressure	:	14.696 psia (101.325 kPaa)
Temperature	:	30 °C

จึงต้องแปลงปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง 15 °C ไปยังปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง 30 °C ด้วยการบริหารจัดการกับตัวแปรแก้ไขค่า C_u แต่ยังคงอยู่ภายในเงื่อนไขบนพื้นฐานค่าความหนาแน่นของเหลวที่ 15 °C ดังนั้นเมื่อทราบค่าในตารางที่ใช้ในข้างบนจำเป็นต้องใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์เข้าช่วย (อย่าลืม !! ภายใต้อสมมุติฐานให้ความดันกระทำต่อของเหลวปิโตรเลียมหรือของเหลวไฮโดรคาร์บอนด้วยความดันคงที่)

$$V_{15} = V_T \times C_{u15}$$

$$V_{15} = V_{30} \times C_{u15-30}$$

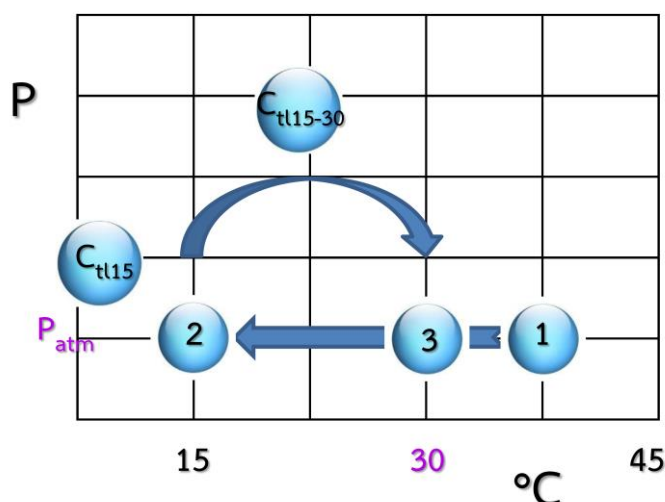
$$V_{30} = \frac{V_{15}}{C_{u15-30}} = \frac{V_T \times C_{u15}}{C_{u15-30}} \quad (\text{Eq.4-34})$$

นั่นคือ

$$C_{u30} = \frac{C_{u15}}{C_{u30-15}} \quad (\text{Eq.4-35})$$

และ

$$V_{30} = V_T \times C_{u130} \quad (\text{Eq.4-36})$$



รูปที่ 4-13 การปรับค่า C_H เทียบกับอุณหภูมิอ้างอิง

เนื่องจากเป็นตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อปริมาตรของเหลวปิโตรเลียมหรือของเหลวไฮโดรคาร์บอน (C_H) ดังนั้นในการศึกษาและทำวิจัยของเหลวปิโตรเลียมหรือของเหลวไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดและแต่ละแหล่งผลิต จึงพบว่ามีคุณสมบัติแตกต่างกันไปในการสนองต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงแบ่งผลิตภัณฑ์ในการหาค่า C_H

5.1 ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG, NGL) เราสามารถหาค่า C_H ได้จาก

- จากตาราง ASTM-IP-API Table 54 หรือ
- จากการคำนวณ C_H จากสูตร (Anhang C DIN 51757 seite 19) โดยแก้ไขปริมาตรไปที่

อุณหภูมิอ้างอิงหรืออุณหภูมิมาตรฐาน 15 °C

$$C_{H15} = [1 + Q \times \Delta T + S \times \Delta T^2] - \frac{[P \times \Delta T + R \times \Delta T^2]}{\rho_{15}} \quad (\text{Eq.4-37})$$

เมื่อ $\Delta T = T - 15 \quad ^\circ\text{C}$

ความหนาแน่น @ 15 °C (kg/m ³)	$P \times 10^3$	$Q \times 10^6$	$R \times 10^3$	$S \times 10^6$
500 - 600	4075	5050	27.5	45
601 - 620	2448.9	2340.9	1.589	1.947
621 - 640	2225.1	1980	1.588	1.946
641 - 650	1936.6	1529.1	1.588	1.946

ตารางที่ 4 -7 ตารางค่าคงที่ P, Q, R และ S ของ Eq.4-37

ข้อมูลเบื้องต้น ก๊าซปิโตรเลียมเหลว LPG ในประเทศไทยจะมีค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 25 °C อยู่ในช่วง 0.554 – 0.556 kg/m³

5.2 น้ำมันดิบ (Crude Oil) สามารถหาค่า C_{15} ได้จาก

- ตาราง **ASTM-IP-API Table 54A** Crude oils up to a density of 1075 kg/m³ หรือ
- จากการคำนวณ C_{15} ด้วยสูตรคำนวณภายใต้เงื่อนไข เมื่อความหนาแน่นน้ำมันดิบ (crude oil) ที่อุณหภูมิมาตรฐาน 15 °C ต้องมีค่าระหว่าง 610.50 ถึง 1075.0 kg/m³ เพื่อแก้ไขปริมาตรไปที่อุณหภูมิอ้างอิงหรืออุณหภูมิมาตรฐาน 15 °C

$$C_{15} = e^{[-\alpha T \times \Delta T \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times \Delta T)]} \quad (\text{Eq.4-38})$$

$$\text{เมื่อ } \Delta T = T - 15 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\alpha T = \frac{K_0}{\rho_{15}^2} + \frac{K_1}{\rho_{15}}$$

$$610.50 < \rho_{15} < 1075.0 \text{ kg/m}^3$$

$$K_0 = 613.9723$$

$$K_1 = 0.0$$

ขอบเขตของช่วงอุณหภูมิของตาราง **ASTM-IP-API Table 54A** ยังคงถูกต้อง นั่นคือ

Density (kg/m ³)	Generalized Crude Oil Temperature (°C)
610.5 - 778.5	-18 - 95
779.0 - 824.0	-18 - 125
824.5 - 1075.0	-18 - 150

5.3 ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมสำเร็จรูป (Fuel oil, Jet Group, Between Jet And Gasoline, Gasoline) สามารถหาค่า C_{15} ได้จาก

- ตาราง **API 54B** (ASTM D 1250-80, API MPMS CH 11.1 Volume VIII Table 54B); Refined petroleum products and aviation fuels up to a density of 1075 kg/m³ หรือ
- จากการคำนวณ C_{15} ด้วยสูตร โดยแก้ไขปริมาตรไปที่อุณหภูมิอ้างอิงหรืออุณหภูมิมาตรฐาน 15 °C (สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงสำเร็จรูป)

$$C_{15} = e^{[-\alpha T \times \Delta T \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times \Delta T)]} \quad (\text{Eq.4-39})$$

$$\text{เมื่อ } \Delta T = T - 15 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\alpha T = \frac{K_0}{\rho_{15}^2} + \frac{K_1}{\rho_{15}} + K_2$$

ρ_{15} เป็นความหนาแน่นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมสำเร็จรูป มีหน่วยเป็น kg/m³

ค่า K_0 , K_1 , K_2 จาก ASTM D1250 (1980) เลือกตามความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิมาตรฐาน 15 °C ดังต่อไปนี้

Product type: **Fuel oil**

$$838.50 < \rho_{15} < 1075.00 \text{ kg/m}^3$$

$$K_0 = 186.9696$$

$$K_1 = 0.4862$$

$$K_2 = 0$$

Product type: **Jet Group**

$$788.00 < \rho_{15} \leq 838.50 \text{ kg/m}^3$$

$$K_0 = 594.5418$$

$$K_1 = 0.0$$

$$K_2 = 0$$

Product type: **Between Jet And Gasoline**

$$770.50 < \rho_{15} \leq 787.50 \text{ kg/m}^3$$

$$K_0 = 2680.3206$$

$$K_1 = 0$$

$$K_2 = -0.00336312$$

Product type: **Gasoline**

$$653.00 < \rho_{15} \leq 770.00 \text{ kg/m}^3$$

$$K_0 = 346.4228$$

$$K_1 = 0.4388$$

$$K_2 = 0$$

และ

Product type: **Naphtha**

$$770.50 < \rho_{15} \leq 787.50 \text{ kg/m}^3$$

$$K_0 = 0.4388$$

$$K_1 = 0$$

$$K_2 = 346.4228$$

Product type: **Lubrication Oil (Table 54D)**

$$K_0 = 0$$

$$K_1 = 0.6278$$

$$K_2 = 0$$

หรือถ้าใช้อุณหภูมิอ้างอิงของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมเป็น 30°C จะใช้สมการหาค่า C_{11} จากสมการ Eq.4-35 ได้ว่า

$$C_{1130} = \frac{C_{1115}}{C_{1130-15}}$$

$$C_{1130} = \frac{e^{[-\alpha T \times \Delta T \times (1+0.8 \times \alpha T \times \Delta T)]}}{e^{[-\alpha T \times 15 \times (1+0.8 \times \alpha T \times 15)]}} \quad (\text{Eq.4-40})$$

เมื่อ C_{d30-15} คือการปรับค่าจากอุณหภูมิ 15 °C ไปยังอุณหภูมิ 30 °C โดย $\Delta T = 30 - 15$ °C

ขอบเขตของช่วงอุณหภูมิของตาราง ASTM-IP-API Table 54B ยังคงถูกต้อง นั่นคือ

Density (kg/m ³)	Generalized Products Temperature (°C)
653.0 - 778.0	-18 - 95
778.5 - 824.0	-18 - 125
824.5 - 1075.0	-18 - 150

ในทางปฏิบัติเราพบกรณีศึกษา ว่าการเลือกใช้ค่า K_0 , K_1 , K_2 ของน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบิน (Jet Group) ในการคำนวณ C_d เนื่องจากค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 15 °C ของน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินผิดเนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินมีค่าความหนาแน่นตกอยู่ใน 2 ช่วงของค่าความหนาแน่นคือ $788.00 < \rho_{15} \leq 838.50$ kg/m³ กับ $770.50 < \rho_{15} \leq 787.50$ kg/m³ ดังนั้นต้องเลือกใช้โดยพิจารณาผลการหาค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 15 °C จากห้องปฏิบัติการให้เหมาะสมกับช่วงค่าความหนาแน่นอย่างยืดหยุ่นหรือจำแต่ชื่อผลิตภัณฑ์เท่านั้น

5.4 น้ำ

ค่า $C_d = 1$ เนื่องจากค่า C_d เป็นตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิกระทำต่อปริมาตรของเหลวผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมเท่านั้น อีกทั้งน้ำเป็นสารที่มีการขยายตัวหรือหดตัวต่ำมาก (low coefficient of expansion) เมื่ออุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจึงไม่ต้องนำมาคิดในการคำนวณหาค่าปริมาตรหากใช้น้ำเป็นของเหลวทดสอบ

การเปลี่ยนแปลงค่า C_d ต่ออุณหภูมิ

จากการคำนวณพบว่าพอประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงค่า C_d ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงได้มีค่าประมาณ

$$\begin{aligned}\Delta C_d &= 0.10 \% \text{ Per } ^\circ\text{C} \\ &= 0.06\% \text{ Per } ^\circ\text{F}\end{aligned}\quad (\text{Eq.4-41})$$

6. การแก้ไขค่าสำหรับอิทธิพลของความดันมีผลต่อของเหลว (Correction for the Effect of Pressure on Liquid); C_{pl} หรือ (CPL)

โดยปกติแล้วปริมาตรของเหลวปิโตรเลียมหรือของเหลวไฮโดรคาร์บอนจะหดตัวลงเมื่อได้รับความดันและในขณะเดียวกันปริมาตรของเหลวดังกล่าวก็จะขยายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อความดันที่กระทำอยู่ลดลง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของเหลวปิโตรเลียมหรือของเหลวไฮโดรคาร์บอนจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า compressibility factor (F) ของของเหลวชนิดนั้น ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่น (API Gravity) และอุณหภูมิสำหรับค่า compressibility factor (F) ของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนซึ่งของเหลวปิโตรเลียมหรือของเหลว

ไฮโดรคาร์บอนก็เป็นชนิดหนึ่งของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนนั้น เราสามารถค้นหาได้ใน API Manual of Petroleum Measurement Standards, Chapter 11.2

ด้วยหลักคิดเช่นเดียวกับ C_{tw} แต่เปลี่ยนเงื่อนไข โดยกำหนดสมมติฐานให้อุณหภูมิของเหลวผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมมีค่าคงที่ แต่ให้ความดันกระทำต่อของเหลวผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมด้วยความดันเปลี่ยนแปลง (T คงที่ P เปลี่ยน)

$$M_p = M_0$$

$$V_p \rho_p = V_0 \rho_0$$

$$V_0 = V_p \frac{\rho_p}{\rho_0}$$

$$V_0 = V_p \times C_{pl} \quad (\text{Eq.4-42})$$

เมื่อ

$$C_{pl} = \frac{\rho_p}{\rho_0} \quad (\text{Eq.4-43})$$

ดังนั้นเมื่อรู้ปริมาตรของเหลวซึ่งมีความดันไอต่ำที่ความดันใดๆ (V_p) เราสามารถหาค่าปริมาตรที่ความดันไอสมดุล (Equilibrium Vapor Pressure) สำหรับน้ำและน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นมีความดันไอสมดุลเท่ากับความดันบรรยากาศ 0.0 kPa, gauge แต่ก๊าซปิโตรเลียมเหลว LPG และ NGL มีค่าสูงกว่าความดันบรรยากาศ (V_0)

$$V_0 = V_p \times C_{pl} \quad (\text{Eq.4-44})$$

ในทางกลับกันเมื่อรู้ปริมาตรที่ความดันอ้างอิง (ความดันบรรยากาศ 0.0 kPag ในกรณีน้ำและน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ในกรณีก๊าซปิโตรเลียมเหลว LPG และ NGL มีค่าสูงกว่าความดันบรรยากาศ) (V_0) เราสามารถหาปริมาตรเทียบเท่าที่ความดันใดๆ (P)

$$V_p = \frac{V_0}{C_{pl}} \quad (\text{Eq.4-45})$$

หากพิจารณาในอีกแง่มุมหนึ่งจะพบว่าค่า C_{pl} เป็นค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่ความดันอ้างอิงกับปริมาตรที่ความดัน P (อย่าลืม !! บน สมมติฐานที่อุณหภูมิของเหลวคงที่)

$$C_{pl} = \frac{V_0}{V_p} \quad (\text{Eq.4-46})$$

ดังนั้นตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของความดันกระทำต่อปริมาตรของเหลวผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมเรียกว่า C_{pl} หรือ CPL (the correction factor for the effect of pressure on a volume of the petroleum liquid) คำนวณได้จาก

$$C_{pl} = \frac{1}{1 - (P - P_e)F} \quad (\text{Eq.4-47})$$

C_{pl} = ตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของความดันกระทำต่อปริมาตรของเหลว
ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

P = ค่าความดันเกจขณะวัดปริมาณของเหลว / ความดันที่มาตรวัด kPag

P_e = ความดันไอสมดุล ณ อุณหภูมิที่วัดได้ของเหลวขณะวัดปริมาตรของเหลว (equilibrium
vapor pressure at the measurement temperature of the liquid being
measured) kPag

- น้ำและน้ำมันเชื้อเพลิงเหลว(ของเหลวทุกชนิด $P_e < P_{atm}$ (14.73 Psig)

$$P_e = 0 \text{ kPag (Psig)} \quad (\text{Eq.4-48})$$

- ก๊าซ LPG, Propane, Butane และ NGL พบว่ามีความดันไอสมดุลไม่เท่ากับความดัน
บรรยากาศ $P_e > P_{atm}$ ดังนั้นจึงสามารถหาความดันไอสมดุลได้เมื่อของเหลวที่
อุณหภูมิ T มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$P_e = e^{[(A_0 + A_1 G) + \frac{(B_0 + B_1 G)}{(T+C)}]} \text{ psia} \quad (\text{Eq.4-49})$$

เมื่อ P_e = ความดันไอสมดุลที่อุณหภูมิของเหลวมีค่าเท่ากับ T (psia)

T = อุณหภูมิของเหลว ($-50^\circ\text{F} \leq T \leq 140^\circ\text{F}$) ($^\circ\text{F}$)

G = Relative density ($60^\circ\text{F}/60^\circ\text{F}$) (g/cm^3)

$$(0.490 \leq G \leq 0.676)$$

- สามารถเปิดตาราง ASTM-IP-API Table 23 เพื่อหาค่า
Density ที่อุณหภูมิอ้างอิง 60°F
- สามารถเปิดตาราง ASTM-IP-API Table 21 เพื่อแปลง
ค่า Density ที่อุณหภูมิอ้างอิง 60°F ไปยัง 15°C
- **Rule of Thumb** : $\text{S.G. } 15^\circ\text{C} = \text{S.G. } 60^\circ\text{F} + 0.0002$
หรือ
- สามารถคำนวณได้จาก

$$G = \frac{(-0.03689636 + 1.24446244p_{15} - 0.63291568p_{15}^2 + 0.73861488p_{15}^3 - 0.32478413p_{15}^4)}{0.999012} \quad (\text{Eq.4-50})$$

เมื่อ p_{15} = ความหนาแน่นของเหลวที่อุณหภูมิ 15°C (g/cm^3)

จากสมการข้างบน เมื่อทำการคำนวณผลของเทอมทางขวามือเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ปัดค่าให้มีทศนิยม 11 ตำแหน่งหรือมากกว่า และสมมติให้มีค่าเท่ากับ G_1 จากนั้นนำค่า G_1 ไปคูณด้วย 1,000 ได้ผลลัพธ์เท่าไรบวกด้วย 0.5 นำผลลัพธ์สุดท้ายของการคำนวณปรับให้มีค่าเป็นจำนวนเต็มบวก (integer, INT) แล้วคูณด้วย 0.001 ดังสมการ

$$G = \text{INT}(G_1 \times 1000 + 0.5) \times 0.001 \quad (\text{Eq.4-51})$$

ค่า G จากสมการข้างบนนี้จะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0.350 ถึง 0.637 เนื่องจากเป็นช่วงขอบเขตผลิตภัณฑ์ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ที่กำลังพิจารณา

C = ค่าคงที่ เท่ากับ 443 °F

A_0, A_1, B_0 และ B_1 = ค่าคงที่ หาได้จากตารางต่อไปนี้

ช่วงของ Relative Density(G) (g/cm^3)	A_0	A_1	B_0	B_1
$0.450 \leq G < 0.490^3$	7.9907	7.562	1895.5	-10596.9
$0.490 \leq G \leq 0.510$	-6.4747 ± 0.7023	37.083 ± 1.405	12038.0 ± 335.5	-31296.5 ± 671.0
$0.510 < G < 0.560$	11.5454 ± 1.1657	1.7490 ± 1.164	1378.8 ± 360.9	-10396.1 ± 555.9
$0.560 \leq G \leq 0.585$	6.4827 ± 0.4220	10.790 ± 0.735	3721.5 ± 201.6	-14579.5 ± 351.3
$0.585 < G < 0.625$	6.5412 ± 3.1017	10.690 ± 5.201	6514.5 ± 518.1	-19353.9 ± 736.3
$0.625 \leq G \leq 0.676$	20.8537 ± 3.7280	-12.210 ± 5.722	-6765.6 ± 489.0	1894.3 ± 750.6

ตารางที่ 4 -8 ตารางค่าคงที่ A_0, A_1, B_0 และ B_1 ของ Eq.4-49

³ API Manual of Petroleum Measurement Standard, Chapter 11 – Physical Properties Data, Section 2, Part 5– A Simplified Vapor Pressure Correlation for Commercial NGLs, ASTM Technical Publication, (Stock No. PETROLTBL-TP15) GPA Technical Publication TP-15, September 2007

F = Compressibility Factor for Liquid

- น้ำ

$$F = 3.2 \times 10^{-6} / \text{Psig} \quad (\text{Eq.4-52})$$
$$= 4.6 \times 10^{-6} / \text{kPag}$$

- น้ำมันเชื้อเพลิง สามารถหาค่าได้จาก

- API Manual of Petroleum Measurement Standards, Chapter 11.2.1M (ภายในช่วง -30 – 90 °C และ ความหนาแน่น 638-1074 kg/m³) หรือ
- จากการคำนวณได้จากสูตร

$$F = e^{\left(\frac{-1.6208 + 0.0002159T}{\rho_{15}^2} + \frac{0.87096}{\rho_{15}^2} + \frac{0.0042092T}{\rho_{15}^2} \right)} \times 10^{-6} / \text{kPa} \quad (\text{Eq.4-53})$$

เมื่อ T = อุณหภูมิน้ำมันเชื้อเพลิง, °C

ρ_{15} = ความหนาแน่นของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ 15 °C; g/cm³

- ก๊าซปิโตรเลียมเหลว LPG และ NGL

- API Manual of Petroleum Measurement Standards, Chapter 11.2.2M (ภายในช่วง -46 – 60 °C และ ความหนาแน่น 350-636 kg/m³) หรือ
- จากการคำนวณได้จากสูตร

$$F = \frac{1}{A + ((P_m - P_e) \times B)} \quad (\text{Eq.4-54})$$

เมื่อ P_m = ความดันขณะวัดของเหลว / ความดันที่มาตรวัด (kPag)

P_e = ความดันไอสมดุลของก๊าซปิโตรเลียมเหลว LPG และ NGL (kPag)
ซึ่งหาค่าได้จากสมการ Eq.4-49 มีค่าในหน่วย psia ดังนั้นต้องแปลงค่าเป็น Kpaa ก่อนด้วย

$$\text{Eq.4-49 } \text{psi absolute} \times 6.894757 = \text{kPa absolute} \quad (\text{Eq.4-55})$$

$$\text{kPa absolute} - 101.3 \text{ kPa} = \text{kPa gauge} \quad (\text{Eq.4-56})$$

$$\begin{aligned} A \times 10^{-5} = & (-2.1465891 \times 10^{-6} \times TR^2) + (1.5774390 \times 10^{-5} \times TR^2 \times G^2) \\ & - (1.0502139 \times 10^{-5} \times TR^2 \times G^4) + (2.8324481 \times 10^{-7} \times TR^3 \times G^6) \\ & - (0.95495939) + (7.2900662 \times 10^{-8} \times TR^3 \times G^2) \\ & - (2.7769343 \times 10^{-7} \times TR^3 \times G^4) + (0.03645838 \times TR \times G^2) \\ & - (0.051101158 \times TR \times G) + (0.00795529 \times TR) \\ & + 9.13114910 \times G \quad (\text{หน่วย psi}) \quad (\text{Eq.4-57}) \end{aligned}$$

เปลี่ยนค่า A ให้อยู่ในหน่วย kPa. ก็ให้คูณด้วย 6.894757

$$A(\text{kPa}) = A(\text{psi}) \times 6.894757 \quad \text{kPa} \quad (\text{Eq.4-58})$$

จากสมการข้างบน เมื่อทำการคำนวณผลของเทอมทางขวามือเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ปัดค่าให้มีทศนิยม 11 ตำแหน่งหรือมากกว่านี้ก็จะเป็นการดียิ่งขึ้น แล้วสมมติให้มีค่าเท่ากับ A_1 จากนั้นนำค่า A_1 ไปคูณด้วย 10^5 ได้ผลลัพธ์เท่าใดบวกด้วย 0.5 นำผลลัพธ์สุดท้ายของการคำนวณปรับให้มีค่าเป็นจำนวนเต็มบวก (integer, INT) ดังสมการ

$$A = \text{INT}(A_1 \times 100000 + 0.5) \quad \text{kPa} \quad (\text{Eq.4-59})$$

$$B \times 10^{-8} = -6.0357667 \times 10^{-10} \times \text{TR}^2 + 2.2112678 \times 10^{-6} \times \text{TR} \times G^2 + 0.00088384 \times G - 0.00204016 \times G^2 \quad (\text{Eq.4-60})$$

จากสมการข้างบน เมื่อทำการคำนวณผลของเทอมทางขวามือเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ปัดค่าให้มีทศนิยม 11 ตำแหน่งหรือมากกว่า แล้วสมมติให้มีค่าเท่ากับ B_1 จากนั้นนำค่า B_1 ไปคูณด้วย 10^8 ได้ผลลัพธ์เท่าไรบวกด้วย 0.5 นำผลลัพธ์สุดท้ายของการคำนวณปรับให้มีค่าเป็นจำนวนเต็มบวก (integer, INT) แล้วคูณด้วย 0.001 ดังสมการ

$$B = \text{INT}(B_1 \times 100000000 + 0.5) \times 0.001 \quad (\text{Eq.4-61})$$

เมื่อ

TR = อุณหภูมิ หน่วยเป็นองศา Rankine

$$\text{TR} (^{\circ}\text{Rankine}) = ^{\circ}\text{F} + 459.67 \quad \text{และ} \quad ^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} (^{\circ}\text{C}) + 32$$

ดังนั้น

$$\text{TR} (^{\circ}\text{Rankine}) = \left(\frac{9}{5} \times T (^{\circ}\text{C}) + 32.0 \right) + 459.67 \quad (\text{Eq.4-62})$$

G = Relative Density (60 °F/60 °F) (g/cm^3) สามารถคำนวณได้จาก

$$G = \frac{(-0.03689636 + 1.24446244p_{15} - 0.63291568p_{15}^2 + 0.73861488p_{15}^3 - 0.032478413p_{15}^4)}{0.999012} \quad (\text{g}/\text{cm}^3) \quad (\text{Eq.4-63})$$

p_{15} = ความหนาแน่นของ LPG, NGL ที่ 15 °C; g/cm^3

จากสมการข้างบน เมื่อทำการคำนวณผลของเทอมทาง
ขวามือเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ปัดค่าให้มีทศนิยม 11 ตำแหน่ง
หรือมากกว่า แล้วสมมุติให้มีค่าเท่ากับ G_1 จากนั้นนำค่า G_1
ไปคูณด้วย 1,000 ได้ผลลัพธ์เท่าไรบวกด้วย 0.5 นำผลลัพธ์
สุดท้ายของการคำนวณปรับให้มีค่าเป็นจำนวนเต็มบวก
(integer, INT) แล้วคูณด้วย 0.001 ดังสมการ

$$G = \text{INT}(G_1 \times 1000 + 0.5) \times 0.001 \quad (\text{Eq.4-64})$$

ค่า G จากสมการข้างบนนี้จะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0.350 ถึง
0.637 จึงจะนำไปแทนในสมการหาค่า A และ B ได้

การเปลี่ยนแปลงค่า C_{pl} ต่อความดัน

จากการคำนวณพบว่าพอประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงค่า C_{pl} ต่อความดันที่เปลี่ยนแปลงได้มีค่าประมาณ

$$\begin{aligned} \Delta C_{pl} &= 0.01 \% \quad \text{Per bar} \\ &= 0.0007\% \quad \text{Per psig} \end{aligned} \quad (\text{Eq.4-65})$$

Product Description	Equilibrium Vapour Pressure at 15 °C	Density Correction Factor	Volume Correction Factor (VCF)	Pressure Correction Factor (C_{pl})
Propane, butane	>101.325 kPa	ASTM-IP Table 53	ASTM-IP Table 54 (mean density .510)	API chapter 11.2.2 M
Gasoline, diesel	<101.325 kPa	API chapter 11.1 Table 53B	API chapter 11.1 Table 54B (mean density .730/gas and .840/diesel)	API chapter 11.2.1 M
Jet A fuel	<101.325 kPa	API chapter 11.1 Table 53B	API chapter 11.1 Table 54B (mean density .800)	API chapter 11.2.1 M
Jet B fuel	<101.325 kPa	API chapter 11.1 Table 53A	API chapter 11.1 Table 54A (mean density .760)	API chapter 11.2.1 M
Lubricating oils	<101.325 kPa	API chapter 11.1 Table 53D	API chapter 11.1 Table 54D (mean density .880)	API chapter 11.2.1 M
Other products	Please refer to the applicable bulletin for tables approved for specific non petroleum-based products.			

ตารางที่ 4 -9 การเลือกใช้ตารางตัวแปรแก้ไขค่า C_d , C_{pl} และ Density

ความสัมพันธ์ C_{tl} (CTL), C_{pl} (CPL), C_{ts} (CTS), C_{ps} (CPS) และ C_{tw} (CTW)

เราแบ่งบทบาทตัวแก้ไขค่าปริมาณ 5 ตัวที่เหลือนอกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ในการทำหน้าแก้ไขปรับค่าปริมาณในการคำนวณผลการสอบเทียบ และ/หรือตรวจสอบให้คำรับรอง คือ

1. **Liquid Density Correction Factors** การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น (ปริมาตร) ของของเหลวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันของของเหลว ซึ่งได้แก่ C_{tl} (CTL), C_{pl} (CPL) และ C_{tw} (CTW)

เมื่อของเหลวมีความดันคงที่ & อุณหภูมิเปลี่ยน

$$V_o = V_T \times C_{tl}$$

เมื่อของเหลวมีอุณหภูมิคงที่ & ความดันเปลี่ยน

$$V_o = V_p \times C_{pl}$$

เมื่อของเหลวมีอุณหภูมิเปลี่ยน & ความดันเปลี่ยน

$$V_o = V_{TP} \times C_{tl} \times C_{pl}$$

2. **Prover and Field Measure Steel Correction Factors** การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของแบบมาตราและเครื่องชั่งตวงวัดที่ต้องการสอบเทียบเมื่ออุณหภูมิและความดันของแบบมาตราและเครื่องชั่งตวงวัดที่ต้องการสอบเทียบมีอุณหภูมิและความดันสอบเทียบต่างจากอุณหภูมิและความดันอ้างอิง ได้แก่ C_{ts} (CTS), C_{ps} (CPS) และ C_{tw} (CTW)

เมื่อของเหลวมีความดันคงที่ & อุณหภูมิเปลี่ยน

$$V_T = V_o \times C_{ts}$$

เมื่อของเหลวมีอุณหภูมิคงที่ & ความดันเปลี่ยน

$$V_P = V_o \times C_{ps}$$

เมื่อของเหลวมีอุณหภูมิเปลี่ยน & ความดันเปลี่ยน

$$V_{TP} = V_o \times C_{ts} \times C_{ps}$$

หลักการคำนวณค่าตัวแปรแก้ไขค่าปริมาณ (Correction Factors) และการปิดค่า

ในการคำนวณโดยใช้ตัวแปรแก้ไขค่าปริมาณทั้ง 6 ตัวนี้มีหลักการคำนวณโดยให้กระทำการคูณ/หารตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมด (ของแต่ละตัวแปรแก้ไขค่าปริมาณ) เสียก่อนจากนั้นให้ทำการปิดค่าตามที่กำหนดไว้ว่ามีค่าสำคัญเท่าไร แล้วจึงนำตัวแปรแก้ไขค่าปริมาณซึ่งถูกปิดค่าตามค่าสำคัญที่กำหนดไว้แต่ละตัวไปคูณ/หารด้วยกับตัวแปรแก้ไขค่าปริมาณที่เหลือนั้นหมายถึงการคำนวณควรกระทำการคูณ/หารเฉพาะตัวแปรแก้ไขค่าปริมาณด้วยกันเสียก่อนโดยให้มีการปิดค่าตามหลักการที่กำหนดให้เสร็จสิ้นเสียก่อนที่จะนำค่าสุดท้ายของผลคูณหารตัวแปรแก้ไขค่าปริมาณทั้งหมดไปคูณ/หารกับค่าปริมาตรที่ต้องการปรับแก้ไขค่า

Table 1—Hierarchy of Accuracies

Paragraph	Level	Correction Factors and Intermediate Calculations to	Volumes. Significant Digits	Temperature Discrimination. to at least. °F
12.2.6	Prover calibration	6 decimal places*	5	0.1
12.2.7	Meter proving	4 decimal places	5	0.5
12.2.8	Measurement tickets	4 decimal places	5	1.0

* Values are not valid beyond four decimal places for the purpose of correcting volumes to 60°F. However, for correcting for small temperature differences between a meter and a prover, linear interpolation to more decimal places is acceptable.

ตารางที่ 4 -10 การปิดทศนิยมในการสอบเทียบของตัวแปรแก้ไขค่า MF, C_{tw} , C_{ts} , C_{ps} , C_{tl} , C_{pl} ตาม API MPMS, Chapter 12, Section 2 Calculation of Petroleum Quantities Measured by Turbine or Displacement Meter, 1st edition, Sept. 1981 / Reaffirmed, October 1995 / Reaffirmed 3, 2002

ในกรณีการหาปริมาตรของแบบมาตรา (Prover Calibration) เช่น ถังตวงแบบมาตรา (tank prover), ท่อสอบเทียบ (pipe prover) และท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (compact prover)

- ให้คำนวณค่าตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณ (Correction Factors) ด้วยกันทั้งหมดเสียก่อนและการคำนวณใดๆที่เกิดขึ้นก่อนนำค่าไปคูณ/หารกับปริมาตรที่ต้องการแก้ไขค่า (Intermediate Calculations) กำหนดให้มี**ค่าทศนิยม 6 ตำแหน่ง (6 decimal places)**
- การนำผลการคำนวณจากขั้นตอนแรกข้างบนคูณ/หารกับปริมาตรที่ต้องการแก้ไขค่าเพื่อให้ได้ปริมาตรที่สภาวะมาตรฐาน กำหนดให้มี**ค่าเลขนัยสำคัญ 5 นัยสำคัญ (5 significant digits)**
- ใช้เทอร์โมมิเตอร์มีค่าความสามารถอ่านได้ละเอียด (Temperature Discrimination) 0.1 °F หรือ 0.05 °C

ในกรณีสอบเทียบหรือตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัด (Meter Proving) เช่น ทำการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวชนิด P.D. meter หรือมาตรวัดเทอร์โบมิเตอร์

- ให้คำนวณค่าตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณ (Correction Factors) ด้วยกันทั้งหมดเสียก่อน และการคำนวณใดๆที่เกิดขึ้นก่อนนำค่าไปคูณ/หารกับปริมาตรที่ต้องการแก้ไข (Intermediate Calculations) กำหนดให้มี**ค่าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (4 decimal places)**
- การนำผลการคำนวณจากขั้นตอนแรกข้างบนคูณ/หารกับปริมาตรที่ต้องการแก้ไขเพื่อให้ได้ปริมาตรที่สภาวะมาตรฐาน กำหนดให้มี**ค่าเลขนัยสำคัญ 5 นัยสำคัญ (5 significant digits)**
- ใช้เทอร์โมมิเตอร์มีค่าความสามารถอ่านได้ละเอียด (Temperature Discrimination) 0.5°F หรือ 0.25°C

หลักการปัดตัวเลขนัยสำคัญ

1. ถ้าตัวเลขที่อยู่ข้างหลังเลขนัยสำคัญตัวสุดท้าย มีค่าน้อยกว่า 5 ให้ตัวเลขนัยสำคัญไว้คงเดิม เช่น 2.541 ถ้าต้องการเลขนัยสำคัญ 2 ตัว จะกลายเป็น 2.5
2. ถ้าตัวเลขที่อยู่ข้างหลังเลขนัยสำคัญตัวสุดท้าย มีค่ามากกว่า 5 ให้ปัดตัวเลขนัยสำคัญตัวสุดท้ายขึ้น เช่น 2.463 ถ้าต้องการเลขนัยสำคัญ 2 ตัว จะกลายเป็น 2.5
3. ถ้าตัวเลขที่อยู่ข้างหลังเลขนัยสำคัญตัวสุดท้าย มีค่าเท่ากับ 5 ให้ดูตัวเลขนัยสำคัญตัวสุดท้าย ถ้าเป็นเลขคู่ให้ปัดขึ้นอีกหนึ่ง ถ้าเป็นเลขคู่ให้คงเดิม เช่น 2.450 ต้องการเลขนัยสำคัญ 2 ตัว จะกลายเป็น 2.4 และถ้าเป็น 2.550 จะกลายเป็น 2.6
4. ถ้าตัวเลขที่อยู่ข้างหลังเลขนัยสำคัญตัวสุดท้าย มีหลายตัว การคิดว่าเกิน 5 หรือไม่ให้คิดทั้งกลุ่ม เช่น 2.4501 ค่า 501 ถือว่ามีค่ามากกว่า 5 ขณะที่ 2.5499 ค่า 499 ถือว่าน้อยกว่า 5

หมายเหตุ

การกำหนดสัญลักษณ์เพิ่มเติมห้อยท้ายตัวแปรแก้ไขค่า (collection factors) และตัวแปรต่างๆ เช่น ปริมาตร, ความหนาแน่น เป็นต้น

"T" = เมื่อของเหลวมีความดันคงที่ & อุณหภูมิเปลี่ยน

“P”	=	เมื่อของเหลวมีอุณหภูมิคงที่ & ความดันเปลี่ยน
“TP”	=	เมื่อของเหลวมีอุณหภูมิเปลี่ยน & ความดันเปลี่ยน
“OP”	=	เมื่อของเหลวมีสถานะอุณหภูมิอ้างอิง & ความดันวัดได้
“T0”	=	เมื่อของเหลวมีอุณหภูมิวัดได้ & สถานะความดันอ้างอิง
“O”	=	เมื่อของเหลวมีสถานะอุณหภูมิอ้างอิง & ความดันวัดได้
“P”	=	Prover; ถังตวง (prover tank) ท่อทดสอบความจุ (pipe prover)
“m”	=	มาตรวัด (meter)
“M”	=	แบบมาตรา (measure)
“MM”	=	มาตรวัดมาตรฐาน (master meter)
“CP”	=	ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Compact Prover)

ตัวอย่าง

V_{TOP}	=	ปริมาตรของถังตวงที่สถานะความดันอ้างอิง & อุณหภูมิขณะสอบเทียบ
V_{OPm}	=	ปริมาตรของมาตรวัดที่สถานะอุณหภูมิอ้างอิง & ความดันขณะสอบเทียบ
V_{Om}	=	ปริมาตรของมาตรวัดที่สถานะอ้างอิง (อุณหภูมิ & ความดัน)

บทที่ 5

การสอบเทียบเครื่องตวงขนาดเล็กโดยวิธีชั่งน้ำหนัก

(Gravimetric Calibration of Small Volume Measuring Device)

งานชั่งตวงวัดในเชิงกฎหมาย (Legal Metrology) มีงานด้านหนึ่งซึ่งเป็นงานประยุกต์และเชื่อมต่อกันเป็นเนืองงานเดียวกันคืองานสินค้าหีบห่อ (Prepackaged Good) ซึ่งมีวิธีการทำงานกำกับดูแลการบรรจุสินค้าอุปโภคและบริโภคโดยผ่านเครื่องชั่งตวงวัดให้ได้มาซึ่ง “ปริมาณสุทธิ (Net Content)” ที่ถูกต้องเที่ยงตรง ดังนั้นการดูแลเครื่องชั่งตวงวัดควรดูแลช่วงพักดักกำลังมากน้อยเพียงใดจึงต้องกลับมาดูว่าปริมาณสุทธิสินค้าหีบห่อในหลักการควร มีน้ำหนัก ปริมาตร ความยาวเท่าไรและอะไรคือสินค้าหีบห่อ สินค้าหีบห่อน่าจะมีองค์ประกอบหลักในการพิจารณา 2 หลักเท่าที่นึกออกนั่นคือ ต้องมีน้ำหนักที่คนไทยขายหญิงยกได้สะดวกไม่กินแรงหรือหนักมากจนเกินไป ก็ตีไว้ไม่น่าเกิน 20 กิโลกรัมก็สุดๆ แล้ว เหตุเพราะว่าสินค้าหีบห่อเกิดจากภาวะสงครามที่ต้องรักษาคุณภาพอาหารให้ยาวนานและสามารถทนต่อสภาพการขนส่งได้ระดับหนึ่งอีกทั้งสามารถพกพาและแจกจ่ายได้สะดวกต่อการครอบครองของคน 1 คน องค์ประกอบที่ 2 คือความเป็นสินค้าหีบห่อจะไม่สามารถเป็นสินค้าหีบห่อได้ทันทีที่สิ่งห่อหุ้มสินค้าเสียหายฉีกขาดรั่วซึมและไม่สามารถห่อหุ้มกลับไปอยู่ในสภาพเดิมด้วยสิ่งห่อหุ้มเดิม แต่หากจะห่อหุ้มใหม่ก็น่าจะได้ครับ แต่ความเป็นสินค้าหีบห่อเดิมแปลงสภาพเป็นสินค้าหีบห่อใหม่คงต้องตรวจใหม่เพราะไม่สามารถวินิจฉัยได้ว่าสินค้าเดิมมีปริมาณอยู่ครบเท่าเดิมหรือไม่ ต้องพิจารณาเป็นรายกรณีไป

ดังนั้นแบบมาตราที่เหมาะสมที่ใช้ในการปฏิบัติงานในการกำกับดูแลงานสินค้าหีบห่อในกรณีของเครื่องตวงจึงน่าจะอยู่ในพิสัยกำลังไม่เกิน 2 ลิตร อีกทั้งเครื่องมือที่ใช้ในการทำงานในการหาความหนาแน่นของของเหลวก็น่าจะอยู่ในช่วงพิสัยกำลังไม่เกิน 2 ลิตรเช่นกัน ในบทนี้เราจะจับกลุ่มเป้าหมายเครื่องตวงขนาดเล็ก คือ ขวดแก้วกันโป่งหรือพลาสติก (Flasks), กระบอกแก้ว (Graduated cylinders), พิกะโนมิเตอร์ (Pyknometer) และลูกจุ่ม (Spherical displacement float or Plummets) เพื่องานสินค้าหีบห่อ และงานชั่งตวงวัดอื่นๆที่ต้องใช้เครื่องตวงขนาดเล็ก

1. เครื่องตวงขนาดเล็ก (Small Volume Measuring Device)

ก่อนอื่นเราต้องมาทำความเข้าใจถึงลักษณะเครื่องตวงขนาดเล็กโดยเฉพาะจำพวกเครื่องตวงที่เป็นเครื่องแก้วว่า ในการระบุพิสัยกำลังเครื่องตวงชนิดนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะตามวัตถุประสงค์การใช้งานว่าต้องการตวงปริมาตรเป็นแบบรับด้วยต้องการทราบค่าของเหลวที่มีปริมาตรเท่าไร หรือต้องการตวงปริมาตรเป็นแบบจ่ายเพื่อจ่ายของเหลวออกจากเครื่องตวงเป็นเท่าไร การระบุพิสัยกำลังของเครื่องแก้วจึงมี 2 แบบคือ

พิสัยกำลังความจุแบบรับ (contained, “to contain”, “TC” , “In”) ที่ขีดขึ้นหมายมาตราใดๆ ของเครื่องแก้ว คือ ค่าปริมาตรของน้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอ้างอิงที่บรรจุอยู่ในเครื่องแก้วจนถึงระดับขีดขึ้น

หมายความว่าค่าเท่ากับค่าปริมาตรที่ระบุอยู่บนเครื่องแก้วนั้น แต่เมื่อเทน้ำออกไปปริมาตรจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเนื่องจากมีน้ำค้างและติดผนังด้านในเครื่องแก้วนั้นๆ

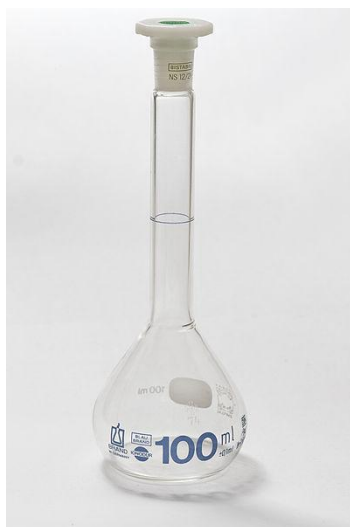
พิกัดความจุแบบจ่าย (delivered, “to delivery”, “TD”, “Ex”) ที่ขีดชั้นหมายความว่าใดๆ ของ **เครื่องแก้ว** คือ ค่าปริมาตรของน้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอ้างอิงที่ **เทออก** จากเครื่องแก้วมีค่าเท่ากับค่าปริมาตรที่ระบุอยู่บนเครื่องแก้วนั้นหลังจากใส่น้ำลงในขวดจนถึงระดับขีดชั้นหมายความว่านั้นๆ โดยได้ถูกหักลบจากปริมาตรคางและติดผนังด้านในเครื่องแก้วเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

เครื่องตวงขนาดเล็กในบทนี้ครอบคลุมถึง

1.1. ขวดแก้วก้นโป่ง หรือ ฟลาสค์ (Flasks)

ขวดแก้วก้นโป่ง หรือ ฟลาสค์ (Flasks) ที่มีอยู่จะมีลักษณะการใช้งานใน 2 ลักษณะคือเป็นแบบรับ (“to contain”, “TC”, “In”) และแบบจ่าย (“to delivery”, “TD”, “Ex”) แต่การใช้งานส่วนใหญ่ทางด้านสินค้าหีบห่อมักจะใช้งานในลักษณะแบบรับเสียเป็นส่วนใหญ่ เช่น วั้ตรวจสอบปริมาตรสุทธิน้ำปลา 1,000 มิลลิลิตร เป็นต้น นอกจากนี้ยังแบ่งเป็น

1.1.1. **ขวดแก้วก้นโป่งแบบขีดชั้นหมายความว่าเดียว (volumetric flask with single gauge mark)** จะมีขีดชั้นหมายความว่าเดียวบริเวณคอขวดแก้วดังรูปที่ 5-1 โดยขีดชั้นหมายความว่าของขวดแก้วก้นโป่งคือ ค่าปริมาตรของน้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอ้างอิง (เช่น 20 °C) เมื่อ **บรรจุ** อยู่ในขวดจนถึงระดับขีดชั้นหมายความว่านั้น ขวดแก้วก้นโป่งแบบขีดชั้นหมายความว่าเดียวนี้จะใช้เป็นมาตราแบบรับเสียส่วนใหญ่



รูปที่ 5-1 ขวดแก้วก้นโป่งแบบขีดชั้นหมายความว่าเดียว

มีพิกัดความจุตั้งแต่ 5, 10, 25, 50 , 100, 200, 250, 500, 1000, 2000, cm³ (หรือ ml) แต่บางครั้งอาจจะมีพิกัดต่างไปจากข้างต้น ก็จะมีไว้ใช้เป็นกรณีพิเศษ ขีดชั้นหมายความว่าของขวดแก้วก้นโป่งต้องมีความหนาไม่เกิน 0.4 มม. และต้องเป็นเส้นต่อเนื่องมีแนวระนาบขนานกับพื้นราบ ในตำแหน่งที่สูงไม่เกินระยะ 2 ใน 3 ของคอขวด สำหรับการระบุชั้นความเที่ยงซึ่งมี 2 ชั้นความเที่ยงคือ “A” และ “B” ให้ระบุเห็นได้ชัดเจน

ค่าผลผิดพลาดที่ยอมให้ได้สูงสุด (maximum permissible error) ขวดแก้วก้นโป่งขีดชั้นหมายความว่าเดียวที่พิกัดต่างๆ ได้กำหนดค่าผลผิดพลาดที่ยอมให้สูงสุดตามอัตราเพื่อเหลือเผื่อขาดไว้ในตารางที่ 5-1 โดยแบ่งตามชั้นความถูกต้อง “class A” และ “class B”

1.1.2. ขวดแก้วก้นโป่งแบบมีหลายขีดชั้นหมายมาตรา (Graduated glass flask) มีลักษณะดังรูปที่ 5-2 และขนาดของขวดแก้วก้นโป่งที่มีหลายขีดชั้นหมายมาตราจะถูกกำหนดตามตารางที่ 5-2 และตารางที่ 5-3 ทั้งนี้พิสัยความจุของขวดแก้วก้นโป่งแบบมีหลายขีดชั้นหมายมาตราแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

พิสัยความจุแบบรับ (contained) ที่ขีดชั้นหมายมาตราใดๆ ของขวดแก้วก้นโป่งแบบมีหลายขีดชั้นหมายมาตราคือ ค่าปริมาตรของน้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอ้างอิงที่บรรจุอยู่ในขวดจนถึงระดับขีดชั้นหมายมาตรานั้น

พิสัยความจุแบบจ่าย (delivered) ที่ขีดชั้นหมายมาตราใดๆ ของขวดแก้วก้นโป่งแบบมีหลายขีดชั้นหมายมาตราคือ ค่าปริมาตรของน้ำที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอ้างอิงที่เทออกจากขวด หลังจากใส่น้ำลงในขวดจนถึงระดับขีดชั้นหมายมาตรานั้นๆ

พิสัยความจุของขวดแก้วแบบนี้ จะอยู่ในหน่วยลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3) หรือ มิลลิลิตร (ml) และลูกบาศก์เดซิเมตร (dm^3) หรือ ลิตร (l)

ขวดแก้วก้นโป่งแบบมีหลายขีดชั้นหมายมาตรา จะมีพิสัยความจุ (nominal capacity) ดังนี้

$$1 \times 10^n \text{ dm}^3, 2 \times 10^n \text{ dm}^3, 5 \times 10^n \text{ dm}^3$$

เมื่อ n ตัวเลขจำนวนเต็มบวก, ลบ หรือศูนย์

สำหรับการใช้งานพิเศษอาจจะมีพิสัยความจุเป็น 250 cm^3 และ 2.5 dm^3

Nominal capacity	Maximum permissible errors in nominal capacity		Internal diameter of neck at level of gauge mark	Minimum distance between gauge mark and any point at which neck begins to widen out
	Class A	Class B	Classes A and B	Classes A and B
cm^3	$\pm \text{cm}^3$	$\pm \text{cm}^3$	mm	mm
5	0.025	0.05	6 – 8	5
10	0.025	0.05	6 – 8	5
25	0.04	0.08	8 – 10	5
50	0.06	0.12	10 – 12	10
100	0.10	0.20	12 – 14	10
200	0.15	0.30	14 – 17	10
250	0.015	0.30	14 – 17	10
500	0.25	0.50	17 – 21	15
1000	0.40	0.80	21 – 25	15
2000	0.60	1.20	25 – 30	15

ตารางที่ 5-1 อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดของขวดแก้วก้นโป่งขีดชั้นหมายมาตราเดียวตาม OIML R4, 1972

โดยทั่วไปอุณหภูมิอ้างอิงของขวดแก้วกันโป่งแบบมีหลายขีดชั้นหมายมาตราทั้งแบบรับและแบบจ่าย คือ 20 °C แต่บางประเทศอาจจะใช้งานที่อุณหภูมิเกินกว่า 20 °C หรือไม่ต้องการอุณหภูมิอ้างอิงเป็น 20 °C ก็อาจใช้อุณหภูมิอ้างอิงเป็น 27 °C ก็ได้

ค่าผลผลิตที่ยอมให้ได้สูงสุด (maximum permissible error) ดูตามตารางที่ 5-4

- ค่าผลผลิตที่ยอมให้ได้สูงสุดสำหรับขวดกันโป่งแบบรับ (“to contain”, “TC”, “In”) ที่ขีดชั้นหมายใดๆ มีค่าตามตารางช่อง E1
- ค่าผลผลิตที่ยอมให้ได้สูงสุดสำหรับขวดกันโป่งแบบรับ (“to contain”, “TC”, “In”) ที่ระหว่าง 2 ขีดชั้นหมายใดๆ มีค่าตามตารางในช่อง E2
- ค่าผลผลิตที่ยอมให้ได้สำหรับขวดกันโป่งแบบจ่าย (“to delivery”, “TD”, “Ex”) ที่ขีดชั้นหมายใดๆ มีค่าเป็น 1.5 เท่าของค่าในตารางช่อง E1
- ค่าผลผลิตที่ยอมให้ได้สำหรับขวดกันโป่งแบบจ่าย (“to delivery”, “TD”, “Ex”) ที่ระหว่าง 2 ขีดชั้นหมายใดๆ มีค่าเป็น 1.5 เท่าของค่าในตารางช่อง E2

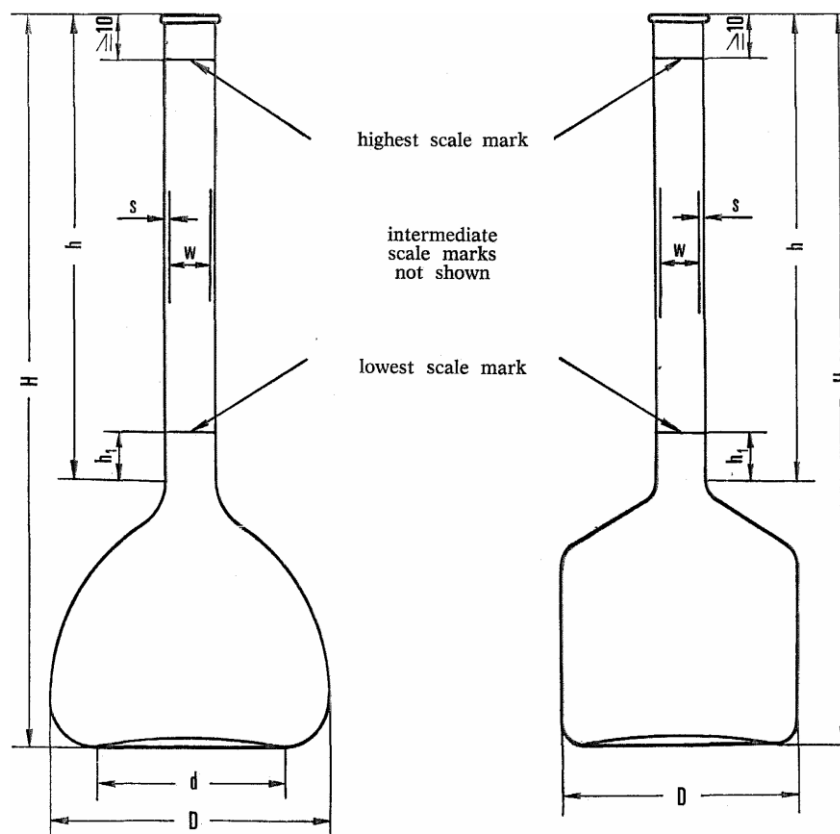


Figure 1
(flasks of 10 cm³ to 10 dm³)
TYPE « A »

Figure 2
(flasks of 1 dm³ to 10 dm³)
TYPE « B »

รูปที่ 5-2 ขวดแก้วกันโป่งแบบมีหลายขีดชั้นหมายมาตราตาม OIML R43, 1981

DIMENSIONS OF STANDARD GRADUATED FLASKS

Nominal capacity	Inside diameter of flask neck (W)		Length of neck (h)	Distance h_1 ^(*) min.	Diameter of flask body			Flask height (H)	Wall thickness (s) min
					Type A flasks figure 1		Type B flasks figure 2		
	Min	Max			(D) approx.	(d) approx.	(D) approx.		
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
10 cm ³	6.0	8.0	55 to 70	5	27	18	—	90	0.8
20	8.0	10.0	75 to 95	5	35	25	—	110	0.8
50	10.0	12.0	90 to 110	10	50	35	—	140	1
100	12.0	14.0	110 to 125	10	60	40	—	170	1
200	14.0	17.0	115 to 130	10	75	50	—	210	1
500	17.0	21.0	130 to 150	15	100	70	—	260	1.3
1 dm ³	21.0	25.0	175 to 200	15	125	85	105	300	1.5
2	25.0	30.0	195 to 220	15	160	110	135	370	1.5
5	35.0	41.0	215 to 240	20	220	160	180	450	2.5
10	44.0	52.0	245 to 280	20	275	210	230	550	3

standard graduated flasks for special uses

250 cm ³	14.0	17.0	115 to 130	10	80	55	—	220	1.3
2.5 dm ³	28.0	32.0	200 to 220	15	175	130	145	390	1.5

^(*) h_1 is the distance between the lowest scale mark, and the point at the base of the neck at which the flask diameter changes (see fig. 1).

ตารางที่ 5-2 ขนาดขวดแก้วก้นโป่งแบบมีหลายขีดชั้นหมายมาตรตาม OIML R43, 1981

SCALES FOR STANDARD GRADUATED FLASKS

Nominal capacity	Volumetric scale range	Scale interval		Numbering
		Type A	Type B	
	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³
10 cm ³	± 1	0.1		1
20	± 1.6	0.1		1
50	± 3	0.2		1
100	± 4	0.5		2
200	± 6	0.5		5
500	± 10	1		5
1 dm ³	± 20	1	2	Type A : 5 Type B : 10
2	± 30	2	5	10
5	± 50	5	10	50
10	± 150	10	20	Type A : 50 Type B : 100

standard graduated flasks for special uses

250 cm ³	± 6	0.5	1	5
2.5 dm ³	± 30	2	5	10

ตารางที่ 5-3 ขีดชั้นหมายมาตรขนาดแก้วก้นโป่งแบบมีหลายขีดชั้นหมายมาตรตาม OIML R43, 1981

Maximum permissible errors for the « contained » capacity (« In »)

Nominal capacity	Maximum permissible error	
	E ₁	E ₂
	± cm ³	± cm ³
10 cm ³	0.05	0.02
20	0.08	0.03
50	0.12	0.05
100	0.20	0.06
200	0.30	0.09
500	0.50	0.15
1 dm ³	0.80	0.22
2	1.20	0.33
5	2.50	0.75
10	5.00	1.50

Standard graduated flasks for special uses

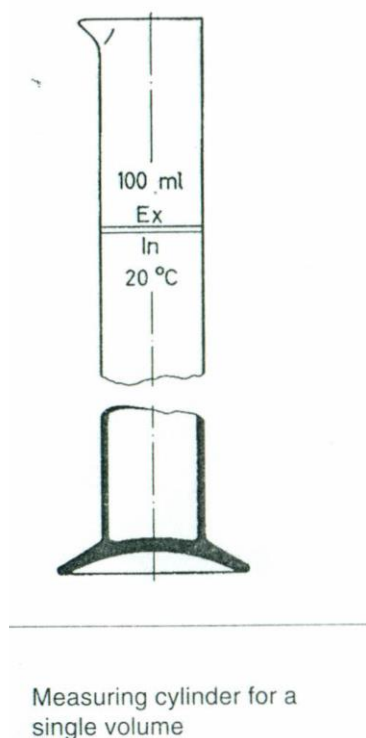
250 cm ³	0.30	0.10
2.5 dm ³	1.40	0.40

ตารางที่ 5-4 อัตราเพื่อเหลือเผื่อขาดของขวดแก้วก้นโป่งแบบมีหลายขีดขึ้นหมายมาตราตาม OIML R43, 1981

1.2. กระบอกแก้ว (Graduated cylinders)

มาตรฐานที่ใช้อ้างอิงในกรณีเครื่องตวงกระบอกแก้ว โดยเฉพาะแบบรับยังมีความสับสนอยู่ว่าจะยึดเอามาตรฐานของใครกันแน่ ระหว่างมาตรฐานในสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีหน่วยงาน คือ USP (U.S. Pharmacopeial Convention), ASTM (American Society for Testing and Materials), และ ACS (American Chemical Society) และในยุโรปเองก็มี the European Body for Standards และ the International Organisation for Standardisation (ISO) ซึ่งโดยทั่วไปทั้ง 2 หน่วยงานจะมักไม่ขัดแย้งและกำหนดมาตรฐานที่สอดคล้องกัน ในส่วนสหรัฐอเมริกา (อังกฤษ) ก็มี BS (British Standard) ในสหพันธ์เยอรมันก็มี DIN standard ดังนั้นในกรณีเครื่องตวงกระบอกแก้วพบว่า มาตรฐาน BS และ DIN จะไม่สอดคล้องกับ ISO มาตรฐาน DIN มีการกำหนดเป็น Class A และ Class B เช่นเดียวกับ USP แต่มาตรฐานของ USP โดยเฉพาะ Class A จะมีอัตราเพื่อเหลือเผื่อขาดน้อยกว่า Class A ของ DIN

1.2.1. เครื่องแก้วกระบอกแก้วขีดชั้นหมายเลขมาตราเดียว (One Mark) มีอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดัง
ในตารางที่ 5-5

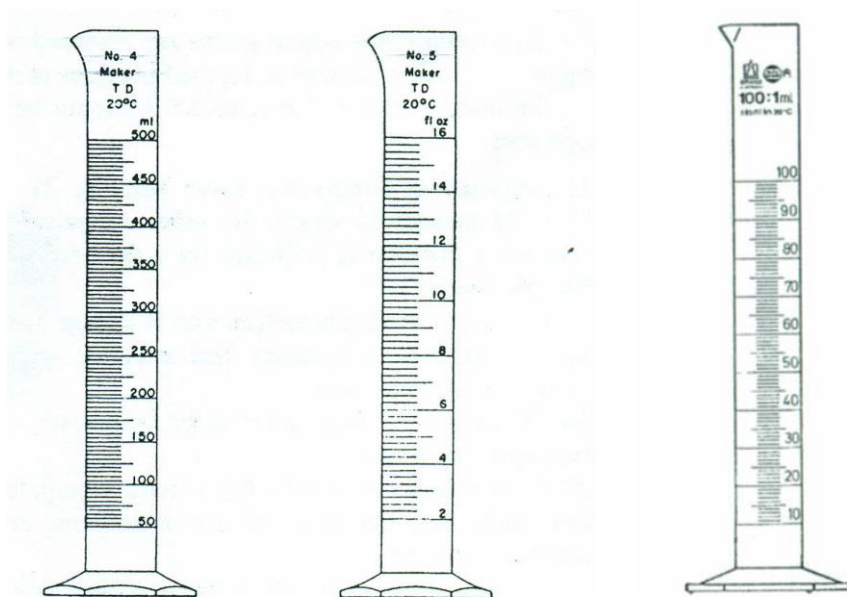


รูปที่ 5-3 เครื่องแก้วกระบอกแก้วขีดชั้นหมายเลขมาตราเดียว (One Mark)

พิกัดกำลัง cm^3		อัตราเพื่อเหลือเพื่อขาด (MPE)			
		$\pm \text{ml or } \pm \text{mm}^3$			
		“to contain”, “TC”, “In”		“to delivery”, “TD”, “Ex”	
		Class A	Class B	Class A	Class B
	≤ 30	0.06	0.12	-	-
$30 <$	≤ 50	0.1	0.2	-	-
$50 <$	≤ 100	0.2	0.4	0.4	0.8
$100 <$	≤ 250	0.5	1	1	2
$250 <$	≤ 400	1	2	2	4
$400 <$	≤ 600	1.5	3	3	6
$600 <$	≤ 1000	2.5	5	5	10
$1000 <$	≤ 1500	4	8	8	16
$1500 <$	≤ 2000	5	10	10	20

ตารางที่ 5-5 อัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดของเครื่องแก้วกระบอกแก้วขีดชั้นหมายเลขมาตราเดียว (One Mark)
แบบ “contain” และแบบ “delivery” (กฎกระทรวงฯ ออกตามพระราชบัญญัติ
มาตราชั่งตวงวัด พ.ศ. 2542)

1.2.2. เครื่องแก้วกระบอกแก้วหลายขีดชั้นหมายเลข (Graduated Mark) มีอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดดังในตารางที่ 5-6



รูปที่ 5-4 เครื่องแก้วกระบอกแก้วหลายขีดชั้นหมายเลข (Graduated Mark)

พิกัดกำลัง cm^3		อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาด (MPE) $\pm \text{ml or } \pm \text{mm}^3$			
		“to contain”, “TC”, “In”		“to delivery”, “TD”, “Ex”	
		Class A	Class B	Class A	Class B
	≤ 30	0.5d	d	d	1.5d
$30 <$	≤ 50	0.5d	d	d	1.5d
$50 <$	≤ 100	0.5d	d	d	1.5d
$100 <$	≤ 250	0.5d	d	d	1.5d
$250 <$	≤ 400	0.5d	d	d	1.5d
$400 <$	≤ 600	0.5d	d	d	1.5d
$600 <$	≤ 1000	0.5d	d	d	1.5d
$1000 <$	≤ 1500	0.5d	d	d	1.5d
$1500 <$	≤ 2000	0.5d	d	d	1.5d

d = ปริมาตรของขีดชั้นหมายเลขเล็กที่สุด

ตารางที่ 5-6 อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดของเครื่องแก้วกระบอกแก้วหลายขีดชั้นหมายเลข (Graduated Mark) แบบ “contain” และแบบ “delivery” (กฎกระทรวงฯ ออกตามพระราชบัญญัติมาตราชั่งตวงวัด พ.ศ. 2542)

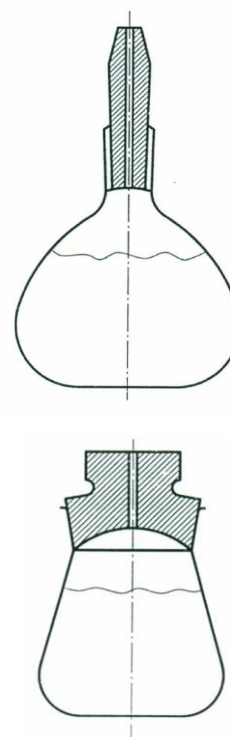
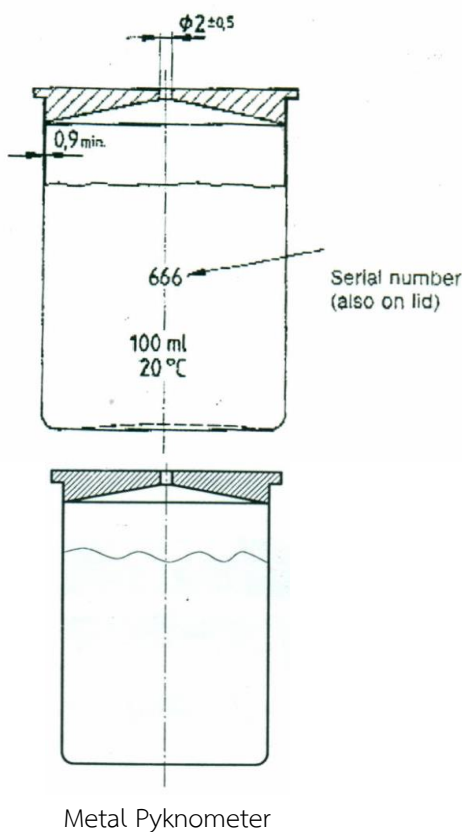
1.3. พิกะโนมิเตอร์ (Pyknometer) , ISO 2811-1;1997 และ DIN 53 217 Part 2; 1991

พิกะโนมิเตอร์ (Pyknometer) เป็นเครื่องมือที่เรานำมาใช้หาค่าความหนาแน่นของของเหลวที่เราต้องการทราบโดยอยู่บนหลักคิดที่ว่า เมื่อเราใส่ของเหลวทดสอบเข้าไปในพิกะโนมิเตอร์ เราสามารถทราบค่าความหนาแน่นของเหลวได้จากการคำนวณมวลของเหลวในพิกะโนมิเตอร์และปริมาตรบรรจุที่ระบุไว้บนพิกะโนมิเตอร์

ดังนั้นในการสอบเทียบพิกะโนมิเตอร์จึงเป็นการสอบเทียบเพื่อระบุปริมาตรของพิกะโนมิเตอร์ ณ สภาวะอ้างอิงที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ $20 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ หรือ $23 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ แล้วแต่ความจำเป็นและความต้องการของแต่ละหน่วยงานประเทศนั้นๆ

พิกะโนมิเตอร์ทำด้วยโลหะ (metal pyknometer) หรือพิกะโนมิเตอร์ทำด้วยแก้ว (glass pyknometer) หากเป็นโลหะจะเป็นทรงกระบอกและมีฝาปิด (perforated lid) บริเวณกึ่งกลางฝาปิดจะมีรูหายใจอยู่ตรงกลาง เมื่อเติมน้ำลงในพิกะโนมิเตอร์จนระดับน้ำต่ำกว่าขอบด้านบนสุดเล็กน้อย ตรวจสอบว่าไม่มีฟองอากาศจากนั้นค่อยๆ วางฝาปิดพิกะโนมิเตอร์ (perforated lid) ลงในตำแหน่งให้เรียบสนิทในกรณีของพิกะโนมิเตอร์ทำด้วยโลหะ หรือค่อยๆ ปิดจุก (ground stopper) ให้สนิทในกรณีของพิกะโนมิเตอร์ทำด้วยแก้ว แล้วให้เข้ดน้ำที่ล้นออกมาจากรูของฝาหรือจุกพิกะโนมิเตอร์ด้วยผ้าสะอาดหรือกระดาษชำระซึมซับบริเวณรอบๆ รูของฝาหรือจุกปิดจนกว่าสังเกตเห็นน้ำนูนออกมาบนขอบรูที่อยู่บนฝาพิกะโนมิเตอร์หรือจุกเล็กน้อย จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักในการสอบเทียบต่อไป ลักษณะพิกะโนมิเตอร์ดังรูปที่ 5-5

พิกะโนมิเตอร์ถูกนำไปใช้งานสำหรับหาค่าความหนาแน่นของของเหลวจำพวกสี (paints) น้ำมันชักเงา (varnishes), ของเหลวประเภทที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงและวัสดุเคลือบสี (coating materials) ด้วยข้อจำกัดคือของเหลวดังกล่าวต้องมีค่าความหนืดจลน์ (Kinematic viscosity) ไม่เกิน $50 \text{ mm}^2/\text{s}$ ที่อุณหภูมิขณะใช้งาน



รูปที่ 5-5 พิกะโนมิเตอร์ (Pyknometer) ทำด้วยโลหะ และทำด้วยแก้ว

พิกะโนมิเตอร์แก้ว (Glass Pyknometer) มีพิกัดกำลัง 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร (มิลลิลิตร) ถึง 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร (มิลลิลิตร) ตาม DIN 53 217 Part 2; 1991 กำหนดให้มีอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดดังตาราง

พิกัดกำลัง cm ³	MPE Glass Pyknometer mm ³	
	Class A	Class B
10	8	-
25	12	-
50	16	30
100	20	30

ตารางที่ 5-7 อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดสำหรับพิกะโนมิเตอร์แก้ว (Glass Pyknometer)
ตาม DIN 53 217 Part 2; 1991

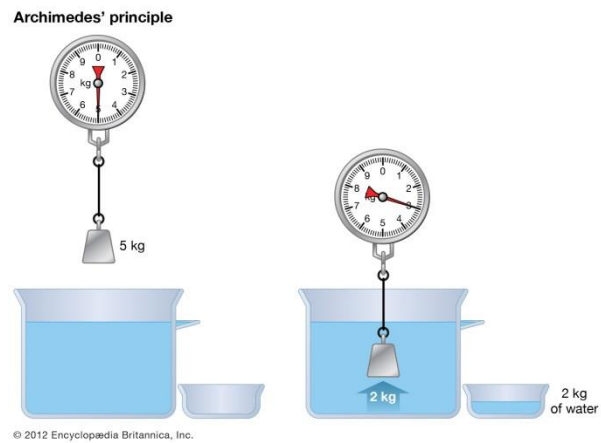
ในส่วนของอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดสำหรับพิกะโนมิเตอร์โลหะ (Metal Pyknometer) ใน DIN 53 217 Part 2; 1991 ไม่ได้ระบุไว้ เราจึงให้มีอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดเท่ากับอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดพิกะโนมิเตอร์แก้ว (Glass Pyknometer) โดยอนุโลม ไม่ควรใช้อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดของพิกะโนมิเตอร์โดยยึดเป็นเครื่องตรวจชนิดอื่นๆ เนื่องจากการสอบเทียบเพื่อนำไปใช้เป็นแบบมาตรฐานของพนักงานเจ้าหน้าที่ในกรณีของสำนักชั่งตวงวัดหรือในกรณีของผู้ประกอบการ และใช้ค่าที่สอบเทียบได้จริงนำไปใช้งาน

1.4. ลูกจุ่ม (Spherical Displacement Float or Plummets), ISO 2811-2;1997 และ DIN 53 217 Part 3;1991

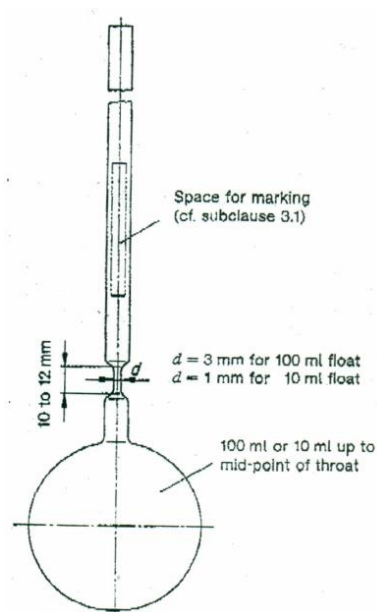
ลูกจุ่มเป็นเครื่องมือที่เรานำมาใช้หาค่าความหนาแน่นของของเหลวจำพวกสี (paints) น้ำมันชักเงา (varnishes), ของเหลวประเภทที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงและวัสดุเคลือบสี (coating materials) เช่นเดียวกับพิกะโนมิเตอร์ แต่ใช้เทคนิคการทำงานโดยการแทนที่ปริมาตรของรูปทรงกลมสมมาตร (รูปที่ 5-7) ที่เราทราบปริมาตรแน่นอนไปในของเหลวที่ต้องการทราบความหนาแน่นตามหลักการอาร์คิมิดีส (Archimedes' Principle) วิธีการดังกล่าวนี้เหมาะกับวัสดุเคลือบสีที่มีค่าความหนืดต่ำจนถึงระดับปานกลาง ไม่ควรใช้กับของเหลววัสดุเคลือบสีที่มีค่าความหนืดสูง

วัสดุที่ใช้ทำลูกจุ่มจะเป็นวัสดุที่ทนการกัดกร่อนต่อของเหลวที่ใช้งาน เช่น copper-zinc alloy, stainless austenitic steel หรือ aluminium เป็นต้น

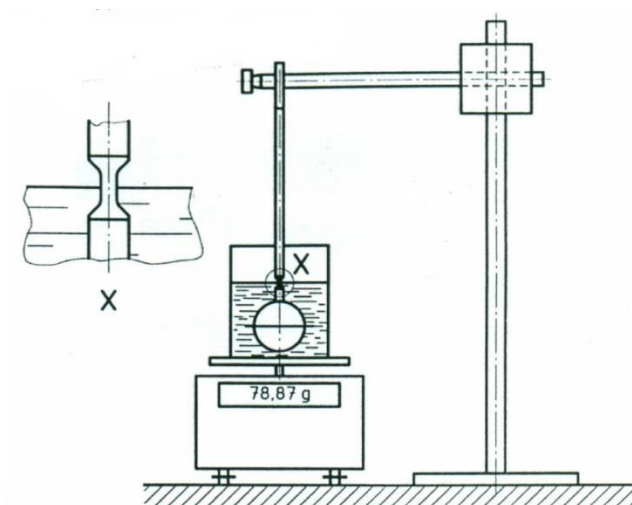
การสอบเทียบกระทำโดยนำภาชนะ เช่น บีกเกอร์ ที่มีขนาดใหญ่เพียงพอที่ไม่ก่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างผิวของภาชนะกับผิวของลูกจุ่มและใส่น้ำลงในภาชนะเพียงพอทำให้ท่วมลูกจุ่มเมื่อทำการจุ่มและเพียงพอไม่น้ำล้นออกมา จากนั้นนำไปวางบนเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียดแม่นยำสูง อ่านค่าน้ำหนัก แล้วจุ่มลูกจุ่มลงในภาชนะที่บรรจุน้ำที่ใช้ในการสอบเทียบแล้วการแทนที่ปริมาตรของลูกจุ่มกอน้ำล้นขึ้นมาถึงระดับกึ่งกลางของก้านคอคอดของลูกจุ่ม แล้วอ่านค่าน้ำหนัก คำนวณหาปริมาตรของลูกจุ่มได้จากค่าความหนาแน่นของน้ำกับผลต่างของค่าน้ำหนักก่อนและหลังจุ่มลูกจุ่ม



รูปที่ 5-6 Archimedes' Principle



รูปที่ 5-7 รูปร่างโดยทั่วไปลูกจุ่ม (Spherical displacement float or Plummet)



รูปที่ 5-8 การจัดวางเครื่องมือและอุปกรณ์ในการสอบเทียบลูกจุ่ม

2. ตรวจสอบสภาพเครื่องตรวจจับเบื้องต้นด้วยสายตา (Visual Check)

เพื่อให้การทำงานราบรื่น และให้ผลการสอบเทียบที่น่าเชื่อถือ ก่อนทำการสอบเทียบเครื่องตรวจจับขนาดเล็กในที่ซึ่งได้แก่ ฟลอสก์, กระบอกแก้ว, พิคะโนมิเตอร์ และลูกจุ่ม ให้ตรวจสอบสภาพเครื่องตรวจจับด้วยสายตาเบื้องต้น

2.1. ฟลอสก์, กระบอกแก้ว และเครื่องตรวจจับแก้ว

- เครื่องตรวจจับสะอาด ไม่มีคราบสิ่งสกปรกติดอยู่ตามผนังภายในเครื่องตรวจจับ
- ภายหลังที่ทำความสะอาดเครื่องแก้ว ให้สังเกตว่าสะอาดหรือไม่ โดยดูจากลักษณะรูปแบบของการเปียกบริเวณผิวภายในเครื่องแก้วหากเปียกสม่ำเสมอถือว่าสะอาด
- มีสภาพผิวราบเรียบ ไม่มีรอยแตกร้าวจนเห็นได้ชัดเจน ยังคงสภาพรูปทรงปกติหรือรูปทรงที่ได้รับการออกแบบ
- เครื่องตรวจจับสามารถตั้งอยู่บนพื้นระดับอย่างมั่นคง โดยแกนตั้งของเครื่องตรวจจับตั้งฉากกับพื้นระดับ ตลอดเวลาปฏิบัติงาน เรามักพบเครื่องแก้วเกรดต่ำเมื่อวางแล้วอาจจะเอียงไม่ตั้งฉากกับพื้นราบอย่างนี้ต้องตีเข้า ออ.. คัดออก
- หน่วยแสดงปริมาตรบนเครื่องตรวจจับต้องแสดงเป็นหน่วย SI Unit คือ ลิตร, ซม³ เป็นต้น
- ขีดขึ้นหมายมาตราเป็นเส้นตรง เลขจำนวนปริมาตร และอักษรอื่นๆบนเครื่องตรวจจับถาวร และมีสีแดงขึ้นหมายมาตราอย่างชัดเจน
- ช่องว่างระหว่างขีดขึ้นหมายมาตราต่ำสุดต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 2 มิลลิเมตร เพื่อให้เหมาะสมกับขีดความสามารถของดวงตามนุษย์ที่สามารถแยกความแตกต่างได้ไม่ลำบากมากนัก

2.2. พิคะโนมิเตอร์โลหะ, พิคะโนมิเตอร์แก้ว

- มีสภาพผิวราบเรียบ ไม่มีรอยบุบจนเห็นได้ชัดเจน ไม่ขึ้นสนิม ยังคงสภาพทรงกระบอกหรือรูปทรงที่ได้รับการออกแบบ
- เนื่องจากพิคะโนมิเตอร์ ได้รับการออกแบบมาเพื่อหาค่าความหนาแน่นของเหลวที่มีความหนืด kinematic viscosity ไม่เกิน 50 mm²/s โดยเฉพาะอย่างยิ่งของเหลวที่เป็นประเภทสี (paints) น้ำมันชักเงา (varnishes) และของเหลวประเภทที่มีคุณสมบัติใกล้เคียง ดังนั้นต้องตรวจสอบภายในตัวพิคะโนมิเตอร์ว่าไม่มีคราบของเหลวค้างอยู่ ทั้งในส่วนที่เป็นรูหายใจ (overflow) ด้วยเช่นกัน
- ถ้าพิคะโนมิเตอร์ทำด้วยโลหะ ให้ทำความสะอาดทั้งภายนอกและภายใน หากใช้สารทำความสะอาดต้องมั่นใจว่าไม่ทิ้งคราบหลังจากกระเหยไปและต้องแห้งสนิทตลอดชิ้นงาน
- ระวังคราบลายนิ้วมือหลงเหลืออยู่บนผิวภายนอกพิคะโนมิเตอร์ โดยเฉพาะพิคะโนมิเตอร์แก้ว
- ตรวจสอบเลขลำดับประจำเครื่อง มีหรือไม่ หากไม่มีเลขลำดับประจำเครื่องให้ออกเลขลำดับประจำเครื่อง ก่อนดำเนินการสอบเทียบต่อไป
- ตรวจสอบใบรายงานผลการสอบเทียบเดิมที่ผ่านมา (ถ้ามี) เพื่อประกอบการพิจารณา

2.3. ลูกจุ่ม

- มีสภาพผิวราบเรียบ ไม่มีรอยบุบจนเห็นได้ชัดเจน ไม่ขึ้นสนิม ยังคงสภาพรูปทรงกลม
- ไม่มีรอยแตกร้าว หรือการรั่วซึมของของเหลวเข้าตัวลูกจุ่ม
- เนื่องจากลูกจุ่ม ได้รับการออกแบบอยู่บนหลักการ Archimedes' principle เพื่อหาค่าความหนาแน่นของเหลวที่มีความหนืดน้อยจนถึงปานกลาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งของเหลวที่เป็นประเภทสี (paints) น้ำมันชักเงา (varnishes) และ ของเหลวประเภทที่มีคุณสมบัติใกล้เคียง ดังนั้นต้องตรวจสอบภายนอกตัวลูกจุ่มว่าไม่มีคราบของเหลวใดๆ ผิวง่ายอยู่บนผิวลูกจุ่ม ซึ่งจะมีผลต่อค่าความถูกต้องของปริมาตรลูกจุ่ม
- ถ้าลูกจุ่มทำด้วยโลหะในการทำความสะอาดภายนอกหากใช้สารทำความสะอาดต้องมั่นใจว่าไม่ทิ้งคราบหลังจากระเหยไปและต้องแห้งสนิทตลอดชิ้นงาน
- ระวังคราบลายนิ้วมือหลงเหลืออยู่บนผิวภายนอกลูกจุ่ม
- ฐานและขาตั้งต้องได้ระดับ เมื่อจุ่มลูกจุ่มแล้วตัวลูกจุ่มต้องไม่เบียดผนังภาชนะหรือบีกเกอร์ที่ใส่ของเหลวในการสอบเทียบ
- ตรวจสอบใบรายงานผลการสอบเทียบเดิมที่ผ่านมา (ถ้ามี) เพื่อประกอบการพิจารณา

สรุปภาพโดยรวม ตรวจสอบเครื่องตวงขนาดเล็กยังคงสภาพที่เหมาะสมและพร้อมใช้งานหรือไม่ ถ้าไม่เหมาะสมให้ใช้ตุลพิษแจ้งให้เจ้าของเครื่องตวงดำเนินการปรับปรุงแก้ไขพร้อมแจ้งเหตุผลให้เจ้าของเครื่องทราบก่อนนำเครื่องมาส่งเพื่อสอบเทียบใหม่อีกครั้ง

3. การเลือกเครื่องชั่งไฟฟ้า

เครื่องชั่งไฟฟ้าที่เหมาะสมในการใช้งานสอบเทียบ ควรพิจารณาดังนี้

1. ต้องมีพิสัยกำลังสูงเพียงพอในการรองรับน้ำหนักที่ทำการชั่งทุกขั้นตอน
2. มีชั้นความแม่นยำ (resolution) อ่านได้ละเอียดเพียงพอและต้องมีค่าน้อยกว่าค่าความไม่แน่นอน (uncertainty) ที่ยอมรับได้ในการสอบเทียบ ($1/3 \text{ MPE}$) พิจารณาเครื่องชั่ง (analytical or precision balance) ที่ใช้ในการสอบเทียบควรมีค่าชั้นความแม่นยำตรวจรับรอง (e) เท่ากับ

$$e \leq (2-5) \times 10^{-3} \times \text{MPE} \times W \quad \text{g} \quad (\text{Eq.5-1})$$

เมื่อ W = น้ำหนักของปริมาตรทดสอบ (g)

MPE = อัตราเพื่อเหลือเผื่อขาดของปริมาตรที่ต้องการทดสอบ (%)

เช่น พิคะโนมิเตอร์ (หรือลูกจุ่ม) พิกัดกำลัง 100 เซนติลิตร (cm^3) W เท่ากับ 100 g และมี MPE . 20 มิลลิลิตร (mm^3) หรือ $(20 * 100)/(1,000 * 100) = 0.02 \%$ แทนค่าลงในสมการข้างต้นจะได้ค่าชั้นความแม่นยำตรวจรับรองต้องอ่านละเอียดได้น้อยกว่า 0.004 - 0.01 กรัม (4 -10 มิลลิกรัม) หรือเครื่องชั่ง (Analytical balance) ควรอ่านละเอียดได้อย่างน้อย 1 มิลลิกรัม สำหรับพิกะโนมิเตอร์ที่มีพิสัยกำลังน้อยกว่า 50 เซนติลิตร (cm^3) หรือ

ml) และอ่านละเอียดได้อย่างน้อย 10 มิลลิกรัม สำหรับพิคะโนมิเตอร์พิกัดกำลังตั้งแต่ 50 ถึง 100 เซนติลิตร (cm^3 หรือ ml)

หรืออย่างน้อยสุดเครื่องชั่งไฟฟ้าก็ควร

$$\text{ชั้นหมายเลขมาตรฐาน (d)} \leq 1/3 * \text{MPE ของปริมาตรที่ต้องการทดสอบ} \quad (\text{Eq.5-2})$$

เนื่องจากการสอบเทียบเครื่องตวงโดยวิธีการชั่งน้ำหนักต้องการเครื่องชั่งที่มีความเที่ยงสูง ดังนั้นจึงไม่สามารถสอบเทียบเครื่องตวงที่มีพิกัดกำลังสูงๆ ได้ เพราะมีข้อจำกัดด้านเครื่องชั่งที่มีความละเอียดสูงๆ ที่พิกัดกำลังเครื่องชั่งสูงๆ ตลอดจนต้องใช้ตมน้ำหนักแบบมาตราที่มีค่าความถูกต้องเที่ยงตรงสูงจำนวนมากตามไปด้วย

4. เครื่องวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และเครื่องวัดความกดดันบรรยากาศ

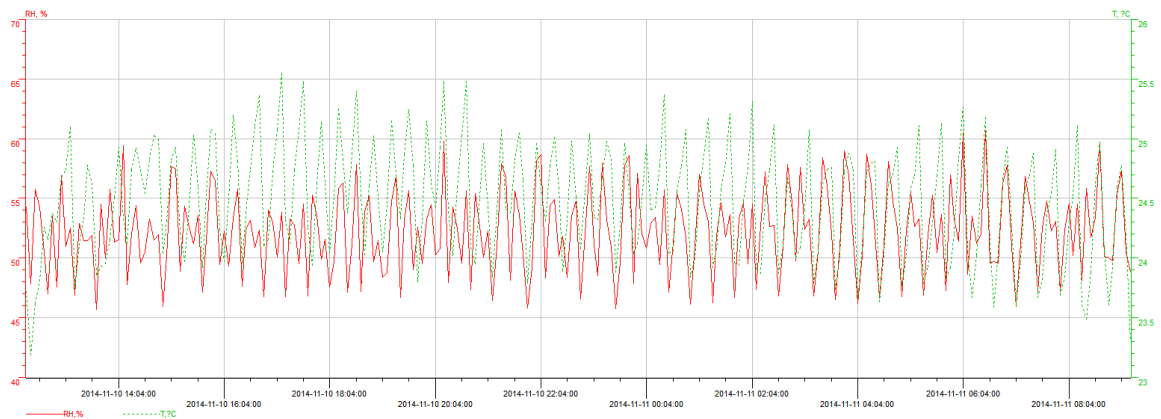
ภายในห้องปฏิบัติการ ควรเป็นเครื่องวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และเครื่องวัดความกดดันบรรยากาศ ภายในตัวเดียว (รูปที่ 5-9) พร้อมผลการสอบเทียบจากหน่วยงานห้องปฏิบัติการที่ได้รับ ISO 17025 ทั้งนี้เมื่อได้รับผลการสอบเทียบมาแล้วให้ดำเนินการทวนสอบว่าผลการสอบเทียบมีผลผลิตและค่าความไม่แน่นอนอยู่ภายในขอบเขตที่เรายอมรับได้หรือไม่ ก่อนนำไปใช้ ทั้งนี้เครื่องวัดควรมีขีดความสามารถ

- เครื่องวัดอุณหภูมิ อ่านได้ละเอียด 0.1 °C
- เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ อ่านละเอียด 0.1 %
- เครื่องวัดความกดดันบรรยากาศ อ่านละเอียดอย่างน้อย $\pm 135 \text{ Pa}$ ($\pm 1 \text{ mm Hg}$)



รูปที่ 5-9 เครื่องวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และเครื่องวัดความกดดันบรรยากาศ

5. เครื่องวัดอุณหภูมิของน้ำตัวกลางสอบเทียบ เราอาจเลือกใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบกระเปาะแก้ว หรือแบบ RTD แล้วแต่ขนาดเครื่องตวงและความเหมาะสม โดยมีความสามารถอ่านได้ละเอียด 0.1 °C ($\text{MPE} \leq 0.05 \text{ °C}$)



รูปที่ 5-10 ตัวอย่างการบันทึกผลการวัดของเครื่องวัดอุณหภูมิ (เส้นทึบใช้แกนดั่งซ้ายมือ) และ ความชื้นสัมพัทธ์ (เส้นประใช้แกนดั่งขวามือ)

6. น้ำกลั่น 2 ครั้ง (Double distilled water)

การสอบเทียบโดยวิธีการชั่งน้ำหนักโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการสอบเทียบในห้องปฏิบัติการฯ จำเป็นต้องใช้ น้ำที่มีความสะอาดและไม่มีสิ่งเจือปน เนื่องจากการเปรียบเทียบทางด้านปริมาตรและพื้นฐานของการคำนวณผลการสอบเทียบโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก (gravimetric method) เราใช้สมการความหนาแน่นน้ำบริสุทธิ์ในการคำนวณ ในทางปฏิบัติการสอบเทียบโดยวิธีการตวงเปรียบเทียบ (volumetric method) ระหว่างถึงตวงแบบมาตรากับถึงตวงที่ต้องการสอบเทียบโดยใช้น้ำสะอาด เช่นน้ำประปา ค่าความหนาแน่นของน้ำที่ใช้จะเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกันทั้งในถึงตวงแบบมาตราและถึงตวงที่ต้องการสอบเทียบ ผลของความเบี่ยงเบนไปของความหนาแน่นของน้ำสะอาดเมื่อเทียบกับความหนาแน่นน้ำบริสุทธิ์จึงไม่มีผลกระทบมากนัก แต่สำหรับการสอบเทียบโดยวิธีการชั่งน้ำหนักผลของความเบี่ยงเบนไปของความหนาแน่นของน้ำสะอาดเมื่อเทียบกับความหนาแน่นน้ำบริสุทธิ์มีผลกระทบอย่างมาก นอกจากนี้ผลกระทบที่ตามมาอีกปัจจัยหนึ่งคือความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนตามบาศก์ (Coefficient of cubical expansion per °C) ระหว่างน้ำสะอาดกับน้ำบริสุทธิ์



รูปที่ 5-11 เครื่องทำน้ำกลั่น 2 ครั้ง

การทำให้ น้ำสะอาดนอกจากปราศจากสิ่งเจือปนของอนุภาคของแข็งยังรวมถึงการปนเปื้อนทางเคมี ดังนั้น การทำให้น้ำบริสุทธิ์ใกล้เคียงสมการค่าความหนาแน่นน้ำบริสุทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณจึงเป็นเรื่องสำคัญและจำเป็น

หากต้องการผลการสอบเทียบที่มีค่าความแม่นยำสูงระดับหนึ่ง ในเอกสารต่างประเทศได้ระบุระดับความสะอาดของน้ำที่เหมาะสมกับงานในการสอบเทียบโดยวิธีการชั่งน้ำหนักไว้ที่ระดับ ASTM D1193-(06) 2011, Standard Specification for REAGENT WATER, Type III หรือ IV

	Type III	Type IV
Electrical Conductivity (Max.) μS/cm (microSiemens per centimeter) Ref. 25 °C	0.25	5.0
Resistivity (Min.) MΩ.cm (megaohms-centimeter) Ref. 25 °C	4.0	0.2

ตารางที่ 5-8 คุณสมบัติ Electrical Conductivity และ Resistivity ของน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางในการสอบเทียบ (ASTM D1193-(06) 2011, Standard Specification for REAGENT WATER)

นอกจากนี้การจัดเก็บต้องระมัดระวังไม่ให้สัมผัสกับอากาศมากนักเพราะจะทำให้คุณภาพของน้ำลดลงความเก็บไว้ในภาชนะสะอาดปิดฝาสนิท

ในเบื้องต้นเครื่องมือที่ใช้เตรียมน้ำสะอาดให้ใกล้เคียงน้ำบริสุทธิ์ตามสมการความหนาแน่นน้ำบริสุทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณเราจึงจำเป็นต้องหาเครื่องมืออุปกรณ์ เช่น เครื่องทำน้ำกลั่น (Double distillation water) อัตราการกลั่น 4 ลิตร/ชั่วโมง คุณภาพน้ำกลั่นที่ได้

- ค่า pH 5-6.5
- Conductivity 1-1.5 μS/cm
- Resistivity 0.7-1.0 mOhm-cm
- Free Pyrogen content

7. ขั้นตอนการสอบเทียบ

เนื่องจากขั้นตอนการสอบเทียบมีหลายละเอียดมากไม่สามารถบรรจุเข้าในหนังสือเล่มนี้ได้ ซึ่งครอบคลุมถึงสภาวะแวดล้อม ชีตความสามารถของแบบมาตราและเครื่องมืออุปกรณ์ การคำนวณผล เกณฑ์การตัดสินใจ การรายงานผลการสอบเทียบ เป็นต้น ดังนั้นจึงขอให้ไปอ่านขั้นตอนปฏิบัติการสอบเทียบโดยสำนักงานกลางชั่งตวงวัด

- 7.1. SOP-VOL-101 ขั้นตอนการปฏิบัติงานสอบเทียบขวดแก้วก้นโป่ง (Volumetric Flask) พิกัดกำลัง 50 มิลลิลิตร ถึง 1,000 มิลลิลิตรด้วยการชั่งน้ำหนัก (Gravimetric Method)
- 7.2. SOP-VOL-102 ขั้นตอนการปฏิบัติงานสอบเทียบกระบอกแก้ว (Graduated Cylinders) พิกัดกำลัง 25 มิลลิลิตร ถึง 2,000 มิลลิลิตรด้วยการชั่งน้ำหนัก (Gravimetric Method)
- 7.3. SOP-VOL-103 ขั้นตอนการปฏิบัติงานสอบเทียบพิคะโนมิเตอร์ (Pyknometer) พิกัดกำลัง 100 มิลลิลิตรด้วยการชั่งน้ำหนัก (Gravimetric Method)
- 7.4. SOP-VOL-104 ขั้นตอนการปฏิบัติงานสอบเทียบลูกจุ่ม (Spherical Displacement Float or Plummets) พิกัดกำลัง 100 มิลลิลิตรด้วยการชั่งน้ำหนัก (Gravimetric Method)

8. การคำนวณผลการสอบเทียบเครื่องตรวจจับขนาดเล็ก

ขั้นตอนการคำนวณสภาวะแวดล้อมห้องปฏิบัติการถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการปฏิบัติงานและคำนวณผลสอบเทียบและประเมินค่าความไม่แน่นอน จึงให้ข้อมูลการปฏิบัติงาน ณ ปัจจุบัน ของสำนักงานกลาง-ชั่งตวงวัดดังนี้

สภาวะแวดล้อมห้องปฏิบัติการการปรับอากาศภายในห้องปฏิบัติการเป็นระบบปรับอากาศแบบ Precision Air Condition System

- สภาวะอุณหภูมิ $(25 \pm 3) ^\circ\text{C}$ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุด $3 ^\circ\text{C} / \text{hr}$.
- ความชื้นสัมพัทธ์ $(50 \pm 15) \%$ อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด $15 \% / 4 \text{ hr}$.
- ความดันบรรยากาศ $(1010 \pm 20) \text{ hPa}$ ($1 \text{ mBar} = 1 \text{ hPa}$)
- อุณหภูมิของน้ำกลั่นตัวกลางสอบเทียบ $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน $0.1 ^\circ\text{C}$ ตลอดช่วงการสอบเทียบ

เนื่องจากเรากำหนดขอบเขตการสอบเทียบเครื่องตรวจจับขนาดเล็กด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก ครอบคลุมถึงพลาสติก, กระบอกแก้ว, พิคะโนมิเตอร์ และลูกจุ่ม แต่เนื่องจากหลักการทำงานที่แตกต่างกันจึงพิจารณาแยกออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

8.1. การคำนวณหาค่าปริมาตรของเครื่องตรวจจับขนาดเล็ก คือ พลาสติก, กระบอกแก้ว, พิคะโนมิเตอร์

เพราะวิธีการสอบเทียบเครื่องตรวจจับขนาดเล็กด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักเป็นวิธีการสอบเทียบต้องการความแม่นยำถูกต้องสูง จะด้วยเหตุผลว่าอาจถูกใช้งานที่มีความละเอียดสูง หรืออาจเป็นเพราะถูกใช้เป็นแบบมาตรฐานน้ำของงานชั่งตวงวัดในบางกรณีก็เป็นอีกเหตุผลหนึ่ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลต่อการสอบเทียบที่สำคัญให้รอบด้าน คือ

- ผลการชั่งน้ำหนักของน้ำและตุ้มน้ำหนักแบบมาตรา
- ค่าความไม่แน่นอน (uncertainties) ของตุ้มน้ำหนักที่ใช้ตรวจสอบหรือสอบเทียบเครื่องชั่ง
- แรงยกตัวของอากาศ (air buoyancy) เมื่อทำการชั่งน้ำหนักที่ความดันบรรยากาศเครื่องชั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลของการชั่งดังในรูปทางซ้ายมือของรูปที่ 5-12 แต่เมื่อปรับเปลี่ยนสภาวะความดันบรรยากาศเป็นสุญญากาศเครื่องชั่งจะหนีออกจากสภาวะสมดุลรูปทางขวามือของรูปที่ 5-12 เนื่องจากสิ่งของแต่ละอย่างมีความหนาแน่นต่างกันส่งผลให้มีปริมาตรต่างกันจึงทำให้การลอยตัวในของไหลมีค่าต่างกัน ของไหลในที่นี้คืออากาศ ดังสมการแรงลอยตัว

แรงลอยตัวของอากาศ = ความถ่วงจำเพาะของอากาศ $\times$ ปริมาตรของอากาศที่ถูกแทนที่

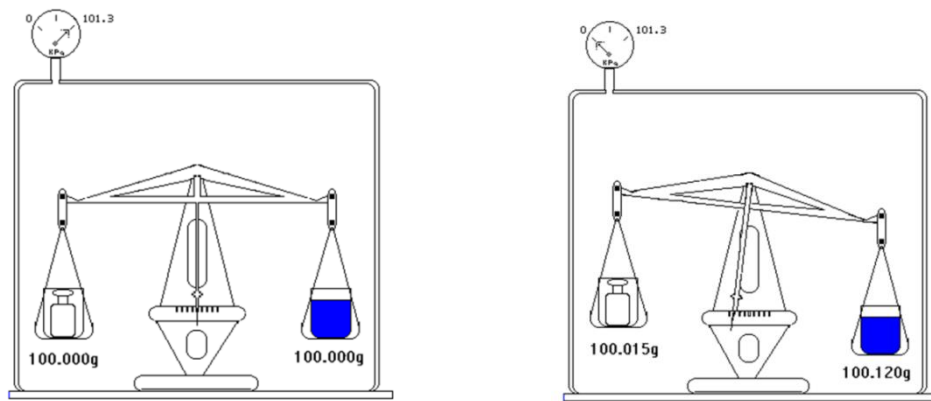
$$F_B = \rho_a g \times V_w \quad (\text{Eq.5-3})$$

เมื่อ F_B = น้ำหนัก , N

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง , m/s^2

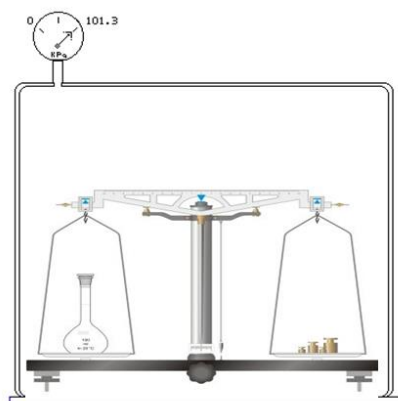
ρ_a = ความหนาแน่นอากาศ , Kg/m^3

V = ปริมาตรของอากาศที่ถูกแทนที่สิ่งของนั้น , m^3



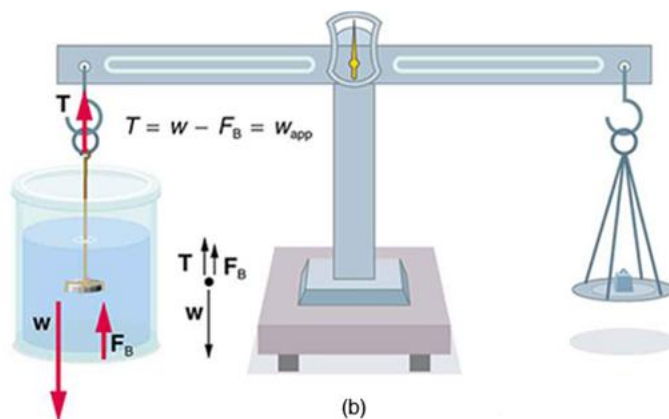
รูปที่ 5-12 อิทธิพลของแรงยกตัวของอากาศ (air buoyancy) ภายใต้ความดันบรรยากาศ (รูปซ้ายมือ) กับภายใต้สุญญากาศ (รูปขวามือ)

- การแก้ไขค่าการขยายตัวของเครื่องตวง (thermal expansion correction)
- แรงตึงผิว (Surface Tension) ในกรณีลูกจุ่ม



รูปที่ 5-13 ชั่งน้ำและต้อน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งชนิดสองแขนภายใต้ความดันบรรยากาศ

เรามาพิจารณาเมื่อทำการชั่งน้ำและต้อน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งชนิดสองแขน (รูปที่ 5-13) ที่สภาวะสมดุล เมื่อทำการชั่งน้ำและต้อน้ำหนัก แรงลัพธ์รวมทั้งหมดเท่ากับ 0 จะได้ว่า



รูปที่ 5-14 สภาวะสมดุลของแรงในการชั่งน้ำหนัก

$$F_w = F_s \quad (\text{Eq.5-4})$$

$$m_w g - \rho_a g V_w = m_s g - \rho_a g V_s \quad (\text{Eq.5-5})$$

เมื่อ m_w = มวลของน้ำ , Kg (g)

m_s = มวลของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน, Kg (g)

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำขณะชั่ง, Kg/m³ (g/cm³)

ρ_s = ความหนาแน่นของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน, Kg/m³ (g/cm³)

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศขณะชั่ง, Kg/m³ (g/cm³)

V_w = ปริมาตรของน้ำขณะชั่ง, m³ (cm³)

V_s = ปริมาตรของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน, m³ (cm³)

ตัดค่า g ออกจะได้

$$m_w - \rho_a V_w = m_s - \rho_a V_s \quad (\text{Eq.5-6})$$

เนื่องจาก $V = \frac{m}{\rho}$ แทนค่า V ในสมการจะได้

$$m_w - \rho_a \frac{m_w}{\rho_w} = m_s - \rho_a \frac{m_s}{\rho_s} \quad (\text{Eq.5-7})$$

$$m_w (1 - \frac{\rho_a}{\rho_w}) = m_s (1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}) \quad (\text{Eq.5-8})$$

$$m_w = m_s \frac{(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s})}{(1 - \frac{\rho_a}{\rho_w})} \quad (\text{Eq.5-9})$$

เนื่องจากปริมาตรน้ำที่อุณหภูมิสอบเทียบหาได้จากค่าน้ำหนักของน้ำหารด้วยความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมินั้น

$$V_{wt} = \frac{m_w}{\rho_w} \quad (\text{Eq.5-10})$$

$$V_{wt} = \frac{m_s (1 - \frac{\rho_a}{\rho_s})}{(\rho_w - \rho_a)} \quad (\text{Eq.5-11})$$

ในสมการ Eq.5-10 ถือเป็นหลักการพื้นฐานของนิยามความหนาแน่น มวล และปริมาตร แต่เนื่องจากค่ามวลหรือน้ำหนักที่เราหาได้จริงจากเครื่องชั่งเป็น “Apparent Mass” ไม่ใช่มวลในนิยามความหนาแน่น เนื่องจากเครื่องชั่งที่เราใช้ในทางปฏิบัติเป็นเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีหลักการทำงาน เช่น single-pan balance, built in weight balance หรือ Load cell balance เป็นต้น ดังนั้นในการผลิตเครื่องชั่งผู้ผลิตอาจใช้ตุ้มน้ำหนักแบบมาตราที่มีค่าความหนาแน่นในการสอบเทียบเครื่องชั่งแตกต่างกันไป เช่น มีค่าความหนาแน่น ρ_{w10} เพื่อบอกให้เครื่องชั่งจำค่าว่าเป็นน้ำหนักเท่าไร จากนั้นเมื่อเครื่องชั่งถูกนำมาใช้งานในการสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราอาจใช้ตุ้มน้ำหนักที่มีค่าความหนาแน่นแตกต่างจากเดิมให้มีค่าเท่ากับ ρ_s ดังนั้นการหาค่ามวล m_s จากเครื่องชั่งดังกล่าวจะได้ว่า

$$F_s = F_{scale} \quad (Eq.5-12)$$

$$m_s g - \rho_{a0} g V_s = I_{WI} g - \rho_{a0} g V_{WI0} \quad (Eq.5-13)$$

$$m_s \left(1 - \frac{\rho_{a0}}{\rho_s}\right) = I_{WI} \left(1 - \frac{\rho_{a0}}{\rho_{WI0}}\right) \quad (Eq.5-14)$$

เมื่อ I_{WI} = เครื่องชั่งแสดงค่าน้ำหนักน้ำหนักน้ำ, Kg (g)

$$I_{WI} = O_4 - O_3$$

m_s = มวลของตุ้มน้ำหนักแบบมาตราที่ใช้, Kg (g)

ρ_{WI0} = ความหนาแน่นของตุ้มน้ำหนักที่สภาพอ้างอิงใช้ปรับน้ำหนักผลการชั่ง (the apparent mass scale to which the weights are adjusted.), Kg/m^3 (g/cm^3)

ρ_s = ความหนาแน่นของตุ้มน้ำหนักแบบมาตราที่ใช้ในการหาปริมาตรน้ำ, Kg/m^3 (g/cm^3)

ρ_{a0} = ความหนาแน่นของอากาศสถานะอ้างอิง, Kg/m^3 (g/cm^3)

แก้สมการโยกไปมา

$$m_s = I_{WI} \frac{\left(1 - \frac{\rho_{a0}}{\rho_{WI0}}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_{a0}}{\rho_s}\right)} \quad (Eq.5-15)$$

$$= I_{WI} \frac{(\rho_s \rho_{WI0} - \rho_{a0} \rho_s)}{(\rho_s \rho_{WI0} - \rho_{a0} \rho_{WI0})} \quad (Eq.5-16)$$

$$= I_{WI} \frac{\rho_s (\rho_{WI0} - \rho_{a0})}{\rho_{WI0} (\rho_s - \rho_{a0})} \quad (Eq.5-17)$$

หากกำหนดให้สภาพอ้างอิงการสอบเทียบเครื่องตวงที่ อุณหภูมิอ้างอิง 20 °C และความหนาแน่นของอากาศ 1.2 kg/m^3 (หรือ 0.0012 g/cm^3)

$$m_s = I_{WI} \frac{\rho_s (\rho_{WI0} - 1.2)}{\rho_{WI0} (\rho_s - 1.2)} \quad (Eq.5-18)$$

จากสมการ (Eq.5-11)

$$\begin{aligned} V_{wt} &= I_{WI} \frac{\rho_s (\rho_{WI0} - 1.2)}{\rho_{WI0} (\rho_s - 1.2)} \frac{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right)}{(\rho_w - \rho_a)} \\ &= (O_4 - O_3) \frac{\rho_s (\rho_{WI0} - 1.2)}{\rho_{WI0} (\rho_s - 1.2)} \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right) \times \frac{1}{(\rho_w - \rho_a)} \\ &\cong (O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1}\right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a}\right) \end{aligned} \quad (Eq.5-19)$$

คำนวณปริมาตรที่สภาวะขณะทำการสอบเทียบแต่ละครั้งของการสอบเทียบเครื่องตวงขนาดเล็กด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก (ด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์) พออนุโลมและเทียบเท่าเครื่องแบบ 2 แขน หรือเครื่องชั่งที่มีตุ้มน้ำหนัก (Counter weights) การคำนวณปริมาตรในการสอบเทียบแต่ละครั้งจึงมีค่าเท่ากับ

$$V_{wt} = (O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \quad (\text{Eq.5-20})$$

เมื่อ กรณีสอบเทียบแบบ “รับ” / “to contain” / “In” ($O_1 - O_2 - O_3 - O_4$)

กรณีสอบเทียบแบบ “จ่าย” / “to deliver” / “Ex” ($O_1 - O_2 - O_4 - O_3$)

O_1 = เครื่องชั่งแสดงค่าน้ำหนักศูนย์ (Set Zero), Kg (g)

O_2 = เครื่องชั่งแสดงค่าน้ำหนักตุ้มแบบมาตรา (มากกว่า O_4 เล็กน้อย), Kg (g)

O_3 = เครื่องชั่งแสดงค่าน้ำหนักถังตวงเปล่าหรือหลังถ่ายน้ำ, Kg (g)

แบบรับ : เครื่องตวงแห้งสนิทซึ่งหลายครั้ง แล้วเฉลี่ยหาค่าน้ำหนัก

แบบจ่าย : ถ่ายน้ำออกจากเครื่องตวงตามเวลา drain time ไปชั่งน้ำหนัก

O_4 = เครื่องชั่งแสดงค่าน้ำหนักถังตวง+น้ำ, Kg (g)

$\frac{M_s}{O_2 - O_1}$ = เป็นค่าแก้ไขการแสดงผลเครื่องชั่งเนื่องจากค่าความหนาแน่นของตุ้มน้ำหนัก

ที่อาจแตกต่างจากค่าความหนาแน่นของตุ้มน้ำหนักอ้างอิงของผู้ผลิตเครื่องชั่ง (the apparent mass conversion factor) จาก ASTM E542-01 (Reapproved 2012) เรียกท่อนี้ว่า “*the apparent mass conversion factor*” ซึ่งจะมีค่าไม่เท่ากับ 1.0000 สำหรับเครื่องชั่งแบบมีส่วนรับน้ำหนักเพียง 1 ส่วน (single-pan) ของเครื่องแสดงค่าอัตโนมัติด้วยเหตุนี้

$$\frac{M_s}{O_2 - O_1} \leq 1.00013 \quad (\text{Eq.5-21})$$

แต่โดยทั่วไปอาจให้มีค่าเท่ากับ 1.00000 ก็ได้

8.2. การคำนวณหาค่าปริมาตรของเครื่องตวงขนาดเล็กชนิดลูกจุ่ม (Spherical displacement float or Plummet)

คิดบนพื้นฐาน ให้ติดตั้งลูกจุ่มเข้ากับปลายด้านหนึ่งของเครื่องชั่งสองแขน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งวางตุ้มน้ำหนัก m_{s1} ซึ่งทำให้เครื่องชั่งสองแขนเข้าสู่สภาวะสมดุล เราจะได้ว่า

$$F_{sdf1} = F_{s1} \quad (\text{Eq.5-22})$$

$$m_{sdf}g - \rho_a g V_{sdf} = m_{s1}g - \rho_a g V_{s1} \quad (\text{Eq.5-23})$$

หลังจากนั้นรินน้ำกลั่นใส่ในปิกเกอร์ (beaker) ให้มีปริมาตรพอเหมาะ เช่น ในกรณีลูกจุ่ม 100 ml ใช้ปิกเกอร์ขนาด 500 ml ใส่ น้ำกลั่น 300 ml ไปวางไว้ใต้ลูกจุ่ม จากนั้นปรับลดน้ำหนักของตุ้มน้ำหนักซึ่งอยู่บนปลายอีกด้านหนึ่ง จนกระทั่งลูกจุ่มจมลงในน้ำกลั่นภายในปิกเกอร์จนกระทั่งถึงตำแหน่งกึ่งกลางคอคอด ภายหลังปรับลดตุ้ม

น้ำหนักจันกระทั้งมีค่าเท่ากับ m_{s2} คันชั่งเครื่องชั่งสองแขนเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้ง ที่สภาวะสมดุลแรงลัพธ์รวมทั้งหมด (น้ำหนัก, แรงลอยตัว และแรงตึงผิวของก้านลูกจุ่ม) เท่ากับ 0 จะได้ว่า

$$F_{sdf\ 2} = F_{s2} \quad (\text{Eq.5-24})$$

$$m_{sdf}g - \rho_w g V_{sdf} + \sigma_w \pi d = m_{s2}g - \rho_a g V_{s2} \quad (\text{Eq.5-25})$$

เมื่อ m_{sdf} = มวลของลูกจุ่ม (Spherical displacement float or Plummet), Kg (g)

m_{s1} = มวลของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน, Kg (g)

m_{s2} = มวลของตุ้มน้ำหนักมาตรฐานหลังจากจุ่มลูกจุ่มลงในของเหลว, Kg (g)

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำขณะชั่ง, Kg/m^3 (g/cm^3)

ρ_s = ความหนาแน่นของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน, Kg/m^3 (g/cm^3)

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศขณะชั่ง, Kg/m^3 (g/cm^3)

V_{s1} = ปริมาตรของตุ้มน้ำหนักมาตรฐานของ m_{s1} , m^3 (cm^3)

V_{s2} = ปริมาตรของตุ้มน้ำหนักมาตรฐานของ m_{s2} , m^3 (cm^3)

σ_w = ความตึงผิว (surface tension) ของของเหลว N/m (mN/m)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของคอคอดลูกจุ่ม, m (cm)

g = ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2 (cm/s^2)

นำสมการ (Eq.5-23) ลบด้วยสมการ (Eq.5-25)

$$(\rho_w - \rho_a)g V_{sdf} - \sigma_w \pi d = (m_{s1} - m_{s2})g - (V_{s1} - V_{s2})\rho_a g \quad (\text{Eq.5-26})$$

$$V_{sdf} = \frac{(m_{s1} - m_{s2})}{(\rho_w - \rho_a)} - \frac{(V_{s1} - V_{s2})\rho_a}{(\rho_w - \rho_a)} + \frac{\sigma_w \pi d}{(\rho_w - \rho_a)g}$$

$$V_{sdf} = \frac{(m_{s1} - m_{s2})}{(\rho_w - \rho_a)} - \frac{(\frac{m_{s1}}{\rho_s} - \frac{m_{s2}}{\rho_s})\rho_a}{(\rho_w - \rho_a)} + \frac{\sigma_w \pi d}{(\rho_w - \rho_a)g}$$

$$V_{sdf} = \frac{(m_{s1} - m_{s2})}{(\rho_w - \rho_a)} \frac{\rho_s}{\rho_s} - \frac{(m_{s1} - m_{s2})\rho_a}{(\rho_w - \rho_a)\rho_s} + \frac{\sigma_w \pi d}{(\rho_w - \rho_a)g}$$

$$V_{sdf} = \frac{(m_{s1} - m_{s2})(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s})}{(\rho_w - \rho_a)} + \frac{\sigma_w \pi d}{(\rho_w - \rho_a)g} \quad (\text{Eq.5-27})$$

คำนวณปริมาตรที่สภาวะขณะทำการสอบเทียบแต่ละครั้งของการสอบเทียบลูกจุ่มด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก (ด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์) พออนุโลมและเทียบเท่าเครื่องแบบ 2 แขน หรือเครื่องชั่งที่มีตุ้มน้ำหนัก (Counter weights) การคำนวณปริมาตรในการสอบเทียบแต่ละครั้งจึงมีค่าเท่ากับ

$$V_{wt} = (O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) + \frac{\sigma_w \pi d}{(\rho_w - \rho_a)g} \quad (\text{Eq.5-28})$$

8.3. ความหนาแน่นของอากาศ

เนื่องจากสูตรหาความหนาแน่นของอากาศของ the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) (1981/91) มีความถูกต้องสูงมากเกินไปและบ่อยครั้งพบว่าเกินความจำเป็นสำหรับงานชั่งตวงวัดในเชิงกฎหมาย (Legal Metrology) ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงใช้ค่าประมาณด้วยสมการดังข้างล่างน่าจะเพียงพอ จึงใช้สมการ

$$\rho_a = \frac{0.34848 \times p - 0.009024 \times h_r \times e^{(0.0612 \times t)}}{273.15 + t} \quad \text{kg/m}^3 \quad (\text{Eq.5-29})$$

เมื่อ ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ; kg/m^3
 p = ความกดดันอากาศ (the air pressure); หน่วย เฮกโตปาสกาล (hPa) หรือ mBar
 h_r = ความชื้นอากาศสัมพัทธ์ (the relative air humidity); %
 t = อุณหภูมิอากาศที่วัดได้ (the air temperature); $^{\circ}\text{C}$

ภายใต้เงื่อนไขที่ว่ามีความไม่แน่นอน (a relative uncertainty) เท่ากับ 2×10^{-4} เมื่อใช้งานในช่วงความกดดันอากาศ $900 \text{ hPa} < p < 1100 \text{ hPa}$ และอุณหภูมิอากาศที่วัดได้ $10^{\circ}\text{C} < t < 30^{\circ}\text{C}$ และ $h_r < 80\%$

ในกรณีที่ห้องไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้ดังในเงื่อนไขข้างต้น เช่นในพื้นที่เปิดโล่ง เราอาจใช้สมการ

$$\rho_a = \rho_0 \times e^{\left[\frac{-p_0 g h}{p_0} \right]} \quad \text{kg/m}^3 \quad (\text{Eq.5-30})$$

เมื่อ ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ; kg/m^3
 $\rho_0 = 1.2 \text{ kg/m}^3$
 $p_0 = 101\,325 \text{ Pa}$
 h_r = ตำแหน่งสูงจากระดับน้ำทะเล (sea level), m
 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

ประเมิน Uncertainty ตาม EA-10/18 EA Guidelines on the calibration of non-automatic weighing instruments (A1.5)

8.4. ความหนาแน่นของน้ำ (Water Density)

คำนวณหาความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ ได้ที่อุณหภูมิต่างๆได้จากสมการของ H. Wagenbreth และ W. Blanke, PTB โดยใช้สเกลอุณหภูมิ ITS-90 ค่าความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ (ρ) ที่ความดันบรรยากาศ (OIML R49-2: 2006(E), Annex F)

$$\rho_w = \frac{\sum_{n=0}^5 a_n \times t_w^n}{1 + b t_w} \quad \text{kg/m}^3 \quad (\text{Eq.5-31})$$

เมื่อ ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ kg/m^3
 $a_0 = 9.9983952 \times 10^2 \quad \text{kg/m}^3$

$$\begin{aligned}
a_1 &= 1.6952577 \times 10 & ^\circ\text{C}^{-1} \text{ kg/m}^3 \\
a_2 &= -7.9905127 \times 10^{-3} & ^\circ\text{C}^{-1} \text{ kg/m}^3 \\
a_3 &= -4.624175 \times 10^{-5} & ^\circ\text{C}^{-1} \text{ kg/m}^3 \\
a_4 &= 1.0584601 \times 10^{-7} & ^\circ\text{C}^{-1} \text{ kg/m}^3 \\
a_5 &= -2.8103006 \times 10^{-10} & ^\circ\text{C}^{-1} \text{ kg/m}^3 \\
b &= 1.6887236 \times 10^{-2} & ^\circ\text{C}^{-1} \\
t &= \text{อุณหภูมิน้ำ,} & ^\circ\text{C}
\end{aligned}$$

8.5. ความตึงผิวของน้ำ (Surface Tension of Water)

คำนวณหาความตึงผิวของน้ำที่อุณหภูมิต่างๆได้จากสมการของ The International Association for the Properties of Steam (IAPS), September 1975 Howard J. White, Jr., Executive Secretary, Nation Bureau of Standards, Washington, DC คือ

$$\sigma_w = B \left[\frac{T_c - T}{T_c} \right]^\mu \left[1 + b \left(\frac{T_c - T}{T_c} \right) \right] \quad \text{N/m} \quad (\text{Eq.5-32})$$

เมื่อ T_c = อุณหภูมิวิกฤตของน้ำ (the critical temperature); 647.15 K

T = อุณหภูมิของน้ำ (water temperature); เคลวิน (K)

$$= 273.15 + ^\circ\text{C}$$

$$B = 235.8 \times 10^{-3} \text{ N/m}$$

$$b = -0.625$$

$$\mu = 1.256 \text{ N/m}$$

8.6. ความหนาแน่นของดรัมน้ำหนักแบบมาตรา ได้จากใบรายงานผลการสอบเทียบดรัมน้ำหนักรวมทั้งค่าแก้ไขและค่าความไม่แน่นอนการวัด (uncertainty) ด้วยระดับความมั่นใจ 95% (k=2)

8.7. ปรับค่าปริมาตรไปยังปริมาตรสถานะอ้างอิง สภาวะเมื่อทราบค่า ตัวแปรต่างๆ ในสมการของการหาค่าปริมาตรที่สถานะขณะทำการสอบเทียบแต่ละครั้งของเครื่องตวง (พลาสติก, กระจกแก้ว, พิเคโนมิเตอร์, ลูกจุ่ม และเครื่องตวงชนิดแก้ว) ในลงในสมการ Eq.5-20 หรือลงในสมการ Eq.5-28 แล้ว จะได้ค่า V_{wt} ซึ่งเป็นค่าปริมาตรน้ำที่อุณหภูมิขณะซึ่งบรรจุอยู่ในเครื่องตวง ดังนั้นจำเป็นต้องทำการปรับค่าปริมาตร V_{wt} ไปยังค่าปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง V_0 ด้วยการปรับค่าปริมาตรที่คำนวณได้ด้วยตัวแปรแก้ไขค่าปริมาตร C_{ts} อันเนื่องมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อผนังเครื่องตวง

ดังนั้นจะได้ปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิงและความดันอ้างอิง (ความดันบรรยากาศ) เท่ากับ

$$V_0 = \frac{V_{wt}}{C_{ts}} \quad (\text{Eq.5-33})$$

$$C_{ts} = 1 + \gamma(t_w - t_0) \quad (\text{Eq.5-34})$$

C_{ts} = ตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิกระทำต่อเครื่องตวง
(the correction factor for the effect of temperature on steel)

γ = สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนตามบาศก์ (Coefficient of cubical expansion per $^{\circ}\text{C}$); $/^{\circ}\text{C}$

วัสดุ	γ ($/^{\circ}\text{C}$)
Fused silica (quartz)	0.0000016
Borosilicate glass (Type I, Class A)	0.000010
Borosilicate glass (Type I, Class B)	0.000015
Soda-lime glass	0.000025
Polypropylene plastic	0.000240
Polycarbonate plastic	0.000450
Polystyrene plastic	0.00021
Austenitic stainless steel (316)	0.0000477
Austenitic stainless steel (304)	0.0000518
Copper-zinc alloy (brass; CuZn37 (Ms63))	0.000054
Aluminium	0.000069

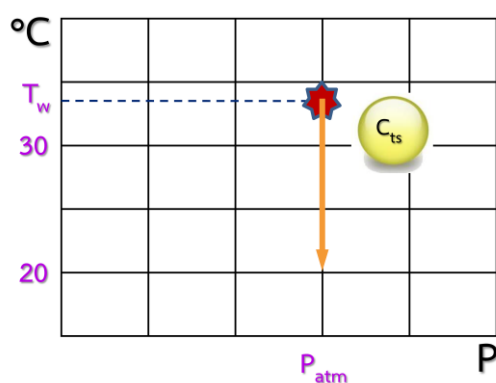
ตารางที่ 5-9 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนตามบาศก์ (Coefficient of cubical expansion per $^{\circ}\text{C}$)

t = อุณหภูมิของเหลวขณะชั่ง, $^{\circ}\text{C}$

t_0 = อุณหภูมิอ้างอิงของเครื่องตวง (15, 20 หรือ 30), $^{\circ}\text{C}$

ดังนั้น

$$V_0 = \frac{V_{wt}}{[1 + \gamma(t_w - t_0)]} \cong V_{wt} \times [1 - \gamma(t_w - t_0)] \quad (\text{Eq.5-35})$$



รูปที่ 5-15 การปรับปริมาตรจากสภาวะขณะวัด (T_w , P_{atm}) ไปยังปริมาตรที่สภาวะอ้างอิง (20°C , P_{atm})

การสอบเทียบเครื่องตวงจำเป็นต้องการสอบเทียบหาค่า V_{wt} เป็นจำนวนหลายครั้ง ยิ่งทำการสอบเทียบจำนวนครั้งยิ่งมากความแม่นยำถูกต้องยิ่งน่าเชื่อถือมาก เมื่อหาค่าปริมาตรที่คำนวณได้ในแต่ละครั้ง ให้นำค่าดังกล่าวมาหาค่าเฉลี่ย $\bar{V}_{wt}$ ก่อนนำไปปรับค่าเป็นปริมาตรที่สภาวะอ้างอิง หรือหากอุณหภูมิของน้ำที่ทำการชั่งมีการเปลี่ยนแปลง ก็สามารถทำการปรับค่าปริมาตรที่ชั่งน้ำหนักได้ไปยังปริมาตรอ้างอิงแต่ละครั้ง จากนั้นนำค่าปริมาตรอ้างอิงของแต่ละครั้งมาเฉลี่ยหาค่าเป็นปริมาตรอ้างอิงเฉลี่ยของการสอบเทียบ

กรณีเครื่องตวงขนาดเล็ก คือ ฟลาสค์, กระบอกแก้ว, พิคะโนมิเตอร์ แทนค่าจากสมการ Eq.5-20 ลงใน Eq.5-35

$$V_0 = (O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \times (1 - \gamma(t_w - t_0)) \quad (\text{Eq.5-36})$$

กรณีเครื่องตวงขนาดเล็ก คือ ลูกจุ่ม แทนค่าจากสมการ Eq.5-28 ลงใน Eq.5-35

$$V_0 = \left\{ (O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) + \frac{\sigma_w \pi d}{(\rho_w - \rho_a)g} \right\} \times (1 - \gamma(t_w - t_0)) \quad (\text{Eq.5-37})$$

9. การคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดค่าในการสอบเทียบ (Standard Uncertainty) โดยยึดเอาสมการการหาปริมาตรเครื่องตวง ณ สภาวะอ้างอิงของเครื่องตวง (ในกรณี ฟลาสค์, กระบอกแก้ว และพิคะโนมิเตอร์) ในที่นี้สมมติให้อุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ 20 °C จากสมการ

$$V_0 = (O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \times (1 - \gamma(t_w - 20))$$

แต่สำหรับลูกจุ่มนั้นสมการการหาปริมาตรอ้างอิงของลูกจุ่ม (Spherical Displacement Float or Plummets) ในที่นี้สมมติให้อุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ 20 °C

$$V_0 = \left\{ (O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) + \frac{\sigma_w \pi d}{(\rho_w - \rho_a)g} \right\} \times (1 - \gamma(t_w - 20))$$

แต่เนื่องจากเทอมแก้ไขค่าเนื่องจากความตึงผิวของน้ำสำหรับลูกจุ่มถือว่ามีค่าน้อยมากและมีบางเทอมได้พิจารณา ค่าความไม่แน่นอนอยู่แล้ว ดังนั้นความไม่แน่นอนจากสมการการหาปริมาตรของเครื่องตวงขนาดเล็ก (ฟลาสค์, กระบอกแก้ว, พิคะโนมิเตอร์ และลูกจุ่ม) ในที่นี้อยู่บนพื้นฐานของสมการเดียวกัน มีค่าเท่ากับ

$$V_0 = (O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \times (1 - \gamma(t_w - 20))$$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของการวัดจึงมีค่าเท่ากับ

$$u_c = \sqrt{c_s^2 \cdot u_s^2 + c_{ps}^2 \cdot u_{ps}^2 + c_{pw}^2 \cdot u_{pw}^2 + c_{pa}^2 \cdot u_{pa}^2 + c_{tw}^2 \cdot u_{tw}^2 + c_\gamma^2 \cdot u_\gamma^2 + c_\sigma^2 \cdot u_\sigma^2 + c_{ba}^2 \cdot u_{ba}^2 + c_{sDrift}^2 \cdot u_{sDrift}^2} \quad (\text{Eq.5-38})$$

การรายงานค่าผลการสอบเทียบเครื่องตวง มีค่าปริมาตรเครื่องตวง ณ สภาวะอ้างอิง ด้วยค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความมั่นใจ 95% ($k=2$)

$$V_0 \pm 2u_c \text{ มิลลิลิตร} \quad (\text{Eq.5-39})$$

พิจารณารายละเอียดดังต่อไปนี้

$$V_0 = (O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \times (1 - \gamma(t_w - 20))$$

$$\rho_w = \frac{\sum_{n=0}^5 a_n \times t_w^n}{1 + b t_w}$$

$$\rho_a = \frac{0.34848 \times p - 0.009024 \times h_r \times e^{(0.0612t)}}{273.15 + t}$$

9.1. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากตม้น้ำหนักแบบมาตรา (Standard uncertainty of the standard mass (g)); u_s

- มี Sensitivity coefficient¹

$$c_s = \frac{\partial V_{20}}{\partial M_s} = \left(\frac{O_4 - O_3}{O_2 - O_1} \right) \left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s (\rho_w - \rho_a)} \right) [1 - \gamma(t_w - 20)] \text{ cm}^3/\text{g} \quad (\text{Eq.5-40})$$

- เมื่อมีการใช้หลายตม้น้ำหนัก นำค่า uncertainty ของตม้นแต่ละลูกจากใบรายงานผลการสอบเทียบมาใช้

$$u_s = u_{s1} + u_{s2} + u_{s3} = \frac{U_{s1}}{k_1} + \frac{U_{s2}}{k_2} + \frac{U_{s3}}{k_3} \text{ g} \quad (\text{Eq.5-41})$$

เมื่อ U_{sn} คือ ค่าความไม่แน่นอนจากใบรายงานสอบเทียบของตม้น้ำหนักแบบมาตราแต่ละตม้น ด้วยระดับความมั่นใจ 95 % ซึ่ง k จะมีค่าเท่ากับ 2

- มี Probability distribution เป็นลักษณะ Normal

9.2. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าความหนาแน่นของตม้น้ำหนักแบบมาตรา (Standard uncertainty of density of the standard mass (g cm^{-3})) ; u_{ps}

- มี Sensitivity coefficient

$$c_{ps} = \frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_s} = (O_4 - O_3) \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \left(\frac{\rho_a}{\rho_s^2 (\rho_w - \rho_a)} \right) [1 - \gamma(t_w - 20)] (\text{cm}^3)^2/\text{g} \quad (\text{Eq.5-42})$$

- ประเมินค่าความไม่แน่นอนของความหนาแน่นของตม้น้ำหนักแบบมาตราจากวิธีการที่รู้ชนิดวัสดุที่ใช้ทำตม้นแบบมาตรา โดยอ้างอิงจากวิธี OIML R111-1: 2004(E), B.7.9.3 Method F2. ใช้ Table B.7 สำหรับตม้น้ำหนักชั้นความเที่ยง E2 ถึง M2

¹ ในการทำ Partial diff. ใช้โปรแกรม MathCAD

Table B.7 Method F2 - List of alloys most commonly used for weights

Alloy/material	Assumed density	Uncertainty ($k = 2$)
Platinum	21 400 kg m ⁻³	± 150 kg m ⁻³
Nickel silver	8 600 kg m ⁻³	± 170 kg m ⁻³
Brass	8 400 kg m ⁻³	± 170 kg m ⁻³
Stainless steel	7 950 kg m ⁻³	± 140 kg m ⁻³
Carbon steel	7 700 kg m ⁻³	± 200 kg m ⁻³
Iron	7 800 kg m ⁻³	± 200 kg m ⁻³
Cast iron (white)	7 700 kg m ⁻³	± 400 kg m ⁻³
Cast iron (grey)	7 100 kg m ⁻³	± 600 kg m ⁻³
Aluminum	2 700 kg m ⁻³	± 130 kg m ⁻³

ตึมน้ำหนักแบบมาตราที่มีใช้ในสำนักชั่งตวงวัด สำหรับการสอบเทียบจะมีทั้ง stainless steel มี uncertainty เท่ากับ 140 kg m⁻³

- มี Probability distribution เป็นลักษณะ Normal

9.3. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการหาค่าความหนาแน่นของน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางในการสอบเทียบ โดยสมการของ H. Wagenbreth และ W. Blanke, PTB (Standard uncertainty of density of the water (g cm⁻³)) ; u_{pw}

- มี Sensitivity coefficient

$$c_{pw} = \frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_w} = -(O_4 - O_3) \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \left(\frac{(\rho_s - \rho_a)}{\rho_s (\rho_w - \rho_a)^2} \right) [1 - \gamma(t_w - 20)] \quad (\text{cm}^3)^2/\text{g} \quad (\text{Eq.5-43})$$

- ประเมินค่าความไม่แน่นอนค่าความหนาแน่นของน้ำขึ้นอยู่กับค่าความไม่แน่นอนของการวัดอุณหภูมิ น้ำ ดังนั้น

$$u_{pw'} = c_{pw(tw)} \cdot u_{tw'} \quad \text{g/cm}^3 \quad (\text{Eq.5-44})$$

$$c_{pw(tw)} = \frac{\partial \rho_w}{\partial t} = \frac{(16.952577 - 1.598102510^{-2} \times t_w - 1.387252710^{-4} \times t_w^2 + 4.233840410^{-7} \times t_w^3 - 1.405150310^{-9} \times t_w^4)}{(1 + 1.688723610^{-2} \times t_w)} - 1.6887236.10^{-2} \cdot \frac{(999.83952 + 16.952577 \times t_w - 7.9905127.10^{-3} \times t_w^2 - 4.6241757.10^{-5} \times t_w^3 + 1.0584601.10^{-7} \times t_w^4 - 2.8103006.10^{-10} \times t_w^5)}{(1 + 1.6887236.10^{-2} \times t_w)^2} \quad \text{kg/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Eq.5-45})$$

โดย u_{tw} ได้จากหัวข้อ 10.2.5 ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการวัดอุณหภูมิของน้ำในการสอบเทียบ (Standard uncertainty of temperature of the water (°C))

- มี Probability distribution เป็นลักษณะ Normal

9.4. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการหาค่าความหนาแน่นของอากาศภายในห้องปฏิบัติการ (Standard uncertainty of density of the air (g cm^{-3})) ; u_{ρ_a}

- มี Sensitivity coefficient

$$c_{\rho_a} = \frac{\partial V_{20}}{\partial \rho_a} = (O_4 - O_3) \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s (\rho_w - \rho_a)^2} \right) (1 - \gamma(t_w - 20)) \quad (\text{cm}^3)^2/\text{g} \quad (\text{Eq.5-46})$$

- ประเมินค่าความไม่แน่นอนค่าความหนาแน่นของอากาศ เนื่องจากสมการที่ใช้หาค่าความหนาแน่นของอากาศเกี่ยวข้องกับการวัดค่าความดันบรรยากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของอากาศ ดังนั้นในการประเมินค่าความไม่แน่นอนจึงต้องทำการประเมินย่อยลงไปอีกระดับหนึ่งจากสมการ

$$\rho_a = \frac{0.34848 \times p - 0.009024 \times h_r \times e^{(0.0612 \times t)}}{273.15 + t}$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนที่ประเมินจากสมการจึงมีค่า

$$u_{\rho_a} = \sqrt{(c_{\rho_a(\text{eq})} \cdot u_F)^2 + (c_{\rho_a(p)} \cdot u_p)^2 + (c_{\rho_a(t)} \cdot u_t)^2 + (c_{\rho_a(h)} \cdot u_h)^2} \quad \text{g/cm}^3 \quad (\text{Eq.5-47})$$

- มี Probability distribution เป็นลักษณะ Normal

9.4.1. ค่าความไม่แน่นอนจากการสมการที่เลือกใช้

$$c_{\rho_a(\text{Eq.})} = 1 \quad (\text{Eq.5-48})$$

ค่าความไม่แน่นอนจากการใช้สมการภายใต้สภาวะเงื่อนไขสิ่งแวดล้อม

- $900 \text{ mbar} \leq p \leq 1100 \text{ mbar}$
- $10 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 30 \text{ }^\circ\text{C}$
- $h_r \leq 80\%$

ผลต่างสัมพัทธ์ของค่าความหนาแน่นที่คำนวณได้ด้วยสมการข้างบนเทียบกับค่าความหนาแน่นที่คำนวณตามคำแนะนำ CIPM จะมีค่าเท่ากับ

$$\Delta \rho_a / \rho_a = 2 \times 10^{-4} \quad (\text{Eq.5-49})$$

ดังนั้นเราจึงให้ค่าความไม่แน่นอนของการใช้สมการดังกล่าว เท่ากับ

$$u_F = 2 \times 10^{-4} \cdot \rho_a \quad (\text{Eq.5-50})$$

9.4.2. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการวัดความกดดันอากาศ

$$c_{\rho_a(p)} = \frac{\partial \rho_a(p)}{\partial p} = \frac{0.34843}{(273.15 + t)} \quad (\text{Eq.5-51})$$

$$u_p = \sqrt{u_{p1}^2 + u_{p2}^2 + u_{p3}^2} \quad (\text{Eq.5-52})$$

ประเมินอิทธิพลที่มีผลต่อการวัดค่าความดันอากาศด้วยกัน 3 สาเหตุ

9.4.2.1. ค่าความไม่แน่นอนเครื่องวัดความกดดันอากาศ จากใบรายงานผลการสอบเทียบ

$$u_{p1} = \frac{U_b}{k} \quad (\text{Eq.5-53})$$

9.4.2.2. ค่าความไม่แน่นอนของการอ่านค่าบนเครื่องวัดความกดดันอากาศ (Resolution $\pm d_p$)

$$u_{p2} = \frac{d_b}{2\sqrt{3}} \quad (\text{Eq.5-54})$$

9.4.2.3. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความแปรปรวนหรือการเปลี่ยนแปลงความกดดันของอากาศ
ขณะทำการสอบเทียบ (1010 ± 20 hPa)

$$u_{p3} = \frac{p^+ - p^-}{2\sqrt{3}} \quad (\text{Eq.5-55})$$

9.4.3. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการวัดอุณหภูมิอากาศ

$$c_{pa(t)} = \frac{\partial p_a(t)}{\partial t} = \frac{(-0.34848 \cdot p) - [h \cdot e^{0.0612 \cdot t} \cdot (0.14182 + 0.0005523 \cdot t)]}{(273.15 + t)^2} \quad (\text{Eq.5-56})$$

$$u_t = \sqrt{u_{t1}^2 + u_{t2}^2 + u_{t3}^2} \quad (\text{Eq.5-57})$$

ประเมินอิทธิพลที่มีผลต่อการวัดค่าอุณหภูมิอากาศด้วยกัน 3 สาเหตุ

9.4.3.1. ค่าความไม่แน่นอนเครื่องวัดอุณหภูมิอากาศจากใบรายงานผลการสอบเทียบ

$$u_{t1} = \frac{U_t}{k} \quad (\text{Eq.5-58})$$

9.4.3.2. ค่าความไม่แน่นอนของการอ่านค่าบนเครื่องวัดอุณหภูมิอากาศ (Resolution $\pm d_t$)

$$u_{t2} = \frac{d_t}{2\sqrt{3}} \quad (\text{Eq.5-59})$$

9.4.3.3. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความแปรปรวนหรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศขณะ
ทำการสอบเทียบ (25 ± 3 °C)

$$u_{t3} = \frac{t^+ - t^-}{2\sqrt{3}} \quad (\text{Eq.5-60})$$

9.4.4. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

$$c_{pa(h)} = \frac{\partial p_a(h)}{\partial h} = \frac{-0.009024 \cdot e^{0.0612 \cdot t}}{(273.15 + t)} \quad (\text{Eq.5-61})$$

$$u_h = \sqrt{u_{h1}^2 + u_{h2}^2 + u_{h3}^2} \quad (\text{Eq.5-62})$$

ประเมินอิทธิพลที่มีผลต่อการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศด้วยกัน 3 สาเหตุ

9.4.4.1. ค่าความไม่แน่นอนเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจากใบรายงานผลการสอบเทียบ

$$u_{h1} = \frac{U_h}{k} \quad (\text{Eq.5-63})$$

9.4.4.2. ค่าความไม่แน่นอนของการอ่านค่าบนเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Resolution $\pm d_h$)

$$u_{h2} = \frac{d_h}{2\sqrt{3}} \quad (\text{Eq.5-64})$$

9.4.4.3. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความแปรปรวนหรือการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขณะทำการสอบเทียบ ($50 \pm 15\%$)

$$u_{h3} = \frac{h^+ - h^-}{2\sqrt{3}} \quad (\text{Eq.5-65})$$

9.5. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการวัดอุณหภูมิของน้ำในการสอบเทียบ (Standard uncertainty of temperature of the water ($^{\circ}\text{C}$)) ; u_{tw}

- มี Sensitivity coefficient

$$c_{tw} = \frac{\partial V_{20}}{\partial t_w} = -(O_4 - O_3) \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s (\rho_w - \rho_a)} \right) (\gamma) \quad \text{cm}^3 / ^{\circ}\text{C} \quad (\text{Eq.5-66})$$

- ประเมินค่าความไม่แน่นอนการวัดอุณหภูมิของน้ำในการสอบเทียบ

$$u_{tw'} = \sqrt{u_{tw1}^2 + u_{tw2}^2 + u_{tw3}^2} \quad ^{\circ}\text{C} \quad (\text{Eq.5-67})$$

- มี Probability distribution เป็นลักษณะ Rectangular

ประเมินอิทธิพลที่มีผลต่อการวัดค่าอุณหภูมิของน้ำในการสอบเทียบด้วยกัน 3 สาเหตุ

9.5.1. ค่าความไม่แน่นอนเครื่องวัดอุณหภูมิของน้ำจากใบรายงานผลการสอบเทียบ

$$u_{tw1} = \frac{U_{tw}}{k} \quad (\text{Eq.5-68})$$

9.5.2. ค่าความไม่แน่นอนของการอ่านค่าบนเครื่องวัดอุณหภูมิของน้ำ (Resolution $\pm d_{tw}$)

$$u_{tw2} = \frac{d_{tw}}{2\sqrt{3}} \quad (\text{Eq.5-69})$$

9.5.3. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความแปรปรวนหรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำขณะทำการสอบเทียบ ($\pm 0.1 ^{\circ}\text{C}$)

$$u_{tw3} = \frac{t_w^+ - t_w^-}{2\sqrt{3}} \quad (\text{Eq.5-70})$$

9.6. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลือกใช้ค่าการขยายตัวตามปริมาตรลูกบาศก์ของเครื่องตวง (Standard uncertainty of coefficient of cubical thermal expansion of the material of the measure ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)) ; u_{γ}

- มี Sensitivity coefficient

$$c_{\gamma} = \frac{\partial V_{20}}{\partial \gamma} = -(O_4 - O_3) \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s (\rho_w - \rho_a)} \right) (t_w - 20) \quad \text{cm}^3 / ^{\circ}\text{C} \quad (\text{Eq.5-71})$$

- ประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าที่เลือกใช้

$$u_{\gamma'} = 0.5 \times 10^{-7} \quad ^{\circ}\text{C}^{-1} \quad (\text{Eq.5-72})$$

- มี Probability distribution เป็นลักษณะ Rectangular

9.7. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการหาค่าปริมาตรที่วัดได้จากขั้นตอนการสอบเทียบในแต่ละครั้ง (Standard uncertainty from the measurement (cm^3)) ; u_σ

- มี Sensitivity coefficient

$$c_\sigma = \frac{\partial V_{20}}{\partial \sigma} = 1 \quad (\text{Eq.5-73})$$

- ประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากผลการสอบเทียบหาค่าปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง

$$u_R = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{cm}^3 \quad (\text{Eq.5-74})$$

เมื่อ s = Standard deviation ของค่าปริมาตรที่คำนวณได้จากผลการสอบเทียบ

n = จำนวนครั้งในการสอบเทียบ

- มี Probability distribution เป็นลักษณะ Normal

9.8. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากผลของเครื่องชั่ง, u_{ba} (Standard uncertainty of balance (cm^3))

- มี Sensitivity coefficient

$$c_{ba} = \frac{\partial V_{20}}{\partial M_s} = \left(\frac{O_4 - O_3}{O_2 - O_1} \right) \left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s (\rho_w - \rho_a)} \right) [1 - \gamma(t_w - 20)] \text{ cm}^3/\text{g} \quad (\text{Eq.5-75})$$

- ประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อเครื่องชั่ง

$$u_{ba'} = \sqrt{u_s^2 + u_d^2 + u_E^2 + u_{ma}^2} \quad \text{g} \quad (\text{Eq.5-76})$$

- มี Probability distribution เป็นลักษณะ Normal

ประเมินอิทธิพลที่มีผลต่อการเครื่องชั่งด้วยกัน 4 สาเหตุ

9.8.1. ความไม่แน่นอนเนื่องจากความรู้สึกลูกของเครื่องชั่ง; u_s (OIML R 111-1:2004, C.6.4.2)

ดำเนินการทดสอบความรู้สึกลูกของเครื่องชั่งตามรายละเอียดวิธีปฏิบัติการทดสอบความรู้สึกลูกของเครื่องชั่ง ข้อ 7.6 อย่างน้อย ทุก 6 เดือน (เดือนที่ 1 และเดือนที่ 6 ของปี)

$$u_s = \sqrt{(\Delta m_c)^2 \left(\frac{u^2(m_s)}{m_s^2} + \frac{u^2(\Delta I_s)}{\Delta I_s^2} \right)} \quad (\text{Eq.5-77})$$

เมื่อ

ΔI_s คือ ค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงที่เครื่องชั่งแสดงเนื่องจากตุ้มน้ำหนักทดสอบ (mg)

$u(\Delta I_s)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของ ΔI_s (mg)

Δm_c คือ ค่าน้ำหนักที่แตกต่างเฉลี่ยระหว่างแบบมาตรฐานกับตุ้มน้ำหนักสอบเทียบ (mg) กำหนดให้เท่ากับค่า 2 ใน 3 เท่าของ MPE ของตุ้มน้ำหนักสอบเทียบ

$u(m_s)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของ m_s

m_s คือ ค่าน้ำหนักของตุ้มทดสอบความรู้สึกลูก

$u(\Delta I_S)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องที่แสดงเมื่อวางตุ้มน้ำหนักทดสอบ
ความรู้สึก โดยคำนวณจากสมการที่ (15)

$$u(\Delta I_S) = \frac{S(\Delta I_S)}{\sqrt{10}} \quad (\text{Eq.5-78})$$

เมื่อ $S(\Delta I_S)$ คือ Standard deviation ของการทดสอบ

9.8.2. ความไม่แน่นอนเนื่องจากความละเอียดของเครื่องชั่ง; u_d (OIML R 111-1:2004, C.6.4.3)

$$u_d = \left(\frac{d/2}{\sqrt{3}} \right) \times \sqrt{2} \quad (\text{Eq.5-79})$$

เมื่อ d คือ ค่าความละเอียดของเครื่องชั่ง

เนื่องจากการอ่านค่าจากเครื่องชั่งจะอ่านสองครั้ง คือ ค่าน้ำหนักของแบบมาตราและค่าน้ำหนักของตุ้มน้ำหนักสอบเทียบ ดังนั้นจึงต้องคูณด้วย $\sqrt{2}$ แต่ในกรณีขั้นตอนสอบเทียบนี้ปรับคงเหลือ

$$u_d = \left(\frac{d/2}{\sqrt{3}} \right) \quad (\text{Eq.5-80})$$

9.8.3. ความไม่แน่นอนเนื่องจากการวางเยื้องศูนย์; u_E (OIML R 111-1:2004, C.6.4.4.1)

$$u_E = \frac{\frac{d_1}{d_2} \times D}{2 \times \sqrt{3}} \quad (\text{Eq.5-81})$$

เมื่อ D คือ ค่าน้ำหนักที่แตกต่างกันมากที่สุดในการทดสอบเยื้องศูนย์ตามขั้นตอนการทดสอบเยื้องศูนย์

d_1 คือ ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของตุ้มน้ำหนักที่ห่างกันมากที่สุด

d_2 คือ ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางถึงมุมของภาคน้ำหนัก

9.8.4. ความไม่แน่นอนเนื่องจากความเป็นแม่เหล็กของตุ้มน้ำหนัก; ; u_{ma} (OIML R 111-1:2004, C.6.4.5) ห้องปฏิบัติการฯ พิจารณาค่า Standard Uncertainty ความไม่แน่นอนเนื่องจากความเป็นแม่เหล็กของตุ้มน้ำหนักแบบมาตรามีค่าน้อยมาก ให้มีค่าเท่ากับ ศูนย์

9.9. ค่าความไม่แน่นอนสาเหตุเกิดจากการเลื่อนค่า (drift) ของตุ้มน้ำหนักแบบมาตรา (u_s Drift)
ประเมินตามมติคณะอนุกรรมการพิจารณารับรองห้องปฏิบัติการสอบเทียบทางกลและเคมี (มติการประชุมครั้งที่ 3-1/2547) มี 3 กรณี

- กรณีที่ 1 มีประวัติการสอบเทียบของ Standard และมีค่า Drift ของ Standard น้อยมากๆ เกือบเป็นศูนย์ ค่า Drift ของ Standard อาจกำหนดได้จาก Import uncertainty ที่ 1σ และกำหนดการกระจายแบบ Triangular และ divisor = $\sqrt{6}$ อ้างอิงตาม M3003
- กรณีที่ 2 มีการสอบเทียบของ Standard ครั้งแรก ไม่รู้ค่า Drift ของ Standard จะมีกำหนดการกระจายแบบ Rectangular ซึ่งจะได้ค่า Drift ของ Standard เท่ากับ Import uncertainty ที่ 2σ และ divisor = $\sqrt{3}$

- 3) กรณีที่ 3 มีประวัติการสอบเทียบของ Standard และมีค่า Drift ของ Standard จะมีกำหนดการกระจายแบบ Rectangular ซึ่งจะได้ค่า Drift ของ Standard เท่ากับ ค่าของปีล่าสุด – ค่าของปีก่อนหน้า (จากใบรายงานผลของแบบมาตรา scale calibrator) และ divisor = $\sqrt{3}$

- มี Sensitivity coefficient

$$c_{sDrift} = \frac{\partial V_{20}}{\partial \Delta M_s} = \left(\frac{O_4 - O_3}{O_2 - O_1} \right) \left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s (\rho_w - \rho_a)} \right) [1 - \gamma(t_w - 20)] \text{ cm}^3/\text{g} \quad (\text{Eq.5-82})$$

- เมื่อมีการใช้หลายตุ้มน้ำหนัก นำค่า uncertainty ของตุ้มแต่ละลูกจากใบรายงานผลการสอบเทียบมาใช้ (กรณีที่ 2)

$$u_{sDrift} = U_{s1} + U_{s2} + \dots + U_{sn} \quad \text{g} \quad (\text{Eq.5-83})$$

เมื่อ U_{sn} คือ ค่าความไม่แน่นอนจากใบรายงานสอบเทียบของตุ้มน้ำหนักแบบมาตราแต่ละตุ้ม ด้วยระดับความมั่นใจ 95 % ซึ่ง k จะมีค่าเท่ากับ 2

- มี Probability distribution เป็นลักษณะ Rectangular

ตัวอย่างการแสดงผลวิธีการคำนวณ

ตัวอย่างการแสดงผลวิธีการคำนวณในที่นี้เป็นการสอบเทียบเครื่องตวง ขวดแก้วกันโป่ง (Flasks)

- พิกัดกำลัง 100 มิลลิลิตร
- ทำด้วยวัสดุ แก้ว Borosilicate
- อุณหภูมิอ้างอิง 20 °C
- ลักษณะการใช้งาน แบบรับ
- Drain time 30 วินาที

1. ดำเนินการสอบเทียบตามขั้นตอน การสอบเทียบแบบรับ กดปุ่มตั้งศูนย์ (Zero) เครื่องชั่ง ทำการบันทึกค่าน้ำหนักที่อ่านได้ บันทึกเป็นค่า O_1 เท่ากับ 0
2. วางตุ้มน้ำหนักแบบมาตราลงบนส่วนรับน้ำหนักเครื่องชั่ง บันทึกเป็นค่า O_2 โดยใช้ตุ้มน้ำหนักแบบมาตราทั้งหมด 5 ต้ม รวมกันแล้วเท่ากับ 153.5 กรัม นำค่าแก้ไขน้ำหนักตุ้มและ ค่าความไม่แน่นอนจากใบรายงานสอบเทียบตุ้มน้ำหนักแบบมาตรา สรุปแล้วได้เท่ากับ
 - ค่าน้ำหนักตุ้ม 153.5 กรัม
 - ค่าแก้ไขน้ำหนักตุ้ม 0.00039 มิลลิกรัม
 - ค่าความไม่แน่นอนน้ำหนักตุ้มรวม 0.00037 มิลลิกรัม
3. กดปุ่มตั้งศูนย์ (Zero) เครื่องชั่ง วางเครื่องตวงเปล่าที่แห้งสนิทพร้อมปิดฝา ลงบนเครื่องชั่ง จำนวน 5 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำค่าเฉลี่ยที่ได้ บันทึกเป็นค่า O_3 (ใช้เป็นค่าน้ำหนักเครื่องตวงเปล่า O_3 ในแต่ละรอบการสอบเทียบ) เท่ากับ 53.6695
4. เติมน้ำลงในเครื่องตวงจนระดับน้ำอยู่ต่ำกว่าขีดขึ้นหมายมาตราที่แสดงเล็กน้อย
5. ค่อยๆ เติมน้ำลงไปเพื่อให้ห้องน้ำแตะขีดขึ้นหมายมาตราพิกัดกำลังพอดี บันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 25.1 °C แต่ปรับแก้ไขค่าเครื่องวัดอุณหภูมิ SLW หมายเลข 8164 จะได้ค่าอุณหภูมิเท่ากับ 25.12 °C ซึ่งจะนำค่านี้ไปใช้ในการคำนวณ
6. ปิดฝาเครื่องตวง ที่มีน้ำอยู่ไปชั่งน้ำหนัก อ่านและบันทึกค่าน้ำหนักที่เป็นค่า O_4 เท่ากับ 153.2154 กรัม
7. บันทึกเวลา อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย 25.65 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 50.65 % และความกดดันอากาศเฉลี่ย 1006.5 hPa เมื่อเริ่มและเสร็จสิ้นการสอบเทียบ
8. คำนวณหาค่าปริมาตรเครื่องตวง ที่อุณหภูมิอ้างอิง 20 °C

8.1. น้ำหนักที่ชั่งได้

$$O_4 - O_3 = 99.5459 \quad \text{กรัม}$$

$$O_2 - O_1 = 153.5004 \quad \text{กรัม}$$

8.2. ข้อมูลตุ้มน้ำหนักแบบมาตรา

$$M_s = 153.5 \quad \text{กรัม}$$

$$\rho_s = 7.95 \quad \text{กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

8.3. คำนวณหาค่าความหนาแน่นอากาศ

$$\rho_a = \frac{0.34848 \times p - 0.009024 \times h_r \times e^{(0.0612t)}}{273.15 + t}$$

เมื่อ

$$t = 25.65 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$h_r = 50.65 \%$$

$$p = 1006.5 \text{ hPa}$$

แทนค่า

$$\rho_a = \frac{0.34848 \times (1006.5) - 0.009024 \times (50.65) \times e^{(0.0612 \times 25.65)}}{273.15 + (25.65)} = 0.001168 \text{ g/cm}^3$$

8.4. คำนวณหาค่าความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิวัดได้ $t_w = 25.12 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\rho_w = \frac{\sum_{n=0}^5 a_n \times t_w^n}{1 + b t_w}$$

$$\rho_w = 0.997012 \text{ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

8.5. คำนวณหาค่าปริมาตรเครื่องตวง เมื่อใช้น้ำเป็นตัวกลางสอบเทียบที่อุณหภูมิวัดได้

$$V_{wt} = (O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right)$$

$$V_{wt} = (99.5459) \times \left(\frac{153.5}{153.5004} \right) \times \left(1 - \frac{0.001168}{7.95} \right) \times \left(\frac{1}{0.997012 - 0.001168} \right) = 99.94127 \text{ cm}^3$$

8.6. คำนวณหาค่าปริมาตรเครื่องตวง ที่อุณหภูมิอ้างอิง $t_0 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$V_0 = \frac{(O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right)}{(1 + \gamma(t_w - 20))}$$

$$\cong (O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \times (1 - \gamma(t_w - 20))$$

$$= 99.94127 \text{ cm}^3$$

8.7. ทำการคำนวณซ้ำกันในการสอบเทียบทั้ง 5 รอบ จากนั้นนำค่าปริมาตรเครื่องตวง ที่อุณหภูมิอ้างอิง $t_0 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ มาหาค่าเฉลี่ยในการรายงานผลการสอบเทียบ

$$\overline{V_0} = 99.94361 \text{ cm}^3$$

8.8. คำนวณค่า Repeatability ในการสอบเทียบทั้ง 5 ครั้ง

$$\text{Repeatability} = \frac{(V_0)_{\max} - (V_0)_{\min}}{(V_0)_{\min}} \times 100$$

$$\text{Repeatability} = \frac{99.94583 - 99.94127}{99.94127} \times 100 = 0.0046 \%$$

8.9. คำนวณผลอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดขวดแก้วกันโป่ง (Flasks) ที่ปริมาตร 100 ml มีอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาด 0.1 ml

แต่เนื่องจากบนขวดแก้วกันโป่งบ่งบอกพิกัดกำลังจริงเท่ากับ 100.00 ml สำหรับปริมาตรที่สอบเทียบได้เท่ากับ 99.94361 ml ดังนั้นจึงที่ผลต่างเท่ากับ

$$= 100.00 - 99.94361 = 0.05639 \text{ ml} \quad \text{ผ่าน}$$

9. คำนวณหาค่าความไม่แน่นอน สามารถศึกษาได้ใน โปรแกรมคำนวณ Excel **ขตว 101 เครื่องตวงขนาดเล็ก & Pyknometer & ลูกจุ่ม Gravimetric MTD.xlsx** ใน sheet **ขตว 101 Uncer-55**

$$\text{Uncertainty} \leq \frac{\text{MPE}}{3} = \frac{0.1}{3} = 0.033 \text{ ml}$$

$$\text{Uncertainty} = 0.027 \text{ ml(mm}^3\text{)} < 0.033 \text{ ml} \quad \text{ผ่าน}$$

ANS

สำนักงานกลางจังหวัด
เขตที่รายงานสอบเทียบ
วันที่สอบเทียบ 12/02(V)-57
สถานที่สอบเทียบ (ไทย) 11 ธันวาคม 2556
(อังกฤษ) สำนักงานกลางจังหวัด
เจ้าของเครื่อง (ไทย) CBWMA, Nonthaburi, TH
(อังกฤษ) สำนักงานจังหวัด
ที่อยู่ CBWMA, Nonthaburi, TH
 44/100 ถนนพหลโยธิน ต.บางกระดอ
 อ. เมือง จ.นนทบุรี 11000

เจ้าหน้าที่ตรวจสอบความเที่ยง
หัวหน้าห้องปฏิบัติการ
 นายพิชญ์ บุญดี
 Mr. Pichat Boondit
 นายจิตติ สิริพรธำ
 Mr. Pichat Sirtprasophon

ข้อมูลตัวบ่งชี้แบบมาตรา :
 ชนิด VF 100
 หมายเลขเครื่อง 5513131
 พิกัดกำลัง 100
 ความหนาแน่น 7.95 g/cm³
 ชั้นความเที่ยง F1
 ชั้นความเที่ยง (d) 1
 วิธีการใช้ Class A
 หลักการชั่งน้ำหนัก Boron Silicate
 สเปกตรัมการขยายตัวตามความยาว 0.00001
 อุณหภูมิอ้างอิง 20 องศาเซลเซียส
 หมายเลขเฉลี่ย 0.000038

ข้อมูลเครื่องมือวัด :
 หมายเลข 8164
 ช่วงการวัด 0-100
 ชั้นความเที่ยง (e) 0.1
 ชั้นความเที่ยง (OML R76) 0.1
 Balance Uncertainty (g) 0.000038

เงื่อนไขสอบเทียบ :
 สอบเทียบเครื่องชั่ง
 หมายเลขน้ำ 30
 น้ำที่ 30
 น้ำกลั่นสองครั้ง

ผลการสอบเทียบ :
 ครึ่งที่ 1 ครึ่งที่ 2 ครึ่งที่ 3 ครึ่งที่ 4 ครึ่งที่ 5
 จุดที่ 1 100 จุดที่ 2 100 จุดที่ 3 100 จุดที่ 4 100 จุดที่ 5 100

1. ทดสอบที่ขึ้นหมายเลขมาตรชี้ที่ 1		100 มล.		100 มล.		100 มล.		100 มล.		100 มล.		รวม (n)	
ค่าที่วัดได้	หน่วย	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 5	จุดที่ 6	จุดที่ 7	จุดที่ 8	จุดที่ 9	จุดที่ 10	รวม (n)	รวม (n)
ค่าที่วัดได้ที่แสดง	ก.	100.00	50.00	2.00	1.00	0.50	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.00039	153.500
ค่าที่วัดได้ที่แก้ไขแล้ว	มก.	0.2	0.09	0.046	0.028	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.00039	153.500
ค่าที่วัดได้ที่แก้ไขแล้ว (M)	ก.	100.0002	50.00009	2.000046	1.000028	0.500026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.00039	153.500
ค่าความไม่แน่นอน (k=2)	มก.	0.17	0.1	0.04	0.033	0.027	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.00039	153.500
ผลการสอบเทียบ													
ขั้นตอน O1 - O2 - O3 - O4													
O ₁	เครื่องชั่งแสดงค่าที่ศูนย์ (Set Zero)	ก.	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
O ₂	น้ำหนักที่แสดงค่าที่ศูนย์ (Set Zero)	ก.	153.5004	153.5004	153.5004	153.5004	153.5004	153.5004	153.5004	153.5004	153.5004	153.5004	153.5004
O ₃	น้ำหนักที่แสดงค่าที่ศูนย์	ก.	53.6695	53.6695	53.6695	53.6695	53.6695	53.6695	53.6695	53.6695	53.6695	53.6695	53.6695
O ₄	น้ำหนักที่แสดงค่าที่ศูนย์	ก.	153.2154	153.2154	153.2154	153.2154	153.2154	153.2154	153.2154	153.2154	153.2154	153.2154	153.2154
O ₅	อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1
O ₆	อุณหภูมิที่ปรากฏ	องศาเซลเซียส	25.12	25.12	25.12	25.12	25.12	25.12	25.12	25.12	25.12	25.12	25.12
บันทึกผลการปฏิบัติงาน 1/5													
เริ่ม (Max) เร็ว (Min)													
เวลา 9.25 11.35 น.													
อุณหภูมิ 25.9 25.4 องศาเซลเซียส													
ความชื้นสัมพัทธ์ 51.8 49.5 เปอร์เซ็นต์													
ความดันบรรยากาศ 1006.6 1006.4 เฮกโตปาสกาล													

รูปที่ 5-16 ตารางบันทึกผลการสอบเทียบ

คำนวณผลการสอบเทียบเครื่องตรวจขนาดเล็ก (เครื่องแก้ว) และถูกกลุ่มโดยวิธีซึ่งนำหนักด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์

ผลลัพธ์

1. ผลการสอบเทียบทดสอบที่ระดับความความดันที่ 1 100 มล. พิกัดกำลัง 100 มล. *** ASTM E542-01(2012)

	$O_1 - O_3$ ก.	M_1 ก.	$O_2 - O_1$ ก.	P_1 ก./ลบ.ชม.	P_0 ก./ลบ.ชม.	L_w องศาเซลเซียส	P_w ก./ลบ.ชม.	V_{in} ลบ.ชม.	V_o ลบ.ชม.	σ_w mN/m	d ชม.	h_o ชม.	$M_1/O_2 - O_1$ *** < 1.000013
ครั้งที่ 1	99.5459	153.5	153.5004	7.95	0.001168	25.12	0.997012	99.94639	99.94127				0.999997394
ครั้งที่ 2	99.5496	153.5	153.5004	7.95	0.001168	25.12	0.997012	99.95011	99.94499				0.999997394
ครั้งที่ 3	99.5505	153.5	153.5005	7.95	0.001168	25.12	0.997012	99.95095	99.94583				0.999996743
ครั้งที่ 4	99.547	153.5	153.5004	7.95	0.001168	25.12	0.997012	99.9475	99.94238				0.999997394
ครั้งที่ 5	99.5482	153.5	153.5004	7.95	0.001168	25.12	0.997012	99.9487	99.94358				0.999997394

$V_{o,avg}$: 99.94361 ลบ.ชม.

Standard Divisions: 0.00186

ค่าความสามารถในการทำได้ (%) : 0.00456

เกณฑ์ตัดสิน (%) ≤ 0.02

ผลการตัดสิน : ผ่าน

รูปที่ 5-17 สรุปผลการคำนวณสอบเทียบ

บทที่ 6

การสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะ โดยวิธีการตวงเปรียบเทียบ และวิธีการชั่งน้ำหนัก (Calibration of Graduated Neck-Type Metal Proving Tank by Volumetric Method and Gravimetric Method)

เนื่องจากในปัจจุบันอุตสาหกรรมปิโตรเลียมได้เจริญก้าวหน้าอย่างมากมาย การส่งจ่ายและซื้อขายของเหลวผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมจึงมีกันอย่างกว้างขวาง ในขณะที่ราคาต่อหน่วยก็เพิ่มสูงมากขึ้นเช่นกัน ความถูกต้องของปริมาณการส่งจ่ายซื้อขายหรือการให้บริการฝากเก็บผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมจึงได้ให้ความสนใจมากขึ้นเนื่องจากมูลค่าทางด้านธุรกรรมมีเดิมพันสูง ในขณะเดียวกันการผลิตน้ำจืดสำหรับบริโภคและอุปโภคก็เติบโตอย่างรุนแรงเช่นกันทั้งในตัวเมืองและในนิคมอุตสาหกรรมต่างๆ ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องของปริมาตรการส่งจ่ายยังได้รับความสนใจและถูกใช้เป็นเครื่องมือในการบริหารจัดการให้มีประสิทธิภาพทางด้านธุรกิจให้สูงที่สุด วิธีการตรวจสอบความถูกต้องปริมาตรการส่งจ่ายโดยผ่านมาตรวัด (flowmeters) ให้มีความน่าเชื่อถือมีหลายวิธีการด้วยกันแต่การใช้เครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะที่มีค่าปริมาตรที่แน่นอน, ถูกต้อง และเป็นวิธีการวัดแบบ Static ยังคงเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมและน่าเชื่อถือสูงในการตรวจสอบมาตรวัดชนิดต่างๆ ที่ใช้วัดปริมาณส่งจ่ายและซื้อขายของเหลวผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและน้ำจืด แต่เมื่อมีข้อดีแล้วก็ต้องมีข้อเสีย นั่นคือขั้นตอนปฏิบัติงานโดยใช้เครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะทำได้ไม่สะดวกและรวดเร็วมากนัก ตลอดจนยังมีเรื่องขีดจำกัดอัตราการไหลในการสอบเทียบซึ่งสัมพันธ์กับพิกัดกำลังเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะอีกด้วย ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในบทต่อไป

เครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะในปัจจุบันได้รับความนิยมและใช้งานในหลากหลายสาขา ไม่ว่าจะเป็นทางด้านการซื้อขายผลิตภัณฑ์ของเหลวปิโตรเลียมใช้ถังตวงทำด้วยโลหะในการตรวจสอบมาตรวัดน้ำมันหรือใช้สำหรับสอบเทียบจัดทำ Tank Table ของถังสำรองเก็บน้ำมันสำเร็จรูปใต้ดินในสถานบริการ, การซื้อขายน้ำประปาหรือน้ำจืด ตลอดจนการใช้ตรวจสอบมาตรวัดปริมาตรของเหลวในการซื้อขายสินค้าอื่นๆ เช่น น้ำนมดิบ น้ำอ้อยดิบ เป็นต้น ซึ่งจำแนกการใช้งานเครื่องตวงแบบมาตรนี้ออกเป็น 2 กลุ่มหลักๆ คือ

1. เครื่องตวงแบบมาตราใช้เพื่อสอบเทียบถังตวงที่มีชั้นความเที่ยงต่ำกว่าหรือถังตวงที่มีปริมาตรสูงกว่า ตลอดจนใช้สำหรับเป็นแบบมาตราในการสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (small volume prover หรือ compact prover) และ
 2. เครื่องตวงแบบมาตราใช้สอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวทั้งในขบวนการผลิตและการซื้อขาย
- ดังนั้นเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะที่มีชั้นความเที่ยงสูงโดยปกติจะได้รับการสอบเทียบด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก หรือที่เรียกว่า “Gravimetric Method” ตาม Traceability Chain ดังในรูปที่ 8-15 แต่ค่อนข้างมีข้อจำกัดในเรื่องพิกัดกำลังของเครื่องตวงแบบมาตราเนื่องจากหากต้องการเครื่องตวงแบบมาตราพิกัดกำลังสูงจะต้องใช้เครื่องชั่งที่มีพิกัดกำลังสูงอีกทั้งต้องเป็นเครื่องชั่งที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงซึ่งหาไม่ได้ในเครื่องชั่ง

ที่มีหลักการทำงานโดยทั่วไปแต่มักจะเป็นเครื่องซึ่งที่มีหลักการทำงานพิเศษ ราคาค่าใช้จ่ายจึงสูงเป็นเงาตามตัว สำหรับเครื่องตวงแบบมาตราที่มีชั้นความเที่ยงต่ำลงมาเกิดจากการสอบเทียบด้วยเครื่องตวงแบบมาตราที่มีชั้นความเที่ยงสูงกว่าโดยวิธีการตวงเปรียบเทียบหรือที่เรียกว่า “Volumetric Method”

ในบทนี้หรือบทที่เกี่ยวข้อง เราอาจพบคำว่า “เครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะ”, “ถังตวงแบบมาตรา”, “เครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะ” หรือ “ถังตวง” ก็อย่าตกใจเนื่องจากล้วนเป็นเครื่องตวงที่อยู่ในกลุ่มเป้าหมายในเนื้อหา ซึ่งพออธิบายโดยสังเขปว่า เครื่องตวงตามพระราชบัญญัติมาตราชั่งตวงวัด พ.ศ. 2542 มีด้วยกันหลายชนิด ถังตวงทำด้วยโลหะถือเป็นเครื่องตวงชนิดหนึ่ง ในขณะที่คำว่า “แบบมาตรา” ก็แบ่งเป็น แบบมาตราชั้นหนึ่ง (Primary or National Standard), แบบมาตราชั้นสอง (Secondary or Reference Standard) และแบบมาตราชั้นสาม (Working Standard) ส่วนคำเรียก “ถังตวง” ก็เป็นคำที่ใช้พูดถึงในการปฏิบัติงานเพื่อง่ายต่อการเรียก ก็เท่านั้นเอง

ดังนั้นเรามาเริ่มทำความรู้จักเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะแบบคอมมีซิดขึ้นหมายมาตราแสดงปริมาตรที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานเท่าที่รวบรวมมาให้ได้ ดังนี้

มาตรฐานเครื่องตวงแบบมาตราที่ใช้ในภาคสนามชนิดถังตวงโลหะแบบคอมมีซิดขึ้นหมายมาตราแสดงปริมาตร (Graduated Neck Type Volumetric Field Standards)

ก. ขอบเขต

ใช้กับเครื่องตวงแบบมาตราที่ใช้ในภาคสนามชนิดถังตวงทำด้วยโลหะแบบคอมมีซิดขึ้นหมายมาตราแสดงปริมาตรขนาดพิคกิ้งต่าง ๆ ณ อุณหภูมิอ้างอิงและความดันบรรยากาศ เครื่องตวงแบบมาตราใช้สำหรับบรรจุของเหลวทดสอบที่มีสถานะของเหลวเพียงสถานะเดียวที่ความดันบรรยากาศโดยปราศจากความดันภายในตัวเครื่องตวง และขณะทำการบรรจุของเหลวอาจสามารถนำไอกลับคืนมาหรือสูญเสียไปขณะใช้งานก็ได้ กำหนดขึ้นและใช้โดยสำนักงานกลางชั่งตวงวัดเพื่อใช้สำหรับการตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวและเครื่องตวงปริมาตร ตลอดจนเพื่อใช้ในการปฏิบัติงานตรวจสอบของเจ้าหน้าที่, หน่วยงานอื่นๆ และ/หรือ ผู้ที่เกี่ยวข้องงานชั่งตวงวัดเชิงกฎหมาย (Legal Metrology)

เครื่องตวงแบบมาตราต้องได้รับการออกแบบและจัดสร้างให้มีขีดความสามารถในการรักษาและคงสภาพอัตราเพื่อหล่อเพื่อขาด และค่าความไม่แน่นอนอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดในระยะเวลาการใช้งานที่เหมาะสม

ข. ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะ

1. พิกัดความจุของเครื่องตวงแบบมาตรา (Nominal Capacity)

พิกัดความจุของเครื่องตวงแบบมาตราที่ใช้ในการตรวจสอบให้คำรับรองระบบมาตรวัดของเหลว หรือใช้ในการตวงเปรียบเทียบกับเครื่องตวงที่ใช้งานอยู่ ต้องมีขนาดพิกัดให้เหมาะสมกับอัตราเพื่อหล่อเพื่อขาดและปริมาณของเหลวที่ทดสอบ อีกทั้งวัสดุที่ใช้กับของเหลวนั้นๆ ต้องไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานหรือสิ่งแวดล้อม สำหรับการเคลือบผิวภายในเครื่องตวงแบบมาตราอาจทำได้แต่ต้องกระทำด้วยวิธีที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งพิกัดความจุของเครื่องตวงแบบมาตราเป็นไปตามตารางที่ 6-1

ชนิดแบบมาตรา	พิกัดความจุ (Nominal Capacity; L)
เครื่องตวงทดสอบแบบมาตราขนาดเล็ก ("Standard test measures" or "Measures")	5 - 10 - 20
เครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ ("Proving tanks" or "Prover")	20 or more

ตารางที่ 6-1 พิกัดความจุของเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะ

นั่นคือเครื่องตวงทดสอบแบบมาตราขนาดเล็ก (Standard test measures) ที่ใช้ในภาคสนาม มีขนาดพิกัดกำลัง 5 ลิตร, 10 ลิตร และ 20 ลิตร สำหรับเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ (Proving tanks) ที่ใช้ในภาคสนามมีขนาดพิกัดกำลัง 50 ลิตร, 100 ลิตร, 200 ลิตร, 500 ลิตร, 1,000 ลิตร, 2,000 ลิตร, 3,000 ลิตร และ 5,000 ลิตร โดยเฉพาะเครื่องตวงขนาดใหญ่ ขนาด 5,000 ลิตร เป็นเครื่องตวงที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในเอกสารนี้ การเคลื่อนย้ายสามารถติดตั้งบนรถบรรทุกหรือรถพ่วงได้ในแนวตั้ง

ค่าพิกัดความจุของเครื่องตวงแบบมาตราควรมีขนาดระบุเป็นค่า 1×10^k , 2×10^k หรือ 5×10^k ลิตร โดยที่ k เป็นเลขจำนวนเต็มบวก จำนวนเต็มลบ หรือศูนย์

หากการจัดทำเครื่องตวงแบบมาตรามีพิกัดกำลังไม่เป็นไปตามที่ระบุข้างต้น แต่ต้องมีคุณสมบัติครบตามที่กำหนดไว้พออ่านโลมได้ แต่ควรมีค่าตามที่ระบุเพื่อสะดวกในการจัดหาแบบมาตราในการปฏิบัติงาน

2. วัสดุ (Material)

2.1. การสร้างเครื่องตวงแบบมาตราที่ใช้ในภาคสนามควรใช้วัสดุชนิด เหล็กที่มีคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) หรือเหล็กสแตนเลส (Stainless Steel; 300 series) หรือวัสดุที่มีความเสถียรภาพในเชิงความร้อนและมีสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Coefficient of Thermal Expansion) ไม่สูงกว่า 2 เท่าของเหล็กสแตนเลส (Stainless Steel; 3xx series) ที่อุณหภูมิใช้งาน และไม่ควรรีใช้พลาสติกและอลูมิเนียม หากใช้วัสดุแตกต่างจากนี้ ต้องได้รับความเห็นชอบจากสำนักชั่งตวงวัด

2.2. วัสดุอุปกรณ์ประจำเครื่องตวงแบบมาตราต้องไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีและปฏิกิริยาเชิงกล หรือปนเปื้อนกับของเหลวที่ใช้งาน อีกทั้งต้องไม่เป็นอันตรายกับผู้ใช้งาน

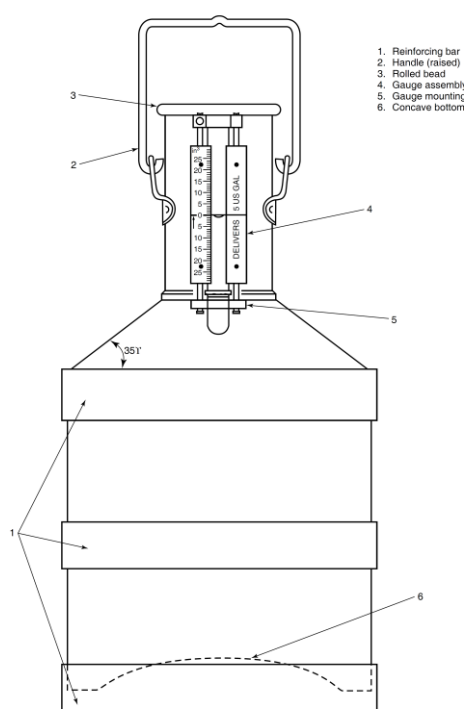
2.3. ขาตั้ง ที่แขวน หูหิ้วหรือที่จับและอื่นๆ อาจใช้วัสดุที่มีความคงทนและเหมาะสมได้

3. การออกแบบและจัดทำเครื่องตวงแบบมาตรา (Design and Fabrication)

3.1. รูปร่างและลักษณะทั่วไป

3.1.1. รูปร่างของเครื่องตวงแบบมาตราที่ใช้งานต้องได้รับการออกแบบให้มีสภาพคงรูปตลอดระยะเวลาการใช้งาน มีความมั่นใจว่าระบายของเหลวออกจากเครื่องตวงได้อย่างสมบูรณ์ไม่มีของเหลวเหลือค้างภายในถัง อีกทั้งต้องป้องกันไม่ให้อากาศถูกดักติดอยู่ภายใน ณ ส่วนหนึ่งส่วนใดของเครื่องตวงขณะใช้งาน

- 3.1.2. พื้นที่ภาคตัดตั้งฉากกับแนวแกนตั้งของเครื่องตวงแบบมาตราต้องเป็นรูปวงกลมและมีรูปร่างที่ง่ายต่อการระบายของเหลวออกจากเครื่องตวงแบบมาตรา การกำหนดขนาดพิจารณาตามคำแนะนำตารางที่ 6-2
- 3.1.3. ส่วนบนของคอเครื่องตวงที่เปิดออก จะเสริมให้แข็งแรงโดยการพับปลายม้วนให้กลมหรือเชื่อมแผ่นเหล็กติดกับคอเครื่องตวง (ดูรูปที่ 6-1 และรูปที่ 6-4)
- 3.1.4. เครื่องตวงทดสอบตั้งอยู่บนพื้นระดับได้อย่างมั่นคง โดยแนวแกนตั้งของเครื่องตวงต้องตั้งฉากกับพื้นระดับ ตลอดเวลาขณะปฏิบัติงาน
- 3.1.5. ใช้เหล็กมัด (Reinforcing Bands) หรือวิธีอย่างอื่นที่เหมาะสมช่วยเสริมความแข็งแรงเพื่อป้องกันเครื่องตวงแบบมาตราบิดเบี้ยวเมื่อบรรจุของเหลวเต็มเครื่องตวง หรือเมื่อถูกเคลื่อนย้าย (ดูรูปที่ 6-1, รูปที่ 6-9) เมื่อเครื่องตวงแบบมาตราอยู่ในแนวระดับและบรรจุของเหลวเต็มระดับตามพิกัดกำลังของเครื่องตวงแล้ว เครื่องตวงดังกล่าวต้องไม่เปลี่ยนแปลงแนวระดับเนื่องจากน้ำหนักของเหลวกระทำต่อผนังด้านล่าง และ/หรือผนังด้านข้างเครื่องตวง
- 3.1.6. กันด้านล่างของเครื่องตวงแบบมาตราขนาดเล็กได้ออกแบบให้โค้งมนป้องกันรูปร่างบิดเบี้ยวโดยน้ำหนักของเหลวเมื่อบรรจุของเหลวเพื่อป้องกันการเสียหายเนื่องจากการใช้ (ดูรูปที่ 6-1)



รูปที่ 6-1 เครื่องตวงแบบมาตราขนาดเล็ก

- 3.1.7. ปริมาตรของเครื่องตวงแบบมาตราต้องมีค่าคงที่แน่นอน โดยไม่ต้องใช้เครื่องช่วยบรรจุหรือการปรับแต่งปริมาตรภายในเครื่องตวงแบบมาตราด้วยวิธีการใดๆ

ขนาดพิกัดกำลัง (Nominal Capacity)	ความหนาแน่นที่สุดของ แผ่นเหล็กสแตนเลสหรือ แผ่นเหล็กคาร์บอนต่ำ *	เส้นผ่าศูนย์กลางสูงสุดของ คอเครื่องตวง (ภายใน)	เส้นผ่าศูนย์กลางของ หลอดวัดระดับ (ภายใน)	ความลาดเอียงของ กรวยด้านบน ที่น้อยที่สุด	ความลาดเอียงของ กรวยด้านล่าง ที่น้อยที่สุด	ขนาดของท่อระบายน้ำ ขนาดต่ำสุด/สูงสุด
5 ลิตร	0.8 มม. **	57 มม.	13 มม.	35 องศา	-	-
10 ลิตร	0.8 มม. **	76 มม.	13 มม.	35 องศา	20 องศา	1.5 / 2.25 นิ้ว
20 ลิตร	0.8 มม. **	98 มม.	13 มม.	35 องศา	20 องศา	1.5 / 2.25 นิ้ว
50 ลิตร	0.8 มม. **	127 มม.	13 มม.	35 องศา	20 องศา	1.5 / 2.25 นิ้ว
100 ลิตร	2.8 มม.	127 มม.	16 มม.	25 องศา	20 องศา	1.5 / 2.25 นิ้ว
200 ลิตร	2.8 มม.	152 มม.	16 มม.	25 องศา	20 องศา	2 / 3 นิ้ว
500 ลิตร	2.8 มม.	203 มม.	16 มม.	25 องศา	20 องศา	2 / 3 นิ้ว
1000 ลิตร	2.8 มม.	254 มม.	16 มม.	25 องศา	20 องศา	2 / 3 นิ้ว
2000 ลิตร	3.6 มม.	336 มม.	16 มม.	25 องศา	20 องศา	3 / 4.5 นิ้ว
3000 ลิตร	4.4 มม.	336 มม.	16 มม.	25 องศา	20 องศา	4 / 6 นิ้ว
5000 ลิตร	4.4 มม.	387 มม.	16 มม.	25 องศา	20 องศา	4 / 6 นิ้ว

* เป็นความหนาแน่นที่ออกแบบตามพิกัดกำลังของเครื่องตวงแบบมาตรา แต่ความหนาแน่นจริงของวัสดุสามารถเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อย

** ความหนาแน่นที่สุดของพื้นด้านล่างของเครื่องตวงแบบมาตราเท่ากับ 1.3 มม.

ตารางที่ 6-2 ขนาดของเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะแนะนำ

3.1.8. หากเครื่องตวงแบบมาตราขนาดเล็กประกอบด้วยหัว เมื่อทำการแขวนเครื่องตวงแบบมาตราดังกล่าวด้วยหัวขณะบรรจุของเหลวเต็ม เครื่องตวงแบบมาตราดังกล่าวต้องอยู่ในแนวตั้งตลอดเวลา การติดตั้งหัวเกี่ยวข้องกับหัวควรยึดติดบริเวณคอดีกว่าบริเวณกรวยส่วนบนของเครื่องตวง ทั้งนี้ก็เพื่อป้องกันการเสียรูปทรงของเครื่องตวงได้เมื่อแขวนเครื่องตวงขณะบรรจุของเหลวเต็ม (ดูรูปที่ 6-1)

3.2. คอของเครื่องตวงแบบมาตรา

3.2.1. เส้นผ่านศูนย์กลางคอเครื่องตวงแบบมาตราขนาดเล็ก (Diameter of Neck of the Standard Test Measures) และขนาดใหญ่ (Proving Tanks) ต้องกว้างเพียงพอ ไม่ก่อให้เกิดปัญหาของการล้นของของเหลวหรืออากาศขณะใส่ของเหลวลงไป อีกทั้งต้องมีขนาดเพียงพอต่อการทำความสะอาดและตรวจสอบภายในได้ แต่ขณะเดียวกันขนาดของคอเครื่องตวงแบบมาตราต้องมีขนาดเล็กเพียงพอต่อการวัดปริมาตรของเหลวด้วยความเที่ยงตรงตามอัตราเพื่อเหลือเผื่อขาดที่กำหนด ดังนั้นกำหนดได้ว่า **ความแตกต่างของระดับของเหลวภายในคอเครื่องตวงแบบมาตราอย่างน้อยที่สุด 3 มิลลิเมตร จะต้องมามีค่าเท่ากับค่าสมบูรณของอัตราเพื่อเหลือเผื่อขาดของเครื่องตวงแบบมาตราที่พิกัดนั้นๆ** เนื่องจากการกำหนดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางคอเครื่องตวงแบบมาตราขนาดเล็กและขนาดใหญ่เป็นเรื่องที่มีความยืดหยุ่นเพื่อความเหมาะสมกับการใช้งานในภาคสนามแต่ต้องมีขนาดคงที่สม่ำเสมอตลอดความสูงของคอเครื่องตวง ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางคอเครื่องตวงแบบมาตราทั้ง 2 แบบกำหนดให้เป็นดังนี้

$$\frac{5\text{mm.}}{\text{MPE.}} \leq \frac{\Delta h}{\text{MPE.}} \leq \frac{30\text{mm.}}{\text{MPE.}} \quad (\text{Eq.6-1})$$

เมื่อ

Δh = ความแตกต่างของระดับของเหลวภายในคอเครื่องตวงแบบมาตรา (mm.)

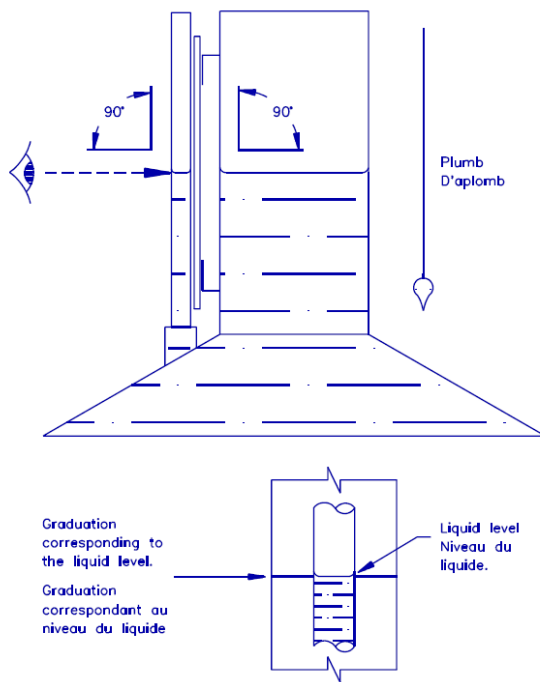
MPE. = อัตราเพื่อเหลือเผื่อขาด (Maximum Permissible Error); ΔV (mm.³)

โดย

$$\frac{5\text{mm.}}{\text{MPE.}} \leq \frac{\Delta h}{\Delta V} \leq \frac{30\text{mm.}}{\text{MPE.}}$$

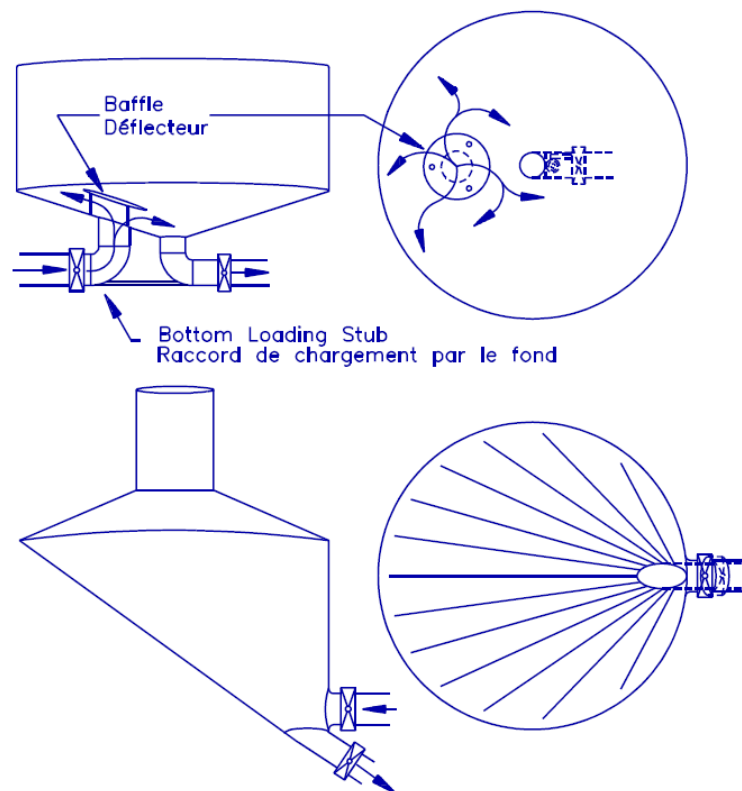
$$\Delta V = \frac{\pi D^2}{4} \times \Delta h$$

3.2.2. คอเครื่องตวงแบบมาตราที่ใช้ในภาคสนามชนิดโลหะต้องรับการออกแบบและจัดทำให้มีแนวตั้งฉากกับตัวเครื่องตวง หากไม่แน่ใจสามารถตรวจสอบด้วยการทิ้งดิ่งบริเวณคอถึงจากนั้นทำการวัดระยะผนังคอถึงเทียบกับแนวตั้งดิ่ง



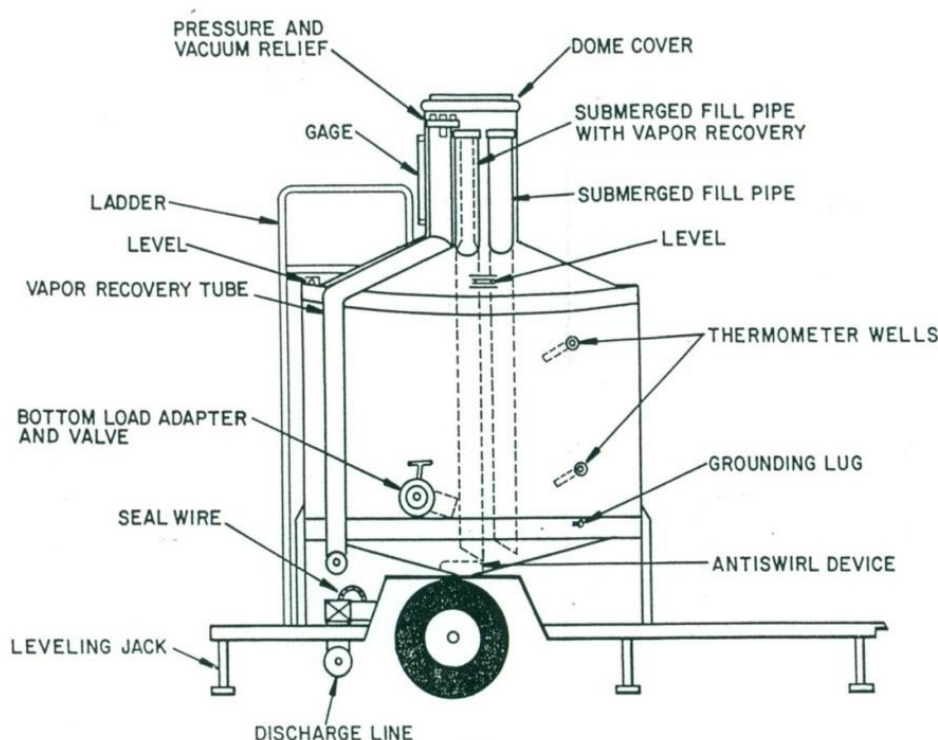
รูปที่ 6-2 ที่วัดระดับของเหลวของเครื่องตวงแบบมาตราخذึงตวงทำด้วยโลหะ

3.2.3. ส่วนที่เป็นคอเครื่องตวงต้องไม่ยื่นล้ำเลยไปจากกรวยบนของเครื่องตวง และในขณะเดียวกันท่อทางออก (Drain Pipe) หรือท่อทางเข้า (Bottom Loading) ต้องไม่ยื่นล้ำกรวยล่างของเครื่องตวง



รูปที่ 6-3 การติดตั้งท่อทางเข้าถังตวงทำด้วยโลหะแบบ Bottom Load

- 3.2.4. การติดตั้งวาล์วระบายของเหลวบริเวณคอเครื่องตวง สามารถทำได้หากใช้เป็นเครื่องตวงแบบมาตราแบบ “จ่าย” เพื่อสอบเทียบเครื่องตวงที่มีค่าความแม่นยำต่ำลงมา และไม่ควรติดตั้งวาล์วระบายของเหลวบริเวณคอเครื่องตวงหากต้องการใช้งานแบบ “รับ” โดยเฉพาะเพื่อทำการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลว
- 3.2.5. ท่อเติมของเหลวที่จุ่มอยู่ในเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ (Submerged Fill Pipe) จะติดตั้งถาวรใกล้กับคอเครื่องตวงและให้มีฝาปิด ท่อจะผ่านทะลุกรวยด้านบนและยาวไปเกือบถึงกรวยด้านล่างโดยห่างจากผิวกรวยด้านล่างประมาณ 10 ถึง 15 ซม. ถ้าจำเป็นอาจติดตั้งมากกว่า 1 ท่อ (ดูรูปที่ 6-4) ส่วนบนของท่อที่ใช้เติมจะต่อเชื่อมเข้ากับส่วนบนของคอเครื่องตวงแบบมาตราเพื่อเป็นทางระบายอากาศออกจากถัง ด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้ท่อเติมของเหลวดังกล่าวเติมของเหลวลงเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ได้ขณะทำการเติมของเหลวผ่านทางคอหรือผ่านทางท่อทางด้านล่างของเครื่องตวง (bottom loading pipe) ได้พร้อมๆกัน
- 3.3. ที่วัดระดับของเหลว (Sight Glass)
- 3.3.1. เครื่องตวงแบบมาตราที่ใช้ในภาคสนามในการออกแบบบางแบบ ต้องมีที่วัดระดับของเหลวภายในเครื่องตวงแบบมาตราโดยทำการติดตั้งไว้ในแนวนานข้างคอเครื่องตวง (ดูรูปที่ 6-1 และ รูปที่ 6-4) ที่วัดระดับของเหลวอาจเป็นชนิด Weir-Type หรือ



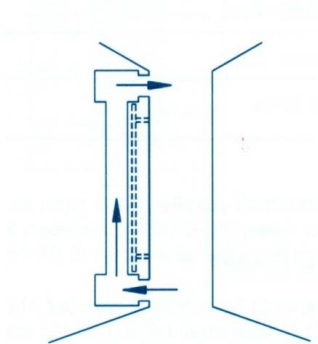
รูปที่ 6-4 เครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่สำหรับเคลื่อนที่ได้

แผ่นปะกับแก้ว (Glass Plates) หรือ หลอดวัด (Glass Tube) เพื่อวัดระดับของเหลวภายในเครื่องตวง โดยหากเป็นหลอดแก้วต้องเป็นหลอดแก้วทำด้วยแก้วชนิด

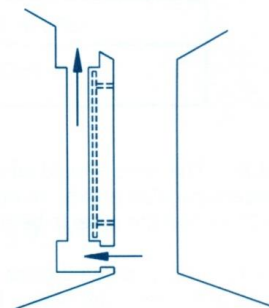
Borosilicate Glass หรือหลอดพลาสติกใสมีความสม่ำเสมอหรือมีรูปร่างไม่บิดเบี้ยว เสียรูปทรงเมื่อสัมผัสระดับของเหลว อีกทั้งไม่ทำปฏิกิริยากับของเหลวภายในเครื่องตวง ถ้าหลอดวัดระดับของเหลวภายในเครื่องตวงเป็นพลาสติกจะต้องแข็งแรงทนและใส ขณะที่ใช้กับเครื่องตวงแบบมาตรา เมื่อหลอดวัดระดับของเหลวหรือแผ่นปะกับ ดังกล่าวถูกใช้งานไปเป็นเวลานานจนแสงไม่สามารถส่องผ่านให้ทำการล้างทำความสะอาดให้สะอาดหรือเปลี่ยนใหม่ หลอดวัดระดับของเหลวที่ติดตั้งโดยทำการเจาะเครื่องตวงบริเวณกรวยบนใกล้กับคอเครื่องตวงกับบริเวณใกล้ส่วนบนคอเครื่องตวง การที่เจาะบริเวณส่วนบนใกล้ส่วนคอเครื่องตวงเพื่อให้ไอระเหยที่เกิดขึ้นขณะทำการบรรจุของเหลวผ่านหลอดไปได้ การถอดและประกอบหลอดวัดระดับต้องสามารถกระทำได้ง่ายหากจำเป็นต้องทำความสะอาดหลอดวัดระดับดังกล่าว และต้องป้องกันการรั่วไหลของของเหลวผ่านหลอดวัดระดับดังกล่าวด้วย (ดูรูปที่ 6-5)

3.3.2. ที่วัดระดับของเหลวของเครื่องตวงแบบมาตราไม่ว่าจะเป็นแผ่นปะกับแก้วหรือหลอดวัด หรือแบบใดก็ตามต้องมีขนาดโตพอที่ไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Capillary (รูปที่ 6-6) หรือ Meniscus เพื่อไม่ให้มีผลผิดเกินอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดที่กำหนดได้เมื่อนำเครื่องตวงแบบมาตราไปใช้งานในภาคสนามซึ่งอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก

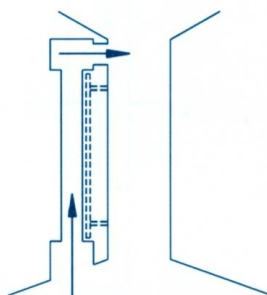
1.



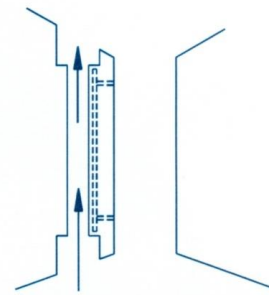
2.



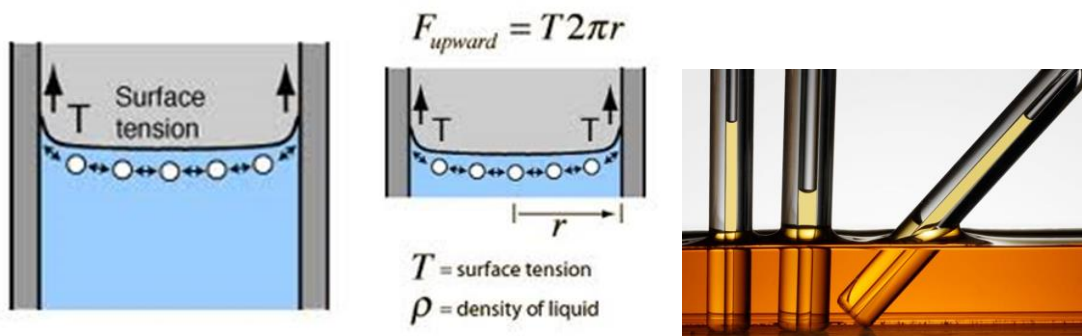
3.



4.



รูปที่ 6-5 ที่วัดระดับของเหลวของเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะ

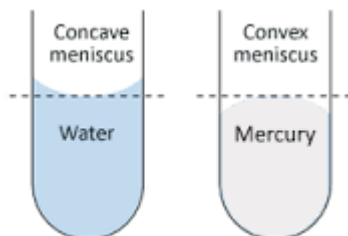


รูปที่ 6-6 ปรัชการณ Capillary

3.3.3. ในกรณีหลอดวัด (Glass tube) เพื่อวัดระดับของเหลวภายในเครื่องตวงเป็นหลอดแก้วชนิด Borosilicate Glass ควรมีขนาด ดังในตารางที่ 6-3

พิักัดกำลั้งเครื่องตวง	หลอดวัด (Glass tube)	
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	ความหนา
น้อยกว่าหรือเท่ากับ 50 ลิตร	13 มม. (3/8 – 1/2 นิ้ว)	ไม่ต่ำกว่า 3.2 มม. (1/8 นิ้ว)
มากกว่า 50 ลิตรขึ้นไป	16 มม. (5/8 นิ้ว)	ไม่ต่ำกว่า 3.2 มม. (1/8 นิ้ว)

ตารางที่ 6-3 ขนาดหลอดวัด (Glass Tube)



รูปที่ 6-7 ปรัชการณ Meniscus

ในกรณีมีการถอดเปลี่ยนหลอดแก้ววัดระดับ ต้องใช้ขนาดเท่าเดิม หากเปลี่ยนแปลงขนาดต้องทำการสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราใหม่

3.4. ช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์ (Thermo-Well) สำหรับเครื่องตวงแบบมาตรารขนาดใหญ่ต้องจัดให้มีวิธีการวัดอุณหภูมิของเหลวภายในเครื่องตวงดังกล่าว

3.4.1. หากใช้ช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์เพื่อทำการวัดอุณหภูมิของเหลวภายในเครื่องตวงจำนวนช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์น้อยที่สุดที่ต้องมีเป็นไปตามตารางที่ 6-4

พิกัดกำลังเครื่องตวง (Nominal Capacity); L (ลิตร)	จำนวน ช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์ น้อยที่สุด
10 ลิตรจนถึง 500 ลิตร	1
มากกว่า 500 ลิตรจนถึง 2,000 ลิตร	2
มากกว่า 2,000 ลิตร	3

ตารางที่ 6-4 จำนวนช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์น้อยที่สุดของเครื่องตวงแบบมาตรา

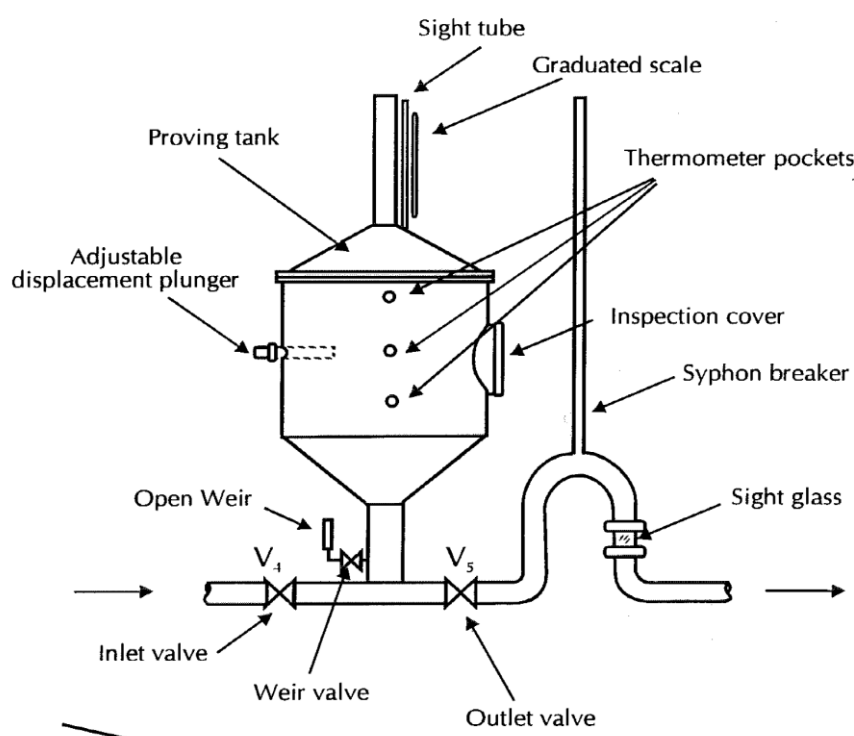
3.4.2. การติดตั้งช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์เข้ากับเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ต้องมีขนาดและระยะยื่นเข้าไปในเครื่องตวงแบบมาตราไม่น้อยกว่า 20 ซม. เพื่อให้เทอร์โมมิเตอร์สามารถสอดเข้าไปได้ แต่อย่างไรก็ตามต้องไม่ยื่นล้ำเลยจุดศูนย์กลางของเครื่องตวงแบบมาตราอย่างเด็ดขาด อีกทั้งวัสดุที่ใช้เป็นที่ช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์ต้องมีคุณสมบัตินำความร้อนได้ดีและยื่นเข้าไปในเครื่องตวงแบบมาตราเอียงลงด้านล่างทำมุมประมาณ 15 องศาจากแนวนอนพร้อมทำเป็นปลายปิด ในขณะเดียวกันสามารถเติมของเหลวเข้าไปภายในช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์ได้เพื่อช่วยให้การถ่ายเทอุณหภูมิจากของเหลวภายในเครื่องตวงแบบมาตรามาถึงเทอร์โมมิเตอร์สามารถทำการวัดอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพ ที่สำคัญการติดตั้งช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์ต้องติดตั้งในลักษณะให้การจุ่มของเทอร์โมมิเตอร์ต้องไม่ได้รับผลกระทบอันเนื่องจากอุณหภูมิแวดล้อม

3.4.3. ในกรณีที่ช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์มีจำนวน 1, 2 หรือ 3 ช่อง เงื่อนไขการติดตั้งมีดังนี้

- สำหรับการติดตั้งช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์ 1 ช่อง ตำแหน่งที่ควรติดตั้ง ได้แก่ ตำแหน่งกึ่งกลางความสูงของเครื่องตวงแบบมาตรา โดยให้ปลายของช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์ต้องยื่นไปถึงตำแหน่งประมาณจุดศูนย์กลางของความสูงภาคตัดทรงกระบอกของเครื่องตวงแบบมาตรา
- ในกรณีที่ทำการติดตั้งช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์จำนวน 2 ช่อง ให้ทำการแบ่งความสูงของเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน จากนั้นติดตั้งที่ระยะ 1 ใน 3 วัดจากส่วนปากคอเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ลงมาและติดตั้งที่ระยะ 1 ใน 3 วัดจากส่วนล่างของเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ขึ้นไป (ดูรูปที่ 6-4)
- ในกรณีที่ทำการติดตั้งช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์จำนวน 3 ช่อง (รูปที่ 6-8) ตำแหน่งที่ควรติดตั้ง ให้ทำการแบ่งความสูงของเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน จากนั้นติดตั้งที่ระยะ 1 ใน 3 ของความสูงวัดจากส่วนปากคอเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ลงมา 1 ตำแหน่ง ตำแหน่งกึ่งกลางความสูงของเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ 1 ตำแหน่ง และที่ระยะ 1 ใน 3 ของความสูงวัดจากส่วนล่างของเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ขึ้นไป

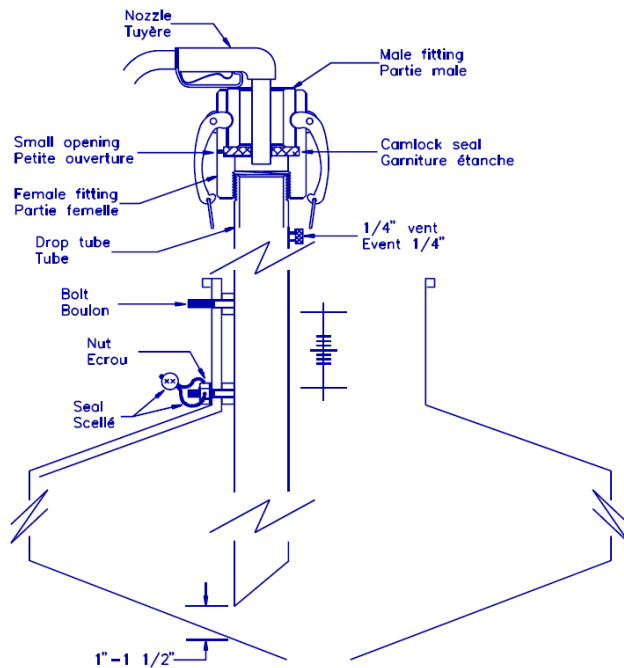
- สำหรับในกรณีที่ทำกรติดตั้งช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์มากกว่า 2 ตัวขึ้นไป ระยะห่างของการติดตั้งของช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์ต้องแบ่งให้มีระยะห่างเท่า ๆ กันในแต่ละระยะเส้นรอบวงของเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ หรือหากต้องการติดตั้งที่เส้นรอบวงเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ที่เส้นเดียวกันก็ให้แบ่งระยะห่างของเส้นรอบวงให้เท่าๆกันด้วย

สำหรับเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ชนิดมีหุ้มฉนวน และ/หรือรอบการทำการสอบเทียบเสร็จอย่างรวดเร็ว การใช้ช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์เพียง 2 ช่องสำหรับเครื่องตวงแบบมาตราที่มีขนาดมากกว่า 2,000 ลิตร ก็เพียงพอ



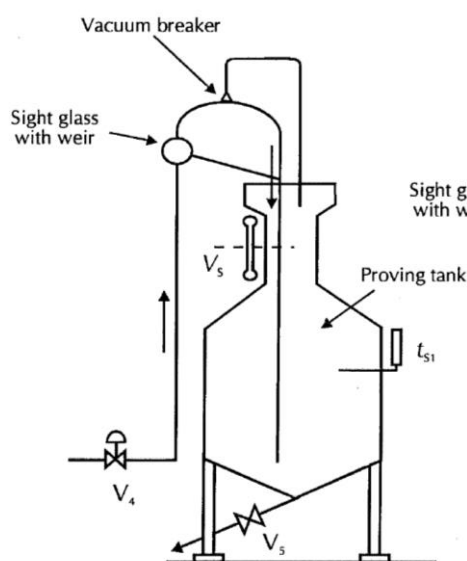
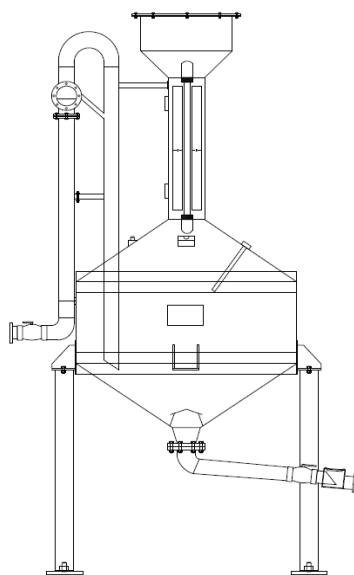
รูปที่ 6-8 ตำแหน่งการติดตั้งช่องเสียบเทอร์โมมิเตอร์จำนวน 3 ช่อง (OIML R120)

3.5. เครื่องตวงแบบมาตราที่ถูกใช้งานในลักษณะ “แบบรับ” ในกรณีที่เติมของเหลวเข้าทางปากเครื่องตวงแบบมาตราด้านบน (top load) ควรจัดให้มีท่อรับของเหลวทางเข้าเครื่องตวงโดยให้มีปลายด้านทางออกจมอยู่บริเวณก้นเครื่องตวง (Submerged Fill Pipe) เพื่อป้องกันหรือลดการเกิดฟองรวมทั้งการระเหยให้น้อยที่สุดในกรณีของเหลวนั้นๆ เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงขณะเติมของเหลวลงเครื่องตวงด้วยการปล่อยของเหลวลงด้านล่างของเครื่องตวง ดังรูปที่ 6-9 โดยปกติปลายท่อทางออกควรอยู่สูงกว่าผนังก้นเครื่องตวงประมาณ 10 – 15 ซม. ซึ่งจะช่วยให้เราอ่านระดับของเหลวได้ทันทีโดยไม่ต้องเสียเวลาในการคอยให้ฟองลดลงอีกทั้งเวลาที่สูญเสียนั้นหมายถึงปริมาตรที่สูญเสียไปกับการระเหยไปของน้ำมันเชื้อเพลิงโดยไม่ถูกทำการวัดอีกด้วย

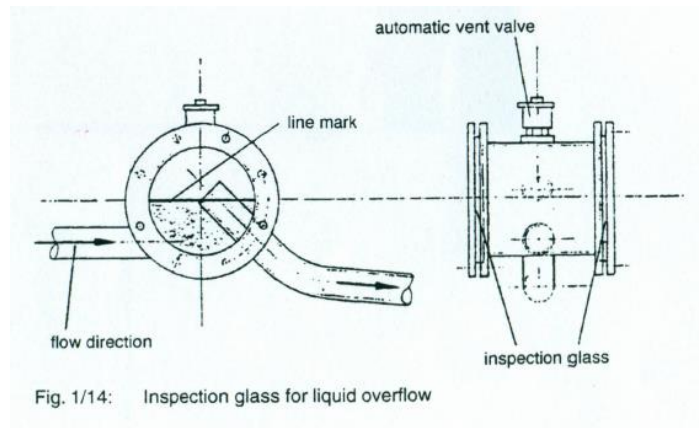


รูปที่ 6-9 ท่อเติมของเหลวที่ปลายท่อจุ่มอยู่บริเวณก้นเครื่องตวงแบบมาตรา (Submerged Fill Pipe)

นอกจากนี้ หากเครื่องตวงแบบมาตราที่มีพิกัดกำลังสูงขึ้นควรจัดให้มีจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดอ้างอิง (Reference Point) หรือ “Sight Glass with Weir” เข้ากับท่อทางเข้าเครื่องตวงแบบมาตรา โดยยังคงให้ปลายท่อทางเข้าจุ่มอยู่บริเวณก้นเครื่องตวง เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงของการเริ่มต้นสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองในแต่ละรอบการทำงาน ดังรูปที่ 6-10 ทั้งนี้ในตำแหน่งสูงสุดของท่อทางเข้าควรทำการติดตั้ง Vacuum Breaker หรือท่อระบายอากาศ (vent) เข้าปากเครื่องตวงเพื่อป้องกันอากาศล๊อค (Vapor lock) บริเวณจุดสูงสุดของท่อทางเข้า ดังกล่าว



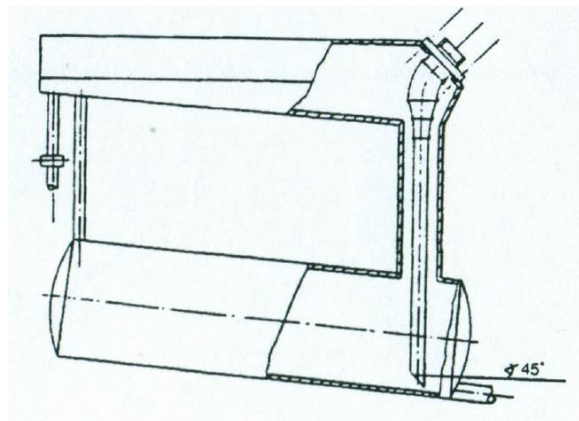
รูปที่ 6-10 เครื่องตวงแบบมาตรา “แบบรับ” ท่อทางเข้า-ท่อทางออกจัดให้มี “จุดเริ่มต้นอ้างอิงและจุดสิ้นสุดอ้างอิง” สำหรับตรวจสอบมาตรวัดปริมาตรของเหลว (OIML R120)



รูปที่ 6-11 “ระดับน้ำเริ่มต้น-สิ้นสุดอ้างอิง” หรือ “Sight Glass with Weir” (OIML R120)

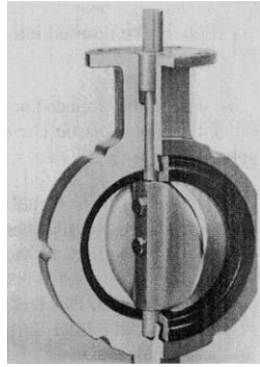
3.6. ท่อระบายของเหลวด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity Discharge Line)

- 3.6.1. ท่อระบายของเหลวด้วยแรงโน้มถ่วงซึ่งต่อออกจากตัวเครื่องตวงขนาดใหญ่จนถึงวาล์ว ปิด-เปิดต้องทำมุมเอียงลงจากแนวระนาบกับพื้นเป็นมุมอย่างน้อย 5 - 7 องศา (รูปที่ 6-22)

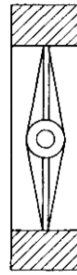


รูปที่ 6-12 ท่อเติมของเหลวที่จุ่มอยู่ในเครื่องตวงแบบมาตราในกรณีถังแนวนอน

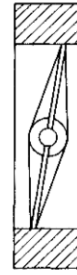
- 3.6.2. ตำแหน่งท่อระบายของเหลวด้วยแรงโน้มถ่วงหรืออาจใช้ปั๊มต่อจากวาล์วปิด-เปิดเพื่อเพิ่มความเร็วในการระบายของเหลวออกจากเครื่องตวงขนาดใหญ่ก็สามารถทำได้ แต่ไม่ว่ากรณีใดก็ต้องแน่ใจว่าสามารถถ่ายของเหลวออกจากเครื่องตวงได้สมบูรณ์
- 3.6.3. ท่อระบายของเหลวประกอบด้วย ท่อ, วาล์วปิด-เปิดแบบผีเสื้อ (Butterfly Valve) หรือ แบบลูกบอล (Full Port Ball Valve) และอาจมีอุปกรณ์แสดงให้เห็นการไหล (Sight-Flow Indicator) โดยติดตั้งถัดจากวาล์วแบบผีเสื้อหรือ Full Port Ball Valve ทั้งนี้เพื่อให้สามารถตรวจสอบการรั่วของวาล์วขณะปฏิบัติงานได้ อุปกรณ์แสดงให้เห็นการไหลเหมาะกับเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่เพื่อให้สามารถตรวจสอบการรั่วของวาล์วได้ง่าย ไม่ควรใช้ Gate Valve เนื่องจากมีส่วนหัวและของเหลวอาจค้างได้ง่ายด้วยปริมาตรค้างไม่คงที่ทุกครั้งในการปิดเปิดวาล์ว
- 3.6.4. ระบบท่อระบายของเหลวออกจากเครื่องตวงต้องมีการค้ำยันที่มั่นคงแข็งแรง



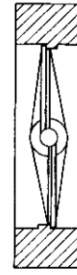
Keystone International, Inc.



swing-thru disc
and metal seating,
not fluid tight



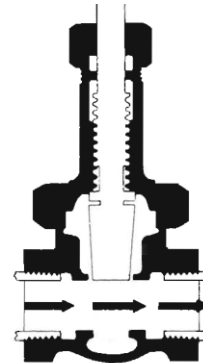
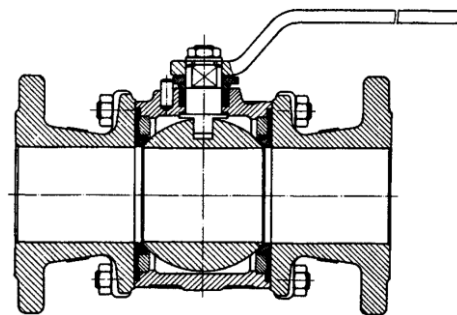
angle-seated disc
and metal seating,
not fluid tight



step-seated disc
and metal seating,
not fluid tight

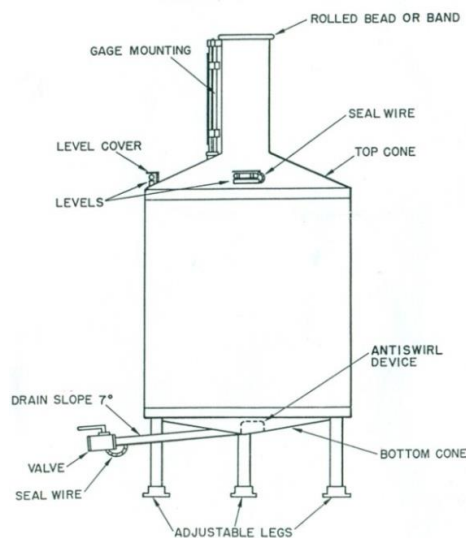
GEC-Elliot Control Valves Limited.

รูปที่ 6-13 Butterfly Valve

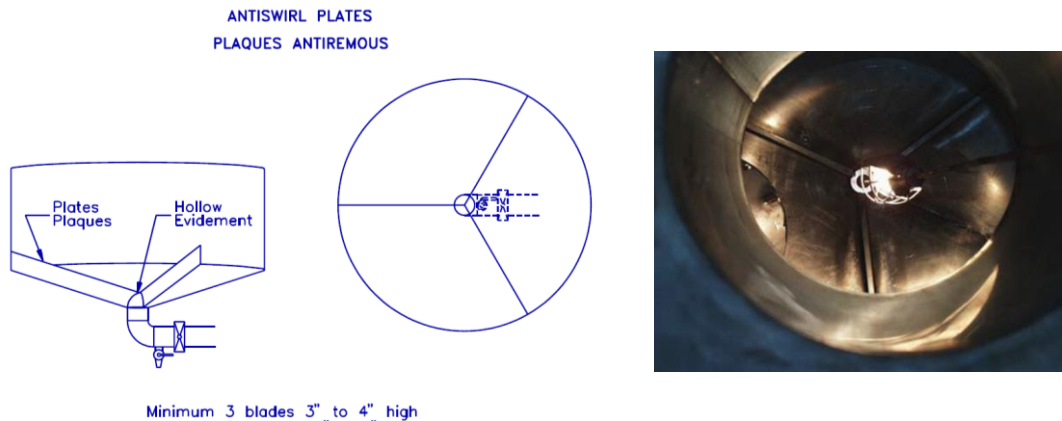


รูปที่ 6-14 Full Port Ball Valve ทำให้ไม่มีของเหลวค้างอยู่ภายใน (ซ้ายมือ) และ Gate Valve (ขวามือ)

3.7. เครื่องตวงแบบมาตราตองได้รับการออกแบบให้ง่ายต่อการถ่ายของเหลวเข้าและถ่ายของเหลวออกจากเครื่องตวงอย่างสมบูรณ์ โดยต้องไม่มีการการปิดกั้นอันเนื่องจากอากาศขวางทางออก หรือต้องไม่มีส่วนของเหลวหลงเหลือค้างอยู่ภายในถัง จึงควรติดตั้งส่วนป้องกันน้ำไหลวน (Anti-Swirl Device) เข้ากับกรวยด้านล่างภายในเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ เพื่อให้มีการไหลวนของของเหลวน้อยที่สุดในระหว่างการถ่ายของเหลวเข้า-ออกจากเครื่องตวงแบบมาตรา (รูปที่ 6-15)

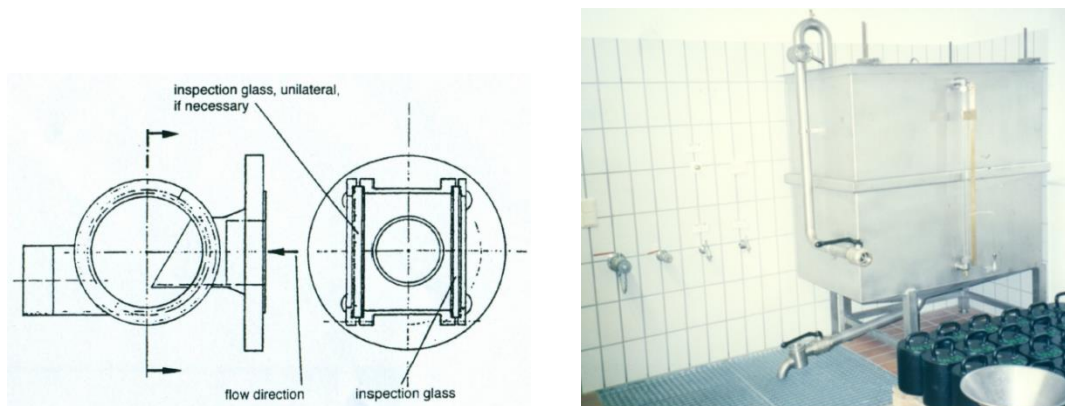


รูปที่ 6-15 เครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะ



รูปที่ 6-16 ส่วนป้องกันน้ำไหลวน (Anti-Swirl Device)

3.8. การจับเวลาถ่ายน้ำ (Drain Time) หลังจากสังเกตว่าของเหลวที่เป็นตัวกลางใช้ในการสอบเทียบ(น้ำ) ไหลออกจากเครื่องตวงแบบมาตราส้นสุดการไหล (Flow Cessation) ได้เปลี่ยนรูปแบบการไหลจากเป็นสายกลายเป็นหยด ให้เริ่มจับเวลาถ่ายน้ำทันที เมื่อครบระยะเวลาถ่ายน้ำตามที่กำหนดให้ปิดวาล์วทันที ทั้งนี้ ระยะเวลาถ่ายน้ำขึ้นอยู่กับพิกัดกำลังของเครื่องตวงแบบมาตราดังตารางที่ 6-5 เนื่องจากพื้นที่สัมผัสภายในเครื่องตวงแบบมาตรามากน้อยตามพิกัดกำลังเครื่องตวงแบบมาตรา



รูปที่ 6-17 ส่วนตรวจสอบ Drain Time (Sight-Flow Indicator) ติดตั้งบนท่อด้านทางออก

พิกัดกำลังเครื่องตวง ลิตร (l)	เวลาถ่ายน้ำ (Drain Time) วินาที (s)
5 - 10 - 20	30
มากกว่า 20 จนถึง 500	60
มากกว่า 500 จนถึง 1,000	90
มากกว่า 1,000 จนถึง 5,000	120

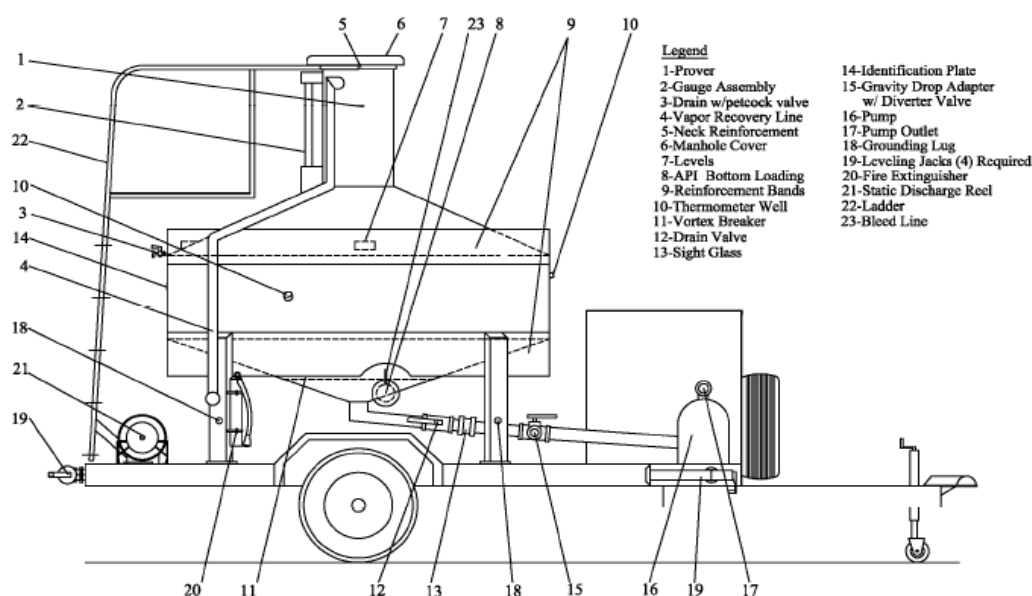
ตารางที่ 6-5 เวลาถ่ายน้ำ (Drain Time) กับพิกัดกำลังเครื่องตวงแบบมาตรา

3.9. ระบบท่อ วาล์ว และส่วนประกอบต่างๆ

3.9.1. ระบบท่อ วาล์ว และส่วนประกอบต่างๆซึ่งประกอบเป็นส่วนหนึ่งของปริมาตรของเครื่องตวงแบบมาตรขนาดใหญ่และสามารถถอดออกได้จากเครื่องตวงแบบมาตราได้ อุปกรณ์ทั้งหมดต้องจัดให้มีวิธีการซีลป้องกันด้วยการร้อยลวดและตะกั่วหรือวิธีการที่

เหมาะสมและเห็นชอบโดยสำนักขังตวงวัด เพื่อให้การถอดหรือการเคลื่อนย้ายส่วนต่างๆ ดังกล่าวไม่สามารถกระทำได้หากไม่ทำลายซีลป้องกัน

- 3.9.2. ปลายท่อของท่อเติมของเหลว (Fill Pipes), ท่อระบายของเหลว (Drain Pipes) และท่อไอระเหยกลับ (Vapor Recovery Pipes) ที่ติดตั้งอยู่กับเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ต้องมีฝาปิดท่อดังกล่าวด้วย
- 3.9.3. สำหรับเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ที่มีปั๊มเพื่อดูดของเหลวออกจากตัวเครื่องตวง ต้องจัดให้มีวาล์วชนิด 3 ทาง (3-way valve) โดยด้านทางออกหนึ่งให้ต่อเข้ากับท่อทางดูดของปั๊ม ส่วนด้านทางออกอีกด้านหนึ่งให้ต่อเข้ากับท่อระบายของเหลวด้วยแรงโน้มถ่วงเพื่อสามารถตรวจสอบระยะเวลาการถ่ายน้ำได้ในส่วนของท่อทางออกด้านนี้



รูปที่ 6-18 เครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ติดตั้งบนรถ Trailer พร้อมปั๊มดูดของเหลวออกจากเครื่องตวง

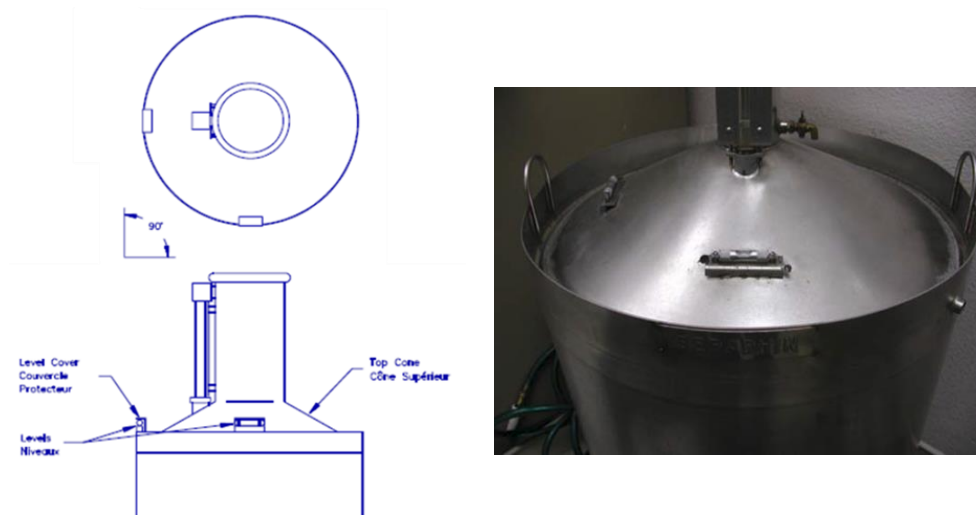
- 3.9.4. ปั๊มของเหลวดังกล่าวต้องเป็นชนิดหอยโข่ง (Centrifugal Pump) แบบ Self-Priming ทั้งนี้ขนาดของปั๊มและระบบท่อต้องมีขนาดขึ้นอยู่กับปริมาตรของเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ อัตราการไหลของปั๊มควรมีค่าประมาณ 15% ของปริมาตรเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ต่อนาที แต่อย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 250 ลิตรต่อนาที เลือกค่าใดค่าหนึ่งที่มีค่าน้อยกว่า

3.10. การปรับระดับเครื่องตวงแบบมาตรา

- 3.10.1. เครื่องตวงขนาดใหญ่ต้องติดตั้งระดับน้ำเพื่อตรวจสอบและปรับระดับการติดตั้งเครื่องตวงก่อนใช้งานจำนวน 2 ตัว โดยระดับน้ำตัวหนึ่งติดตั้งด้านบนของกรวยบนและระดับน้ำอีกตัวหนึ่งติดตั้งอยู่ในแนวระนาบเดียวกันและตั้งฉากกับตัวแรก (รูปที่ 6-19) สำหรับรถที่ติดตั้งเครื่องตวงขนาดใหญ่อาจมีระดับน้ำติดตั้งบนด้านข้างของเครื่องตวงใกล้กับส่วนล่างเพื่อสะดวกในการสังเกตอีกตำแหน่งก็ได้ ระดับน้ำแต่ละตัวจะติดตั้งบน

ชั้นวางที่มั่นคงถาวรและประกอบด้วยฝาปิดคลุมป้องกันความเสียหาย สกรูที่ใช้ปรับระดับของระดับน้ำจัดให้มีการซีลตะกั่วและลวดป้องกัน (รูปที่ 6-4 และรูปที่ 6-23)

- 3.10.2. ส่วนบนสุดของคอเครื่องตวงแบบมาตราที่ใช้ในภาคสนามต้องขัดเรียบให้ได้ระดับ หากจำเป็นต้องปรับระดับสามารถใช้เครื่องวัดระดับวางบนขอบบนสุดของคอเครื่องตวงแบบมาตราและสามารถจับระดับได้เช่นเดียวกับเครื่องวัดระดับหรือระดับน้ำซึ่งติดตั้งอยู่ประจำเครื่องตวงแบบมาตรา
- 3.10.3. การหาระดับเครื่องตวงสามารถทำได้โดยการเทียบระดับกับคอเครื่องตวงก็สามารถทำได้
- 3.10.4. เครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ที่ติดตั้งไม่ถาวร ต้องออกแบบให้มีขาตั้งสำหรับการปรับหาระดับ ควรใช้เกลียวเหลี่ยม (Square thread) เพราะจะปรับระดับได้ง่ายและรวดเร็วกว่า อีกทั้งสามารถรับน้ำหนักทั้งตัวเครื่องตวงแบบมาตราและน้ำหนักของเหลวภายในบรรจุ



รูปที่ 6-19 ติดตั้งระดับน้ำในตำแหน่งระนาบเดียวกันและตั้งฉากซึ่งกันและกัน

- 3.10.5. รถบรรทุกหรือรถพ่วง ซึ่งมีเครื่องตวงขนาดใหญ่ติดตั้งอยู่ต้องประกอบด้วยขาตั้งที่มีจำนวนเพียงพอที่รักษาระดับและสถานะสมดุล เมื่อบรรจุของเหลวเต็ม (ดูรูปที่ 6-4)
- 3.11. ไอระเหยย้อนกลับ (Vapor Recovery)
 - 3.11.1. เครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยท่อไอระเหยย้อนกลับซึ่งติดตั้งอยู่ภายนอกต้องทำการติดตั้งท่อลงจากคอเครื่องตวง และตั้งฉากกับพื้นผิวเครื่องตวง ทั้งนี้อาจติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการเกิดสุญญากาศไว้ด้านปลายท่อไอระเหยย้อนกลับ
 - 3.11.2. เครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ทั้งหมดที่มีไอระเหยย้อนกลับเพื่อป้องกันความดันภายในเครื่องตวงสูงเกินไปต้องจัดให้มีอุปกรณ์ระบายความดัน (Pressure Relief Valve) ออกจากเครื่องตวงแบบมาตราที่ความดัน 20 - 35 kPa (3 - 5 psi) และป้องกันการเกิดสุญญากาศระหว่างการถ่ายของเหลวออกจากเครื่องตวงแบบมาตราโดยต้องจัดให้มีวาล์วป้องกันสุญญากาศ (Vacuum relief valve) ที่ความดัน -20 kPa (-3 psi) บริเวณส่วนสูงสุดของเครื่องตวงแบบมาตรา ดูรูปที่ 6-20

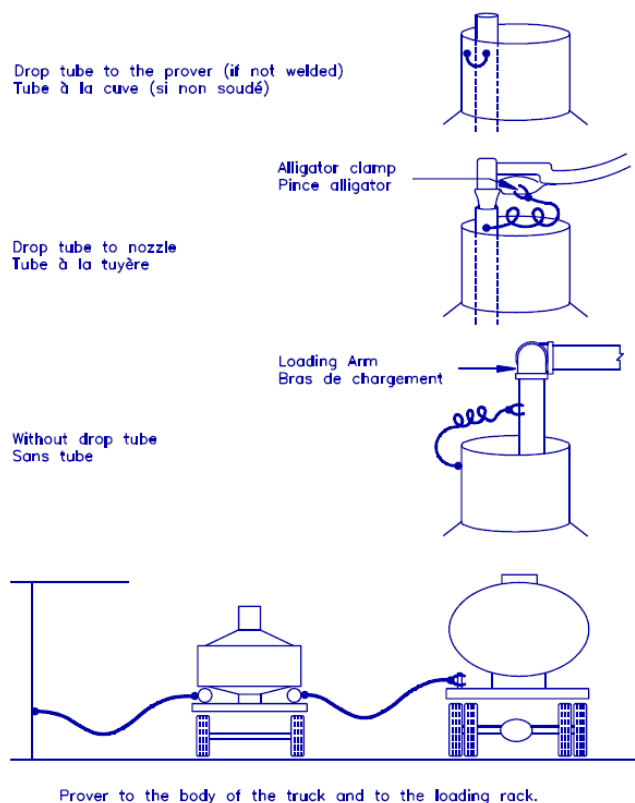
- 3.11.3. โดยปกติท่อไอระเหยย้อนกลับควรมีขนาดประมาณ 100 มิลลิเมตร (4 นิ้ว) หรืออาจใช้ท่อที่มีขนาดเล็กกว่าตามความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรม



รูปที่ 6-20 ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความดัน (Pressure Relief Valve) หรือ Vacuum Breaker (Eichamt Nurnberg, Germany)

3.12. โครงสร้างและอุปกรณ์อื่นๆ

- 3.12.1. หากต้องการติดตั้งบันไดหรือนั่งร้านไม่ว่าอย่างถาวรหรือชั่วคราวเพื่ออ่านค่าขีดขึ้น หมายความว่าประจำเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่หรือวัตถุประสงค์ใดๆ การสร้างโครงสร้างดังกล่าวต้องไม่ทำให้รูปร่างของเครื่องตวงแบบมาตราบิดเบี้ยว หรือมีผลกระทบต่อความเที่ยงตรงของเครื่องตวงแบบมาตรา อีกทั้งต้องแยกอิสระจากตัวเครื่องตวงอย่างเด็ดขาด
- 3.12.2. สำหรับเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ใช้สำหรับของเหลวชนิดติดไฟได้ง่าย เช่น ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมหรือสารตัวทำละลาย (Solvents) ที่ไวไฟหรือจุดติดไฟได้ง่ายต้องติดตั้งระบบสายดินเข้ากับเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่เพื่อป้องกันอุบัติเหตุจากประจุไฟฟ้าสถิตขณะใช้งานเครื่องตวงแบบมาตรา ดูรูปที่ 6-21
- 3.12.3. สำหรับรถที่ติดตั้งเครื่องตวงแบบมาตราขนาดใหญ่หากไม่มีที่คลุมหรือหลังคาที่มิดชิด ต้องทำการติดตั้งฝาปิดประจำเครื่องตวงแบบมาตราหรือวิธีการใดๆ ที่เหมาะสมเพื่อป้องกันสิ่งแปลกปลอมหรือฝุ่นละอองสิ่งสกปรกตกลงไปในเครื่องตวงขนาดใหญ่ขณะที่ทำการขนย้ายหรือจอดอยู่กับที่ตามที่สำนักชั่งตวงวัดเห็นชอบ



รูปที่ 6-21 ติดตั้งสายกราวด์เพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟเนื่องจากไฟฟ้าสถิตเมื่อใช้งานกับของเหลวปิโตรเลียม

3.13. การซีลป้องกันการแก้ไขเครื่องตวงแบบมาตรา ทุกส่วนประกอบของส่วนวัดหรือหลอดวัดระดับของเหลวภายในเครื่องตวงแบบมาตรา, ท่อ และวาล์วทั้งหมดรวมทั้งส่วนประกอบใดๆ ซึ่งมีผลกระทบกับปริมาตรของเครื่องตวงแบบมาตราที่ใช้ในภาคสนามต้องทำมาจากผู้ผลิตหรือผู้จำหน่ายเครื่องตวง และถูกทำการซีลทั้งหมด โดยหากต้องการปรับหรือถอดออกต้องทำได้เฉพาะเมื่อทำลายซีลเท่านั้น

4. ขันหามาตรา (Scales)

4.1. แผ่นแสดงขันหามาตราต้องแข็งแรงและทนทานการกัดกร่อน วัสดุที่ใช้ เช่น เหล็กสแตนเลส (Stainless Steel; 3xx series) ทองเหลือง หรืออลูมิเนียม เป็นต้น

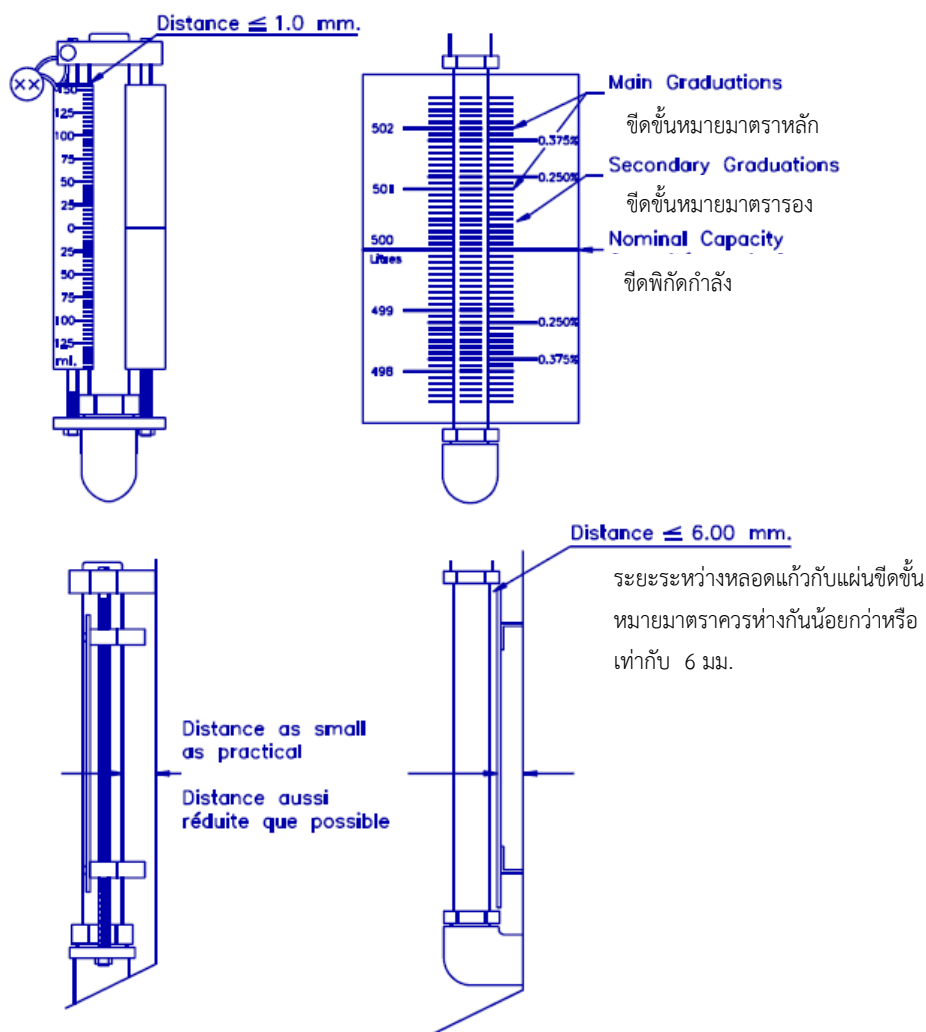
4.2. แผ่นแสดงขันหามาตราสำหรับคอเครื่องตวงแบบมาตราอยู่ด้านบน (Top Neck) ไม่ว่าเครื่องตวงแบบมาตราขนาดเล็ก (Standard Test Measures) หรือขนาดใหญ่ (Proving Tanks) ต้องแสดงพิกัดกำลังของเครื่องตวงแบบมาตราและแสดงปริมาตรอย่างน้อยประมาณ $\pm 0.5\%$ - $\pm 1.5\%$ ของพิกัดกำลังของเครื่องตวงแบบมาตรารบนแผ่นแสดง และสำหรับคอเครื่องตวงแบบมาตราอยู่ด้านล่าง (Bottom Neck) ของเครื่องตวงขนาดใหญ่ (Proving tanks) ต้องแสดงพิกัดกำลังของเครื่องตวงแบบมาตราและแสดงปริมาตรอย่างน้อยประมาณ $\pm 0.5\%$ ของพิกัดกำลังของเครื่องตวงแบบมาตรารบนแผ่นแสดง โดยในทุกกรณีต้องให้ขีดขันหามาตราแสดงพิกัดกำลังอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางหรือใกล้เคียงตำแหน่งกึ่งกลางมากที่สุดของการแสดงปริมาตร

4.3. ขันหามาตราของเครื่องตวงแบบมาตราทั้งหมด ควรแสดงเป็นหน่วย มิลลิลิตร หรือ มล. หรือ mL (มาตราเมตริกเท่านั้น)

4.4. หากการออกแบบเพื่อให้สามารถทำการปรับและเลื่อนแผ่นแสดงชั้นหมายเลขมาตรา (Scale Plates) ได้ หลังจากที่ได้ทำการซีลแล้วแผ่นแสดงชั้นหมายเลขมาตราสามารถเคลื่อนที่ในทิศทางเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ สูงสุดไม่เกิน 25 % ของขีดชั้นหมายเลขมาตราเล็กที่สุดของแผ่นแสดงชั้นหมายเลขมาตรา

เครื่องตวงพิกัดกำลังต่ำกว่า 50 ลิตร

เครื่องตวงพิกัดกำลังสูงกว่า 50 ลิตร



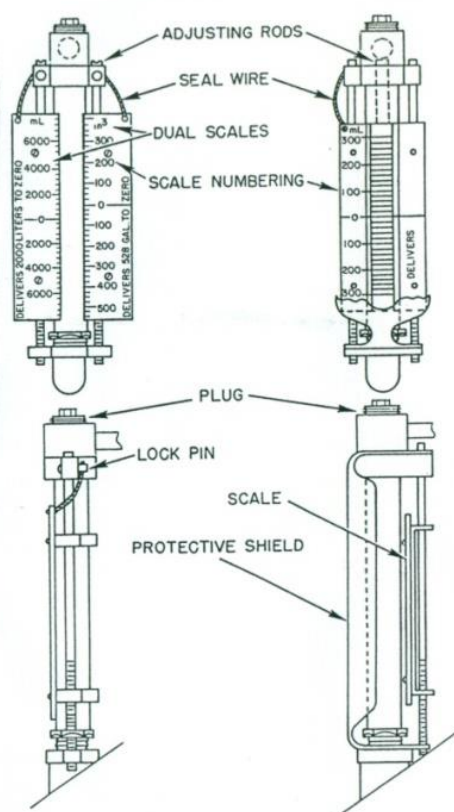
รูปที่ 6-22 แผ่นแสดงชั้นหมายเลขมาตราของเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะ

4.5. ในกรณีแผ่นแสดงชั้นหมายเลขมาตราต้องติดตั้งด้านข้างใกล้กับหรือข้างหน้าส่วนวัดระดับของเหลวภายในเครื่องตวงแบบมาตราเล็กน้อย โดยไม่ควรห่างเกิน 1 มิลลิเมตร (รูปที่ 6-22 ซ้ายมือ) และในกรณีที่ติดตั้งแผ่นแสดงชั้นหมายเลขมาตราด้านหลังของส่วนวัดระดับของเหลวภายในเครื่องตวงแบบมาตรา แผ่นแสดงชั้นหมายเลขมาตราต้องอยู่ห่างจากส่วนวัดระดับของเหลว (หลอดแก้ว) ได้ไม่เกิน 6 มิลลิเมตร (รูปที่ 6-22 ขวามือ)

4.6. ที่ยึดแผ่นแสดงชั้นหมายเลขมาตรา (Scale Brackets) ต้องมีจำนวนเพียงพออย่างน้อย 2 ชุด ยึดติดกับตัวปรับรางเคลื่อนที่ หรือก้านที่ปรับได้ (Adjusting or Guide Rods) แผ่นแสดงชั้นหมายเลขมาตราต้องทำให้ติดกับที่ยึดอย่างแน่นหนาและจัดให้มีการซีลป้องกันการปรับเคลื่อนย้าย (ดูรูปที่ 6-23)

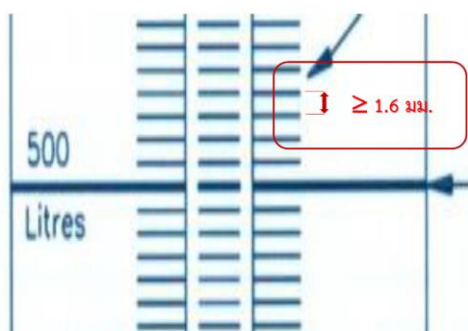
4.7. ตัวปรับรางเคลื่อนที่ หรือก้านที่ปรับได้ต้องจัดให้มีการซีลป้องกันการปรับเคลื่อนย้าย (ดูรูปที่ 6-25) การถอดหรือการเคลื่อนที่ของกลไกปรับแต่งหรือทำให้ แผ่นแสดงชั้นหมายเลข (Scale Plates) เคลื่อนที่ จะไม่สามารถทำได้ถ้าไม่ทำลายลวดซีล

4.8. เมื่อติดตั้งแผ่นแสดงชั้นหมายเลขด้านหลังส่วนวัดระดับของเหลว ต้องจัดทำส่วนป้องกันส่วน วัดระดับของเหลว (Protective Shield) ดังรูปที่ 6-23 และส่วนป้องกันดังกล่าวต้องไม่เป็นอุปสรรคกับการถอด เปลี่ยนหลอดวัดระดับของเหลว



รูปที่ 6-23 ส่วนประกอบที่สำคัญของแผ่นแสดงชั้นหมายเลข

4.9. ระยะน้อยที่สุดระหว่างขีดชั้นหมายเลขที่อยู่ติดกันต้องมีระยะมากกว่าความหนาของขีดชั้น หมายเลข หรือเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นขีดความสามารถของสายตามนุษย์โดยเฉลี่ยที่สามารถ แยกแยะระยะได้ และขีดชั้นหมายเลขต้องมีระยะห่างที่สม่ำเสมอ



รูปที่ 6-24 ส่วนประกอบที่สำคัญของแผ่นแสดงชั้นหมายเลข

พิกัดกำลัง (Nominal Capacity)	ปริมาตรคอเครื่องตวง น้อยที่สุด	ค่าขีดขึ้นหมายมาตราหลัก หรือละเอียดกว่า	ค่าขีดขึ้นหมายมาตรารอง หรือละเอียดกว่า
5 ลิตร	75 มิลลิลิตร	25 มิลลิลิตร	5 มิลลิลิตร
10 ลิตร	150 มิลลิลิตร	25 มิลลิลิตร	5 มิลลิลิตร
20 ลิตร	300 มิลลิลิตร	50 มิลลิลิตร	10 มิลลิลิตร
50 ลิตร	750 มิลลิลิตร	100 มิลลิลิตร	25 มิลลิลิตร
100 ลิตร	1.5 ลิตร	100 มิลลิลิตร	25 มิลลิลิตร
200 ลิตร	3.0 ลิตร	200 มิลลิลิตร	50 มิลลิลิตร
500 ลิตร	7.5 ลิตร	500 มิลลิลิตร	100 มิลลิลิตร
1000 ลิตร	15 ลิตร	1000 มิลลิลิตร	250 มิลลิลิตร
2000 ลิตร	30 ลิตร	1000 มิลลิลิตร	500 มิลลิลิตร
3000 ลิตร	45 ลิตร	2000 มิลลิลิตร	500 มิลลิลิตร
5000 ลิตร	50 ลิตร	2000 มิลลิลิตร	500 มิลลิลิตร

ตารางที่ 6-6 ขีดขึ้นหมายมาตราของคอเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะ (โดยประมาณ)

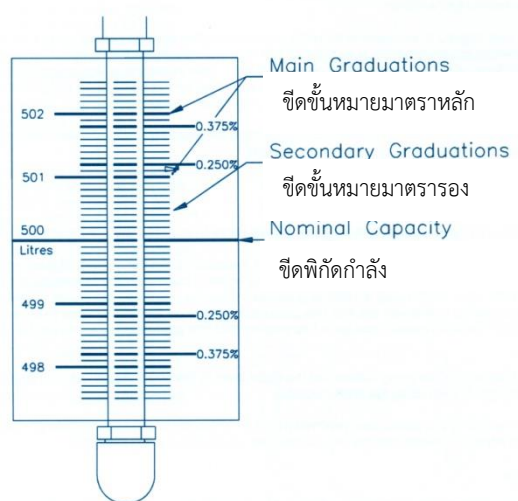
5. การแสดงเครื่องหมายบนแผ่นแสดงขึ้นหมายมาตรา (Scale Marking)

5.1. ขีดขึ้นหมายมาตรา เลขจำนวนปริมาตร และอักษรอื่นๆบนแผ่นแสดงขึ้นหมายมาตราต้องถาวร และมีสีติดกับแผ่นแสดงขึ้นหมายมาตราอย่างชัดเจน

5.2. ตัวเลขจำนวนปริมาตร และอักษรอื่นๆ บนแผ่นแสดงขึ้นหมายมาตราต้องมีความสูงไม่น้อยกว่า 2 มม.

5.3. ขีดขึ้นหมายมาตราหลักต้องสามารถเห็นได้ชัด และยาวกว่าเส้นขีดขึ้นหมายมาตรารองลงมา รวมทั้งต้องแสดงตัวเลขแสดงปริมาตรกำกับ (ดูรูปที่ 6-25)

5.4. ความยาวของขีดขึ้นหมายมาตราหลักบนแผ่นแสดงขึ้นหมายมาตราที่ติดตั้งอยู่ด้านหน้าของส่วนหรือหลอดวัดระดับของเหลวต้องยาวไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร และขีดขึ้นหมายมาตรารองลงมาต้องยาวไม่น้อยกว่า 3 มิลลิเมตร โดยเส้นขีดขึ้นหมายมาตราทั้งหมดต้องยาวจนถึงขอบของแผ่นแสดงขึ้นหมายมาตราในด้านที่ใกล้กับหลอดวัดระดับของเหลว



รูปที่ 6-25 ขีดขึ้นหมายมาตราหลักของแผ่นแสดงขึ้นหมายมาตรา

5.5. เส้นขีดชั้นหมายมาตรามีความหนาสม่ำเสมอ โดยต้องหนาไม่เกินกว่า 0.6 มิลลิเมตร และหนาไม่น้อยกว่า 0.4 มิลลิเมตร

5.6. สำหรับแผ่นแสดงชั้นหมายมาตราที่ติดตั้งอยู่ด้านหลังหลอดวัดระดับของเหลว ต้องมีขีดชั้นหมายมาตราลึกยาวไม่น้อยกว่า 50 มิลลิเมตร และขีดชั้นหมายมาตรารองลงมายาวไม่น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร (ดูรูปที่ 6-25)

5.7. ชั้นหมายมาตราแสดงพิกัดกำลังของเครื่องตวงแบบมาตรา ซึ่งแสดงเป็นขีดศูนย์หรือตัวเลขแสดงพิกัดกำลังบนแผ่นแสดงชั้นหมายมาตราต้องมีความยาวตลอดและชนขอบทั้งสองข้างของแผ่นแสดงชั้นหมายมาตราอย่างเห็นได้ชัดเจน พร้อมหน่วยปริมาตร

5.8. แผ่นแสดงชั้นหมายมาตรา ต้องแสดงเครื่องหมายเพื่อบ่งบอกวิธีการใช้เครื่องตวงแบบมาตราด้วยวัตถุประสงค์ใด ในกรณีใช้สำหรับการบรรจุให้แสดงคำว่า “บรรจุ” หรือ “Contains” หรือ “IN” ในกรณีใช้สำหรับการจ่ายให้แสดงคำว่า “จ่าย” หรือ “Delivers” หรือ “EX”

6. แผ่นป้ายข้อมูลประจำเครื่องตวง (Name Plate)

เครื่องตวงแบบมาตราแต่ละเครื่องควรมีข้อมูลดังต่อไปนี้ และแสดงอยู่บนเครื่องตวงหรือเขียนลงบนแผ่นแสดงชั้นหมายมาตราหรือแผ่นโลหะอย่างถาวร และติดตั้งอยู่กับเครื่องตวงซึ่งง่ายต่อการอ่านได้ง่ายและชัดเจน

- 6.1. ชื่อและที่อยู่ของบริษัทผู้ผลิต
- 6.2. เลขรุ่น (Model Number)
- 6.3. หมายเลขลำดับประจำเครื่อง (Serial Number)
- 6.4. วัสดุที่ใช้ทำ (Material)
- 6.5. ความหนาของวัสดุ
- 6.6. สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามบาศก์ของวัสดุต่อองศาเซลเซียส (Coefficient of Expansion)
- 6.7. ปริมาตรที่แสดงพิกัดกำลัง (Nominal Capacity) ที่เส้นขีดศูนย์บนแผ่นแสดงชั้นหมายมาตราบนคอเครื่องตวง
- 6.8. อุณหภูมิอ้างอิงประจำเครื่องตวง (Reference Temperature)
- 6.9. ระยะเวลาที่ระบายน้ำหลังจากการไหลของของเหลวสิ้นสุดลง (Drainage Time) ในกรณีเครื่องตวงเป็นแบบจ่าย
- 6.10. ใช้เครื่องตวงด้วยวัตถุประสงค์ใด “บรรจุ” หรือ “จ่าย”
- 6.11. ข้อจำกัดการใช้งาน (ถ้ามี)

7. ผลงานการสร้าง (Workmanship, Finish, and Appearance)

- 7.1. รอยเชื่อมหรือบัดกรีด้านในของเครื่องตวงแบบมาตราทั้งหมดต้องเจียรแต่งแนวเชื่อมหรือแนวบัดกรีให้เรียบร้อยเพื่อป้องกันการตกค้างหรือเป็นกับดักจับอากาศหรือของเหลว อีกทั้งต้องไม่ทำให้ของเหลวรั่วไหล
- 7.2. ต้องประกันว่าไม่มีหลุม รอยเว้า หรือรอยแตกแยก ซึ่งอาจดักจับอากาศหรือของเหลว หรือทำให้การบรรจุ หรือการระบายของเหลวที่แท้จริงของเครื่องตวงผิดไป
- 7.3. พื้นผิวภายนอกของเครื่องตวงแบบมาตราที่ใช้ในภาคสนาม ทำด้วยเหล็กคาร์บอนต่ำต้องทาสีให้ดูเรียบร้อยและไม่ใช้สีที่มีโทษของการดูความร้อน

7.4. พื้นผิวภายในของเครื่องตวงแบบมาตราที่ใช้ในภาคสนามหากทำด้วยเหล็กคาร์บอนต่ำต้องทำการเคลือบผิวภายในเครื่องตวงแบบมาตราชนิดนี้เพื่อให้สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนและป้องกันของเหลวซึมผ่านเข้าถึงในเนื้อเหล็กได้

7.5. จัดให้มีอุปกรณ์สำหรับคลุมหรือปิดปากเครื่องตวง เพื่อป้องกันสิ่งแปลกปลอมตกหล่นเข้าภายในเครื่องตวงระหว่างขนส่ง หรือจัดเก็บรักษา

7.6. วาล์วทั้งหมดต้องทำงานอย่างอิสระและแน่นอน และผ่านการทดสอบการรั่วก่อนนำมาใช้งาน ภายใต้ความดันที่ใช้งานปกติ

7.7. ขาตั้งระดับต้องมั่นคงแข็งแรงและรักษาสภาวะสมดุลภายใต้น้ำหนักบรรทุก

7.8. เครื่องตวงแบบมาตราที่ใช้ในภาคสนาม รวมทั้งอุปกรณ์ทั้งหมดประจำเครื่องตวงต้องปราศจากซีโลหะลวดเชื่อม ซีโลหะ ฟูน สนิม หรือวัสดุแปลกปลอมซึ่งเป็นอันตรายต่อการใช้งานและความเที่ยงตรงของเครื่องตวงแบบมาตรา

7.9. ตรวจสอบข้อต่อ ฝาอุด หน้าแปลนและฝาปิดครอบ หรือรอยต่อใดๆ ให้เรียบร้อยเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีการรั่วซึมของเหลวขณะใช้งาน

ค. อัตราเพื่อเหลือเพื่อขาด (Maximum Permissible Error)

อัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดของเครื่องตวงแบบมาตราทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $\pm 1/2000$ ของพิสัยกำลังของเครื่องตวงแบบมาตราหรือดีกว่า

สำหรับขีดชั้นหมายมาตราซึ่งอยู่เหนือและใต้เส้นพิสัยกำลังของเครื่องตวงแบบมาตรา ค่าปริมาตรที่ขีดชั้นหมายมาตราดังกล่าวก็ให้มีอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดมีค่าเท่ากับ $\pm 1/2000$ ของพิสัยกำลังของเครื่องตวงแบบมาตราเช่นกันหรือดีกว่า

ง. ค่าความสามารถในการทำซ้ำได้ (Repeatability)

เครื่องตวงแบบมาตราที่ใช้ในภาคสนามชนิดโลหะแบบคอมมีขีดชั้นหมายมาตราต้องมีค่าความสามารถในการทำซ้ำได้ ไม่เกิน 0.02% ของพิสัยกำลังเครื่องตวง

จ. ค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty)

การสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตรากำหนดให้ค่าความไม่แน่นอน (Expanded Uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ของการสอบเทียบสำหรับการตรวจสอบให้คำรับรองชั้นแรกและชั้นหลังมีค่าเท่ากับ 1 ใน 3 ของอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาด โดยการประมาณค่าความไม่แน่นอนตาม OIML (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) ให้ค่า $k = 2$

ฉ. รอบอายุการสอบเทียบ

เครื่องตวงแบบมาตรากำหนดให้มีอายุคำรับรอง 1-2 ปี เมื่อครบอายุคำรับรองแล้วต้องนำกลับมารับการสอบเทียบใหม่ แต่หากมีการซ่อมแซมเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ที่มีผลต่อความเที่ยงของเครื่องตวงแบบมาตรา หรือเกิดความไม่มั่นใจให้ทำการสอบเทียบใหม่ทันที

เครื่องตวงแบบมาตรา	รอบอายุการสอบเทียบ
แบบเคลื่อนที่ & แบบมาตราของผู้ประกอบธุรกิจ	2 ปี
แบบติดตั้งถาวรอยู่บนชุดเคลื่อนที่ Mobile	3 ปี
แบบติดตั้งถาวร	5 ปี
ชั้นความเที่ยงสูงใช้สอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราชั้นความเที่ยงต่ำกว่า	5 ปี

ตารางที่ 6-7 รอบการสอบเทียบ (โดยประมาณ)

เมื่อเราทำความรู้จักองค์ประกอบ และข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องตวงชนิดถังตวงทำด้วยโลหะดั่งข้างต้นเป็นที่เรียบร้อยแล้ว เราจะมาพูดถึงการสอบเทียบ ซึ่งมีวิธีการสอบเทียบ การเลือกขนาดถังตวงแบบมาตรา ข้อจำกัดของของเหลวตัวกลางในการสอบเทียบ การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับเครื่องตวงชนิดถังตวงทำด้วยโลหะ เพื่อให้ได้มาซึ่งการนำถังตวงไปใช้งานต่อไป

การสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะโดยวิธีการตวงเปรียบเทียบ (Volumetric Method)

การสอบเทียบด้วยวิธีการตวงเปรียบเทียบ มีอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ ดังนั้นการเตรียมการและติดตั้งเครื่องตวงชนิดถังตวงแบบโลหะกับเครื่องตวงแบบมาตราจึงขึ้นอยู่กับรูปแบบวิธีการตวงเปรียบเทียบ

1. “The Filling Method” หรือ “Water Pour Method” การจัดวางและจัดเรียงเครื่องตวงในลักษณะที่เครื่องตวงแบบมาตราอยู่ในระดับสูงกว่าเครื่องตวงชนิดถังตวงแบบโลหะที่ต้องการสอบเทียบ (รูปที่ 6-26) เพื่อให้ของเหลวตัวกลางสอบเทียบในเครื่องตวงแบบมาตราไหลลงมายังเครื่องตวงที่ต้องการสอบเทียบ เกิดขึ้นด้วยจากแรงโน้มถ่วงเพื่อลดปัจจัยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเหลวตัวกลางสอบเทียบเกิดขึ้น โดยปกติเครื่องตวงแบบมาตราจะมีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับเครื่องตวงชนิดถังตวงแบบโลหะที่ต้องการสอบเทียบ การสอบเทียบดำเนินการโดยเติมน้ำลงในเครื่องตวงแบบมาตราจนถึงพิคก้าลิ่งจากนั้นปล่อยน้ำจากเครื่องตวงแบบมาตราเข้าสู่เครื่องตวงชนิดถังตวงแบบโลหะที่ต้องการสอบเทียบ จำนวนรอบในการปล่อยน้ำลงมาจากเครื่องตวงแบบมาตราในทางปฏิบัติแล้วประมาณ 4 - 5 รอบหรือมากกว่า โดยมีปัจจัยที่ควรคำนึงถึงคือถังตวงโลหะที่ต้องการสอบเทียบนำไปใช้กับการวัดกับเครื่องชั่งตวงวัดประเภทใด มีความต้องการความเที่ยงในการวัดระดับใด มูลค่าต่อหน่วยมากน้อยเพียงใด ผลกระทบของผลผลิตประเมินแล้วมีค่าสูงทั้งในเชิงเศรษฐกิจและสังคมมากน้อยเพียงใด และอื่นๆ ขึ้นอยู่กับหน่วยงาน

2. “The Withdrawing Method” หรือ “Water Draw Method” การจัดวางและจัดเรียงเครื่องตวงในลักษณะที่เครื่องตวงชนิดถังตวงแบบโลหะที่ต้องการสอบเทียบอยู่ในระดับสูงกว่าเครื่องตวงแบบมาตรา เพื่อให้การไหลเกิดขึ้นเนื่องจากแรงโน้มถ่วง การสอบเทียบดำเนินการโดยเติมน้ำลงในเครื่องตวงชนิดถังตวงแบบโลหะที่ต้องการสอบเทียบจนเต็มพิคก้าลิ่งจากนั้นระบายน้ำออกจากถังเข้าสู่เครื่องตวงแบบมาตรา หากเครื่องตวงแบบมาตรามีพิคก้าลิ่งต่ำกว่าต้องระบายน้ำเพิ่มจำนวนครั้งมากขึ้นเช่นกัน จำนวนครั้งในการปล่อยน้ำลงมาจากเครื่องตวงชนิดถังตวงแบบโลหะที่ต้องการสอบเทียบไม่ควรมีจำนวนครั้งมากกว่า 5 ครั้ง หากต้องมีจำนวนครั้งสูงกว่า 5 ครั้งต้องอยู่ในดุลพินิจของผู้ที่รับผิดชอบ โดยมีปัจจัยที่ควรคำนึงถึงเช่นเดียวกับวิธีการในข้อที่กล่าวมาแล้วข้างต้น มาถึงตรงนี้ก็ถือว่าสิ้นสุดข้อกำหนดมาตรฐานเครื่องตวงแบบมาตราที่ใช้ในภาคสนามชนิดโลหะแบบคอมีขีดขึ้นหมายมาตราแสดงปริมาตร (Graduated Neck Type Volumetric Field Standards) ซึ่งในส่วนถัดไปเราจะกล่าวถึงสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะต่อไป

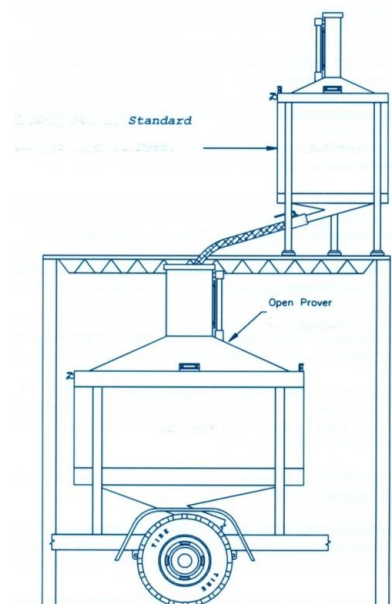
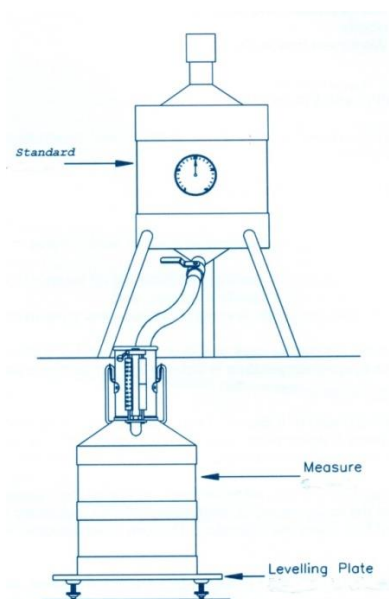
การเลือกของเหลวเป็นสารตัวกลางสำหรับการสอบเทียบ

การเลือกของเหลวที่จะใช้ในการสอบเทียบเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสนใจมากเป็นพิเศษเช่นกัน เพราะค่าความแม่นยำ (accuracy) และค่าความสามารถทำซ้ำได้ (repeatability) จะได้รับผลกระทบและขึ้นอยู่กับชนิดของเหลวใช้ในการสอบเทียบ เราพบว่า

1. ผลิตภัณฑ์น้ำมัน (white oil products) อาจใช้กับการสอบเทียบถังตวงที่ต้องการสอบเทียบด้วยถังตวงแบบมาตราได้ แต่ผลิตภัณฑ์น้ำมันประเภทนี้มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวความร้อนสูง จึงจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิระหว่างทำการสอบเทียบ อีกทั้งเป็นของเหลวที่ต้องระมัดระวังในเรื่องความปลอดภัยในการเก็บรักษา

2. น้ำบริสุทธิ์ น้ำสะอาด หรือน้ำประปา นับว่าเป็นของเหลวที่มีข้อดีหลายอย่างในการใช้เป็นสารตัวกลางในการสอบเทียบ ซึ่งกล่าวไว้ในบทก่อนหน้านี้ พอสรุปข้อดีหลักๆ ได้แก่

- มีค่าความจุความร้อนมาก (high heat capacity) หากอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงไป หากไม่มากนัก น้ำยังคงรักษาค่าอุณหภูมิของน้ำได้ค่อนข้างคงที่
- มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ (low coefficient of expansion) ส่งผลให้ปริมาตรของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงค่อนข้างน้อยหากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
- การลดปริมาตรเนื่องจากความดัน (low compressibility) มีค่าน้อย
- เป็นของเหลวที่ราคาถูกหาง่าย อีกทั้งง่ายต่อการเก็บรักษาอย่างปลอดภัย
- สามารถให้ตัวไปอยู่ในทุกซอกมุมของเครื่องตวงแบบมาตรฐาน



รูปที่ 6-26 การจัดวางและจัดเรียงเครื่องตวงแบบมาตรฐานติดตั้งด้วยโลหะสำหรับการสอบเทียบแบบ “The Filling Method” หรือ “Water Pour Method”

ขั้นตอนการสอบเทียบด้วยวิธีการตวงเปรียบเทียบ (Volumetric Method)

เนื่องจากขั้นตอนการสอบเทียบมีรายละเอียดมากไม่สามารถบรรจุไว้ในหนังสือเล่มนี้ได้ ซึ่งครอบคลุมถึงสถานะแวดล้อม ชีตความสามารถของแบบมาตราและเครื่องมืออุปกรณ์ การคำนวณผล เกณฑ์การตัดสินใจ การรายงานผลการสอบเทียบ เป็นต้น ดังนั้นจึงขอให้ไปอ่านขั้นตอนปฏิบัติการสอบเทียบโดยสำนักงานกลางชั่งตวงวัด SOP-VOL-106 ขั้นตอนการปฏิบัติงานสอบเทียบเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะแบบคอมมีซีตขึ้นหมายมาตรา (5 - 100 ล.) ด้วยวิธีการตวงเปรียบเทียบ แต่อย่างไรก็ตามสามารถนำวิธีการสอบเทียบดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานกับเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะแบบคอมมีซีตขึ้นหมายมาตราได้จนถึงพิกัดกำลัง 5,000 ลิตร

การคำนวณผลการสอบเทียบเครื่องตวงชนิดถังตวงทำด้วยโลหะ

เมื่อทำการสอบเทียบด้วยวิธีการตวงเปรียบเทียบ เราพิจารณาปริมาตรของ “เครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะ” เทียบกับปริมาตรของ “ถังตวงที่ต้องการสอบเทียบ” ภายหลังที่ทำการปรับค่าปริมาตรที่วัดได้ทั้งจากแบบมาตราและถังที่ต้องการสอบเทียบไปยังสถานะอ้างอิง (อุณหภูมิอ้างอิงและความดันอ้างอิง) โดยทั่วไปคือที่ 30 °C และความดันบรรยากาศ เราจึงพิจารณา

1. พิจารณาตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{tw} , C_{ts} , C_{ps} , C_u , และ C_{pl}

1.1. ในเทอมอุณหภูมิของเหลวตัวกลางสอบเทียบเป็นน้ำสะอาดหรือน้ำประปา เมื่ออุณหภูมิที่ถังตวงแบบมาตราไม่เท่ากับอุณหภูมิถังตวงที่ต้องการสอบเทียบ $T_M \neq T_P$

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{ts}

- C_{tsM} พิจารณา
- C_{tsP} พิจารณา

ค่า C_{tsM} , C_{tsP} ไม่ต้องนำมาพิจารณาในทางทฤษฎี (แต่ในทางปฏิบัติ คิดเถอะเพราะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์แล้วไม่เหนียวมากหรอกครับ) เมื่อพบว่า

- 1) วัสดุที่ใช้ทำถังตวงแบบมาตรา (Measure) กับวัสดุของถังตวงที่ต้องการสอบเทียบ (Prover Tank) เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน
- 2) อุณหภูมิเฉลี่ยของถังตวงแบบมาตราเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยของถังตวงที่ต้องการสอบเทียบ ต่างกันไม่เกิน 1.5 °C (3 °F)

หมายเหตุ ในการสอบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างถังแบบมาตราและถังตวงที่ต้องการสอบเทียบจะต้องมีค่าไม่มากกว่า 5.0 °C เหตุที่ต้องกำหนดไว้ที่ค่าดังกล่าวก็เพื่อที่หลีกเลี่ยงปัจจัยต่างๆที่อาจจะมีเกิดขึ้นถ้าอุณหภูมิแตกต่างมากกว่า 5.0 °C เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นอยู่กับความลึกของน้ำภายในถัง รวมทั้งระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของถังตวงที่ต้องการสอบเทียบ (temperature gradients ; $\delta t / \delta h$ เมื่อ h = ความลึกของน้ำภายในถัง หรือ $\delta t / \delta r$ เมื่อ r = รัศมีของถัง) รวมทั้งความไม่สอดคล้องระหว่างค่า C_{ts} และ C_{tw} เนื่องจากเราใช้อุณหภูมิเฉลี่ยค่าเดียวกันแต่ในความเป็นจริงไม่ใช่ค่าเดียวกัน (ง? หรือเปล่า หาก ง? ให้กลับไปดูค่านิยามของตัวแปรแก้ไขค่าทั้ง 2 ตัวใหม่)

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_d

- C_{dM} สามารถตัดทิ้งได้
- C_{dP} สามารถตัดทิ้งได้

เนื่องจากเราจะใช้ C_d เฉพาะกับสารตัวกลางทดสอบที่เป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวปิโตรเลียม แต่ในที่นี้สารตัวกลางเป็นน้ำสะอาดหรือน้ำประปาเพราะโดยทั่วไปเราไม่ได้ใช้น้ำบริสุทธิ์ เนื่องจากมีต้นทุนสูงเกินไปและหากถึงดวงสก็ปรกก็ไม่สามารคนำหมุนเวียนกลับมาใช้งาน ได้อีก ดังนั้นค่า C_{dM} , C_{dP} สามารถตัดทิ้งได้

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{tw}

- C_{tw} นำมาพิจารณา เพราะใช้น้ำสะอาดหรือน้ำบริสุทธิ์เป็นตัวกลาง

1.2. ในเทอมความดันของเหลวตัวกลางสอบเทียบเป็นน้ำสะอาดหรือน้ำประปา เมื่อความดันที่ถึงดวงแบบ มาตราเท่ากับความดันที่ถึงดวงที่ต้องการสอบเทียบและเท่ากับความดันบรรยากาศ $P_M = P_P = P_{atm}$ (ถึงดวงเป็น ถึงเปิด)

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{ps}

- C_{psM} สามารถตัดทิ้งได้
- C_{psP} สามารถตัดทิ้งได้

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{pl}

- C_{plM} สามารถตัดทิ้งได้
- C_{plP} สามารถตัดทิ้งได้

เพราะฉะนั้น C_{ps} และ C_{pl} ไม่ต้องนำมาพิจารณาเพราะความดันภายในถึงเท่ากับความดัน บรรยากาศและของเหลวตัวกลางที่ใช้สอบเทียบเป็นน้ำสะอาด หรือน้ำบริสุทธิ์

สรุปว่าค่าที่ต้องนำมาคิดทั้งหมดคือ C_{tw} C_{tsP} C_{tsM}

2. การคำนวณหาค่าปริมาตรของเครื่องตวงชนิดถึงดวงโลหะ

สำหรับที่เครื่องตวงแบบมาตรา มีสถานะขณะทำการสอบเทียบ ณ อุณหภูมิ (T_M) และความดัน บรรยากาศ (P_0) และสถานะอ้างอิงหรือสถานะมาตรฐาน (Reference or Standard Condition) ณ อุณหภูมิ (T_{0M}) และความดันบรรยากาศ (P_0 หรือ P_{atm})

สำหรับเครื่องตวงที่ต้องการสอบเทียบ มีสถานะขณะทำการสอบเทียบ ณ อุณหภูมิ (T_P) และความดันบรรยากาศ (P_0) และสถานะอ้างอิงหรือสถานะมาตรฐาน (Reference or Standard Condition) ณ อุณหภูมิ (T_{0P}) และความดันบรรยากาศ (P_0 หรือ P_{atm}) ซึ่งสถานะอ้างอิงของเครื่องตวงทั้ง 2 อาจมีอุณหภูมิเท่ากันหรือ ต่างกันก็ได้

จากหลักการที่ว่า มวลของเหลวระหว่างเครื่องตวงแบบมาตราและเครื่องตวงชนิดถึงดวงโลหะที่ทำการ สอบเทียบจะมีค่าคงที่ทุกสถานะใดๆ ไม่ว่าปริมาตรเปลี่ยนแปลงอย่างไร ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อความหนาแน่นของน้ำเท่านั้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อมวล ดังนั้น

$$M_P = M_M \quad (\text{Eq.6-2})$$

$$\rho_{TP} V_P = \rho_{TM} V_M \quad (\text{Eq.6-3})$$

$$\frac{V_P}{V_M} = \frac{\rho_{TM}}{\rho_{TP}} \quad (\text{Eq.6-4})$$

$$V_P = V_M \times C_{tw} \quad (\text{Eq.6-5})$$

ตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิกระทำต่อน้ำ เราเรียกว่า C_{tw} (the Correction Factor for the Effect of Temperature on Water) คือ

$$C_{tw} = \frac{\rho_{TM}}{\rho_{TP}} \quad (\text{Eq.6-6})$$

เนื่องจากการหาปริมาตรของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบจำเป็นต้องปรับค่าปริมาตรดังกล่าวไปยังสภาวะอ้างอิง ทั้งนี้เพื่อลดอิทธิพลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงและมีค่าอุณหภูมิไม่เท่ากันระหว่างเครื่องตวงแบบมาตรากับเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ จึงต้องแปลงปริมาตรไปเป็นค่าปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง (T_0) และความดันบรรยากาศ แต่ในที่นี้เนื่องจากเครื่องตวงทั้ง 2 เป็นระบบเปิดคือมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ดังนั้นเครื่องตวงทั้ง 2 จึงมีค่าความดันเท่ากันที่ความดันบรรยากาศ ในการปรับค่าปริมาตรจึงพิจารณาการปรับค่าไปยังสภาวะอ้างอิงที่อุณหภูมิอ้างอิงเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น

แต่เนื่องจากค่าปริมาตรที่อ่านได้จากชั้นหมายมาตราเครื่องตวงแบบมาตรเป็นค่าปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง นั่นคือปริมาตร V_{0M} ที่ T_{0M} ด้วยเหตุนี้การหาค่าปริมาตรจริงขณะอุณหภูมิวัดได้ T_M จึงต้องแก้ไขด้วยตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิกระทำต่อโลหะ ซึ่งเรียกว่า C_{ts} (the Correction Factor for the Effect of Temperature on Steel) ในที่นี้กำหนดให้ตัวแปรแก้ไขปรับค่าของเครื่องตวงแบบมาตร คือ C_{tsM} เพื่อหาค่าปริมาตรที่อุณหภูมิใดๆ (V_M) จะได้ว่า

$$V_M = V_{0M} \times C_{tsM} \quad (\text{Eq.6-7})$$

แทนค่าสมการ (Eq.6-7) ลงในสมการ (Eq.6-5)

$$V_P = V_{0M} \times C_{tw} \times C_{tsM} \quad (\text{Eq.6-8})$$

ถ้าต้องการหาค่า V_{0P} ที่สภาวะอ้างอิงหรือสภาวะมาตรฐาน (T_{0P} , P_{atm}) ดังนั้นจาก

$$V_P = V_{0P} \times C_{tsP} \quad (\text{Eq.6-9})$$

$$V_{0P} = \frac{V_P}{C_{tsP}} \quad (\text{Eq.6-10})$$

แทนสมการ (Eq.6-8) ในสมการ (Eq.6-10)

$$V_{0P} = V_{0M} \times C_{tw} \times \frac{C_{tsM}}{C_{tsP}} \quad (\text{Eq.6-11})$$

จากสมการ (Eq.6-6)

$$C_{tw} = \frac{\rho_{TM}}{\rho_{TP}}$$

จากนิยามตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาณสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิกระทำต่อเครื่องตวงแบบมาตราและต่อเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ จะได้ว่า

$$C_{tsM} = 1 + \gamma_M(T_M - T_{0M}) \quad (\text{Eq.6-12})$$

$$C_{tsP} = 1 + \gamma_P(T_P - T_{0P}) \quad (\text{Eq.6-13})$$

เครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบมีปริมาตร V_{0P} ที่สภาวะอ้างอิงหรือสภาวะมาตรฐาน (T_{0P} , P_{atm}) จึงมีค่าเท่ากับ

$$V_{0P} = V_{0M} \times \frac{\rho_{TM}}{\rho_{TP}} \times \frac{1 + \gamma_M(T_M - T_{0M})}{1 + \gamma_P(T_P - T_{0P})} \quad (\text{Eq.6-14})$$

- เมื่อ V_{0M} = ปริมาตรเครื่องตวงแบบมาตราที่สภาวะอ้างอิง, m^3 (cm^3)
 V_{0P} = ปริมาตรเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบที่สภาวะอ้างอิง, m^3 (cm^3)
 ρ_{TM} = ความหนาแน่นของน้ำภายในเครื่องตวงแบบมาตราที่อุณหภูมิวัดได้ขณะสอบเทียบ, Kg/m^3 (g/cm^3)
 ρ_{TP} = ความหนาแน่นของน้ำภายในเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบที่อุณหภูมิวัดได้ขณะสอบเทียบ, Kg/m^3 (g/cm^3)
 T_M = อุณหภูมิผนังเฉลี่ยของภาชนะบรรจุของเหลวเครื่องตวงแบบมาตรา ในที่นี้ให้ถือเป็นอุณหภูมิเดียวกับน้ำภายในเครื่องตวง; $^{\circ}C$
 T_P = อุณหภูมิผนังเฉลี่ยของภาชนะบรรจุของเหลวเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ ในที่นี้ให้ถือเป็นอุณหภูมิเดียวกับน้ำภายในเครื่องตวง; $^{\circ}C$
 T_{0M} = อุณหภูมิอ้างอิงของผนังของเครื่องตวงแบบมาตรา เช่น 30, 20, หรือ 15 $^{\circ}C$
 T_{0P} = อุณหภูมิอ้างอิงของผนังของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ เช่น 30, 20, หรือ 15 $^{\circ}C$
 γ = ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามปริมาตรลูกบาศก์ของ (Coefficient of Cubical Expansion per $^{\circ}C$) ของโลหะที่ใช้ทำภาชนะบรรจุของเหลว (ตารางที่ 6-8)

สำหรับในกรณีต้องใช้เครื่องตวงแบบมาตราจำนวน 2 ถัง เพื่อทำการสอบเทียบถังตวงที่มีพิกัดกำลังที่สูงกว่า เช่น ถังตวงแบบมาตรา 100 ลิตรกับถังตวงแบบมาตรา 200 ลิตรเพื่อสอบเทียบถังตวง 500 ลิตร เราก็จะได้ว่า V_{0P} ที่สภาวะอ้างอิงหรือสภาวะมาตรฐาน (T_{0P} , P_{atm}) จึงมีค่าเท่ากับ

$$V_{0P} = \left[V_{0M1} \times \frac{\rho_{TM1}}{\rho_{TP}} \times \frac{1 + \gamma_{M1}(T_{M1} - T_{0M1})}{1 + \gamma_P(T_P - T_{0P})} \right] + \left[V_{0M2} \times \frac{\rho_{TM2}}{\rho_{TP}} \times \frac{1 + \gamma_{M2}(T_{M2} - T_{0M2})}{1 + \gamma_P(T_P - T_{0P})} \right] \quad (\text{Eq.6-15})$$

วัสดุ	Coefficient of Cubical Expansion	
	/ °C	/ °F
Mild or Low Carbon Steel	0.0000335	0.0000186
Austenitic Stainless Steel 304	0.00005184	
Austenitic Stainless Steel 316	0.0000477	
17-4 Stainless Steel	0.0000324	0.0000018
	0.0000216	0.000012
Copper-zinc alloy (brass; CuZn ₃₇ (Ms ₆₃))	0.000054	
Aluminum	0.000069	
Normal Pyrex (@20 °C)	0.000010	0.0000056
Glass, Borosilicate (T1CA)	0.000010	
Glass, Borosilicate (T1CB)	0.000015	

ตารางที่ 6-8 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามปริมาตรลูกบาศก์ของวัสดุ (Coefficient of Cubical Expansion per °C) ของโลหะที่ใช้ทำภาชนะบรรจุของเหลว

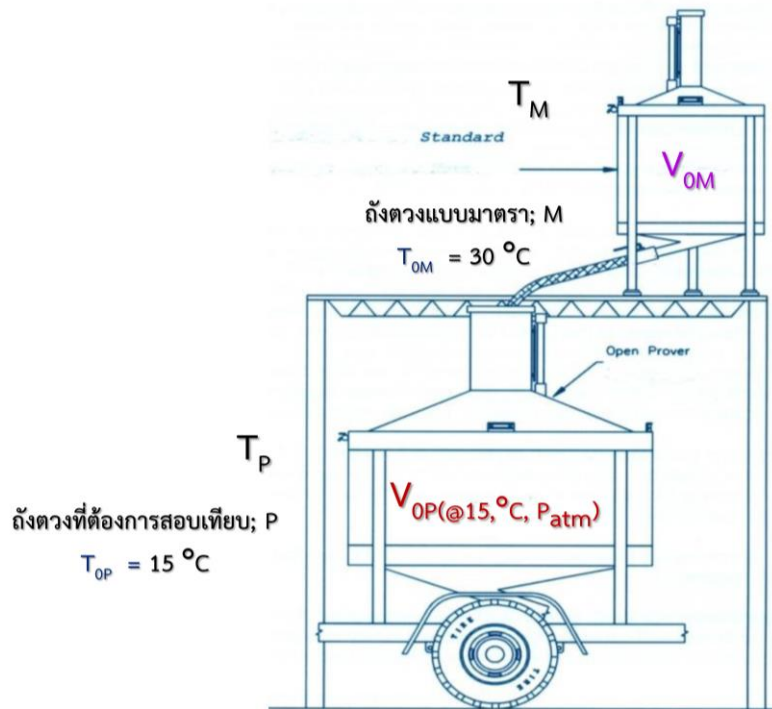
สำหรับกรณีที่อุณหภูมิอ้างอิงของถังตวงแบบมาตราและถังตวงที่ต้องการสอบเทียบมีค่าต่างกัน ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 6-27

- ถังตวงแบบมาตรา : อุณหภูมิอ้างอิง $T_{0M} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ และความดันอ้างอิงเท่ากับความดันบรรยากาศ P_{atm}
- ถังตวงที่ต้องการทดสอบ : อุณหภูมิอ้างอิง $T_{0P} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ และความดันอ้างอิงเท่ากับความดันบรรยากาศ P_{atm}

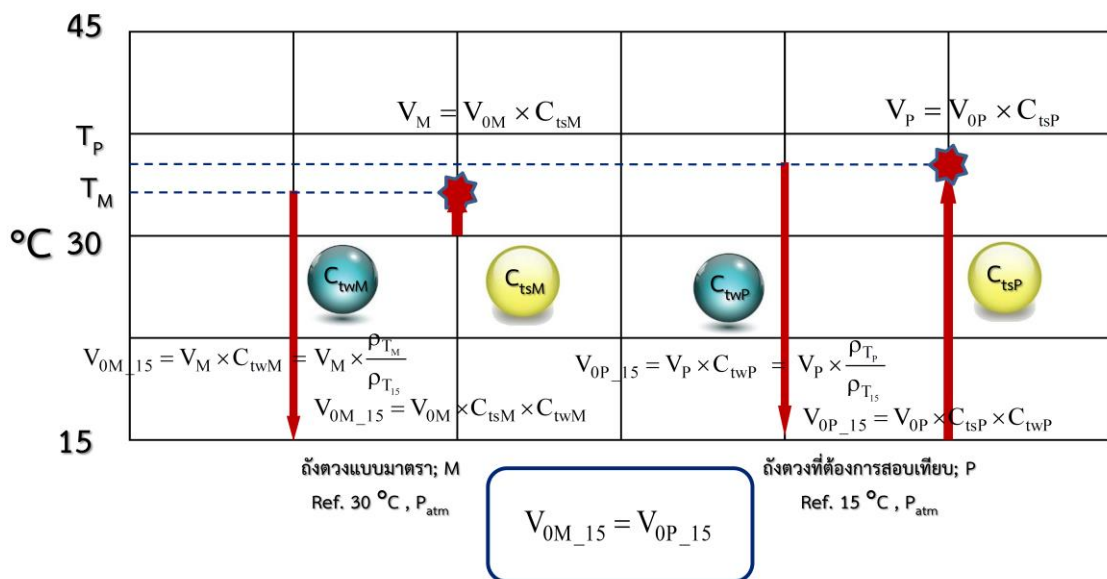
ดังนั้นในขณะสอบเทียบทำการวัดอุณหภูมิของน้ำได้มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของถังตวงแบบมาตรา: T_M และอุณหภูมิเฉลี่ยของถังตวงที่ต้องการสอบเทียบ: T_P เราสามารถหาปริมาตรถังตวงที่ต้องการสอบเทียบที่สถานะอ้างอิง (V_{0P}) อุณหภูมิอ้างอิง $T_{0P} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ และความดันอ้างอิงเท่ากับความดันบรรยากาศ P_{atm} มีค่าเท่ากับ

$$V_{0P(@15, P_{\text{atm}})} = V_{0M} \times \frac{C_{\text{twM}}}{C_{\text{twP}}} \times \frac{C_{\text{tsM}}}{C_{\text{tsP}}} = V_{0M} \times \frac{\frac{\rho_{T_M}}{\rho_{15}}}{\frac{\rho_{T_P}}{\rho_{15}}} \times \frac{(1 + \gamma_M(T_M - T_{0M}))}{(1 + \gamma_P(T_P - T_{0P}))} \quad (\text{Eq.6-16})$$

โดยทำการปรับปริมาตรที่สถานะแตกต่างกันให้อยู่ในสถานะเดียวกันเพื่อทำการเปรียบเทียบผลการสอบเทียบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6-28



รูปที่ 6-27 การสอบเทียบถังตวงแบบ แบบ “The Filling Method” หรือ “Water Pour Method”



รูปที่ 6-28 การปรับสภาวะขณะวัดไปยังสภาวะอ้างอิง แล้วเทียบปริมาตรที่วัดได้ที่สภาวะอ้างอิงเดียวกัน

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดค่าในการสอบเทียบ (Standard Uncertainty)

ในการสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะโดยวิธีการตวงเปรียบเทียบ (Volumetric Method) การคำนวณค่าความไม่แน่นอนจากการสอบเทียบด้วยวิธีการนี้เราพิจารณาจากสมการหาค่าปริมาตรอ้างอิงของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบที่สภาวะอ้างอิง (P_0, T_{0P})

$$V_{0P} = V_{0M} \times \frac{\rho_{TM}}{\rho_{TP}} \times \frac{1 + \gamma_M(T_M - T_{0M})}{1 + \gamma_P(T_P - T_{0P})} \quad (\text{Eq.6-17})$$

หรือเขียนให้ชัดเจนว่า

ก. ในกรณีใช้เครื่องตวงแบบมาตราจำนวน 1 ถัง ได้ว่า

$$V_{0P} = V_{0M} \times \frac{\rho_{wTM}}{\rho_{wTP}} \times \frac{1 + \gamma_M(T_{wM} - T_{0M})}{1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P})} \quad (\text{Eq.6-18})$$

ดังนั้นความไม่แน่นอนจากสมการการหาค่าปริมาตรของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบมีค่าเท่ากับ

$$u_c = \sqrt{c_{V_{0M}}^2 \cdot u_{V_{0M}}^2 + c_{\rho_{wTM}}^2 \cdot u_{\rho_{wTM}}^2 + c_{\rho_{wTP}}^2 \cdot u_{\rho_{wTP}}^2 + c_{T_{wM}}^2 \cdot u_{T_{wM}}^2 + c_{T_{wP}}^2 \cdot u_{T_{wP}}^2 + c_{\gamma_M}^2 \cdot u_{\gamma_M}^2 + c_{\gamma_P}^2 \cdot u_{\gamma_P}^2 + c_{\sigma}^2 \cdot u_{\sigma}^2 + c_L^2 \cdot u_L^2} \quad (\text{Eq.6-19})$$

ข. ในกรณีใช้เครื่องตวงแบบมาตราจำนวน 2 ถัง

$$V_{0P} = \left[V_{0M1} \times \frac{\rho_{wTM1}}{\rho_{wTP}} \times \frac{1 + \gamma_{M1}(T_{wM1} - T_{0M1})}{1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P})} \right] + \left[V_{0M2} \times \frac{\rho_{wTM2}}{\rho_{wTP}} \times \frac{1 + \gamma_{M2}(T_{wM2} - T_{0M2})}{1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P})} \right] \quad (\text{Eq.6-20})$$

ความไม่แน่นอนจากสมการการหาค่าปริมาตรของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ จึงมีค่าเท่ากับ

$$u_c = \sqrt{c_{V_{0M1}}^2 \cdot u_{V_{0M1}}^2 + c_{V_{0M2}}^2 \cdot u_{V_{0M2}}^2 + c_{\rho_{wTM1}}^2 \cdot u_{\rho_{wTM1}}^2 + c_{\rho_{wTM2}}^2 \cdot u_{\rho_{wTM2}}^2 + c_{\rho_{wTP}}^2 \cdot u_{\rho_{wTP}}^2 + c_{T_{wM1}}^2 \cdot u_{T_{wM1}}^2 + c_{T_{wM2}}^2 \cdot u_{T_{wM2}}^2 + c_{T_{wP}}^2 \cdot u_{T_{wP}}^2 + c_{\gamma_{M1}}^2 \cdot u_{\gamma_{M1}}^2 + c_{\gamma_{M2}}^2 \cdot u_{\gamma_{M2}}^2 + c_{\gamma_P}^2 \cdot u_{\gamma_P}^2 + c_{\sigma}^2 \cdot u_{\sigma}^2 + c_L^2 \cdot u_L^2} \quad (\text{Eq.6-21})$$

ในการรายงานผลการสอบเทียบเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบมีค่าปริมาตรที่สภาวะอ้างอิง ด้วยค่าความไม่แน่นอน ระดับความมั่นใจ 95% ($k=2$) ในรูปของ

$$V_{0P} \pm 2u_c \text{ ลิตร} \quad (\text{Eq.6-22})$$

พิจารณารายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากเครื่องตวงแบบมาตรา (Standard Uncertainty of the Proving Tank (mL)) ; $u_{V_{0M}}$

- มี Sensitivity Coefficient¹

¹ ในการทำ Partial diff. ใช้โปรแกรม MathCAD

กรณีใช้เครื่องตวงแบบมาตรา จำนวน 1 ถัง

$$c_{V_{0M}} = \frac{\partial V_{0P}}{\partial V_{0M}} = \frac{\rho_{wTM}(1 + \gamma_M(T_{wM} - T_{0M}))}{\rho_{wTP}(1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P}))} \quad (\text{Eq.6-23})$$

กรณีใช้เครื่องตวงแบบมาตรา จำนวน 2 ถัง

$$c_{V_{0M1}} = \frac{\partial V_{0P}}{\partial V_{0M1}} = \frac{\rho_{wTM1}(1 + \gamma_{M1}(T_{wM1} - T_{0M1}))}{\rho_{wTP}(1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P}))} \quad (\text{Eq.6-24})$$

$$c_{V_{0M2}} = \frac{\partial V_{0P}}{\partial V_{0M2}} = \frac{\rho_{wTM2}(1 + \gamma_{M2}(T_{wM2} - T_{0M2}))}{\rho_{wTP}(1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P}))} \quad (\text{Eq.6-25})$$

- เมื่อมีการใช้เครื่องตวงแบบมาตราที่มีพิสัยความจุต่ำกว่าทำการตวงเปรียบเทียบกับจำนวนครั้งมากกว่า 1 ครั้งเมื่อเทียบกับเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ ให้นำค่า Uncertainty ของเครื่องตวงแบบมาตราจากใบรายงานผลการสอบเทียบมาใช้ตามจำนวนครั้งที่ตวงเปรียบเทียบกับของเครื่องตวงแบบมาตรา

$$u_{V_{0M1'}} = \frac{U_{M1}}{k} \quad \text{ml หรือ cm}^3 \quad (\text{Eq.6-26})$$

$$\text{หรือ } u_{V_{0M1'}} = \frac{U_{M1}}{k} + \frac{U_{M1}}{k} + \dots + \frac{U_{M1}}{k} \quad (\text{Eq.6-27})$$

$$u_{V_{0M2'}} = \frac{U_{M2}}{k} \quad (\text{Eq.6-28})$$

$$\text{หรือ } u_{V_{0M2'}} = \frac{U_{M2}}{k} + \frac{U_{M2}}{k} + \dots + \frac{U_{M2}}{k} \quad (\text{Eq.6-29})$$

เมื่อ U_{M1} , U_{M2} คือ ค่าความไม่แน่นอนจากใบรายงานสอบเทียบของเครื่องตวงแบบมาตรา ด้วยระดับความมั่นใจ 95 % ซึ่ง k จะมีค่าเท่ากับ 2

- มี Probability Distribution เป็นลักษณะ Normal

- ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการหาค่าความหนาแน่นของน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางในการสอบเทียบ ด้วยวิธีการตวงเปรียบเทียบเป็นน้ำสะอาดในเครื่องตวงแบบมาตราและเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ ดังนั้นเพื่อให้สะดวกต่อการปฏิบัติงาน ในที่นี้เราจึงใช้ความความหนาแน่นของน้ำโดยสมการของ H. Wagenbreth และ W. Blanke , PTB (Standard Uncertainty of Density of the Water (g cm^{-3}));

$u_{\rho_{wTM}}$, $u_{\rho_{wTP}}$

$$\rho_w = \frac{\sum_{n=0}^5 a_n \times t_w^n}{1 + b t_w} \quad (\text{Eq.6-30})$$

- มี Sensitivity Coefficient

สำหรับเครื่องตวงแบบมาตรา 1 ถัง

$$c_{\rho_{wTM1}} = \frac{\partial V_{0P}}{\partial \rho_{wTM1}} = \frac{(1 + \gamma_{M1}(T_{wM1} - T_{0M1}))V_{0M1}}{\rho_{wTP}(1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P}))} \quad \text{ml}^2/\text{g หรือ } (\text{cm}^3)^2/\text{g} \quad (\text{Eq.6-31})$$

สำหรับเครื่องตวงแบบมาตรา 2 ถึง ถึงเครื่องตวงแบบมาตราที่ 2 จะได้ว่า

$$c_{\rho_{wTM2}} = \frac{\partial V_{0P}}{\partial \rho_{wTM2}} = \frac{(1 + \gamma_{M2}(T_{wM2} - T_{0M2}))V_{0M2}}{\rho_{wTP}(1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P}))} \text{ ml}^2/\text{g หรือ } (\text{cm}^3)^2/\text{g} \quad (\text{Eq.6-32})$$

สำหรับเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบเมื่อใช้เครื่องตวงแบบมาตราจำนวน 1 ถึง

$$c_{\rho_{wP}} = \frac{\partial V_{0P}}{\partial \rho_{wP}} = -\frac{\rho_{wTM1}(1 + \gamma_{M1}(T_{wM1} - T_{0M1}))V_{0M1}}{\rho_{wTP}^2(1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P}))} \text{ ml}^2/\text{g หรือ } (\text{cm}^3)^2/\text{g} \quad (\text{Eq.6-33})$$

สำหรับเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบเมื่อใช้เครื่องตวงแบบมาตราจำนวน 2 ถึง

$$c_{\rho_{wP}} = \frac{\partial V_{0P}}{\partial \rho_{wP}} = \frac{-[\rho_{wTM1}(1 + \gamma_{M1}(T_{wM1} - T_{0M1}))V_{0M1}] + [\rho_{wTM2}(1 + \gamma_{M2}(T_{wM2} - T_{0M2}))V_{0M2}]}{\rho_{wTP}^2(1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P}))} \text{ ml}^2/\text{g หรือ } (\text{cm}^3)^2/\text{g} \quad (\text{Eq.6-34})$$

- ประเมินค่าความไม่แน่นอนค่าความหนาแน่นของน้ำขึ้นอยู่กับค่าความไม่แน่นอนของการวัดอุณหภูมิ น้ำ ดังนั้น

$$u_{\rho_{w'}} = c_{\rho_w(tw)} \cdot u_{tw'} \quad \text{g/cm}^3 \quad (\text{Eq.6-35})$$

$$C_{\rho_w(tw)} = \frac{\partial \rho_w}{\partial t} = \frac{(16.952577 - 1.5981025 \times 10^{-2} \times t_w - 1.3872527 \times 10^{-4} \times t_w^2 + 4.2338404 \times 10^{-7} \times t_w^3 - 1.4051503 \times 10^{-9} \times t_w^4)}{(1 + 1.6887236 \times 10^{-2} \times t_w)} - 1.688723610^{-2} \cdot \frac{(999.83952 + 16.952577 \times t_w - 7.9905127 \times 10^{-3} \times t_w^2 - 4.6241757 \times 10^{-5} \times t_w^3 + 1.058460 \times 10^{-7} \times t_w^4 - 2.8103006 \times 10^{-10} \times t_w^5)}{(1 + 1.6887236 \times 10^{-2} \times t_w)^2} \quad \text{.....Kg/m}^3 \cdot ^\circ\text{C} \quad (\text{Eq.6-36})$$

สำหรับเครื่องตวงแบบมาตราที่ 1

$$u_{\rho_{wTM1'}} = c_{\rho_w(t_{wM1})} \cdot u_{T_{wM1'}} \quad (\text{Eq.6-37})$$

สำหรับเครื่องตวงแบบมาตรา 2 ถึง ถึงเครื่องตวงแบบมาตราที่ 2 จะได้ว่า

$$u_{\rho_{wTM2}'} = c_{\rho_w(t_{wM2})} \cdot u_{T_{wM2}'} \quad (\text{Eq.6-38})$$

สำหรับเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ

$$u_{\rho_{wTP}'} = c_{\rho_w(t_{wP})} \cdot u_{T_{wP}'} \quad (\text{Eq.6-39})$$

โดย u_{twM} และ u_{twP} ได้จากหัวข้อ 3 ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการวัดอุณหภูมิของน้ำ ภายในเครื่องตวงแบบมาตราและเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ (Standard Uncertainty of Temperature of the Water ($^{\circ}\text{C}$))

- มี Probability Distribution เป็นลักษณะ Normal

3. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการวัดอุณหภูมิของน้ำภายในเครื่องตวงแบบมาตราและเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ ในการสอบเทียบ (Standard Uncertainty of Temperature of the Water ($^{\circ}\text{C}$)); $u_{T_{WM}}$, $u_{T_{WP}}$

- มี Sensitivity Coefficient

สำหรับเครื่องตวงแบบมาตราที่ 1

$$c_{T_{WM1}} = \frac{\partial V_{OP}}{\partial T_{WM1}} = \frac{\rho_{wTM1} \gamma_{M1} V_{OM1}}{\rho_{wTP} (1 + \gamma_P (T_{WP} - T_{OP}))} \quad \text{cm}^3 / ^{\circ}\text{C} \quad (\text{Eq.6-40})$$

สำหรับเครื่องตวงแบบมาตรา 2 ถึง ถึงเครื่องตวงแบบมาตราที่ 2 จะได้ว่า

$$c_{T_{WM2}} = \frac{\partial V_{OP}}{\partial T_{WM2}} = \frac{\rho_{wTM2} \gamma_{M2} V_{OM2}}{\rho_{wTP} (1 + \gamma_P (T_{WP} - T_{OP}))} \quad \text{cm}^3 / ^{\circ}\text{C} \quad (\text{Eq.6-41})$$

สำหรับเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ จำนวน 1 เครื่องตวงแบบมาตรา

$$c_{T_{WP}} = \frac{\partial V_{OP}}{\partial T_{WP}} = - \frac{\rho_{wTM1} (1 + \gamma_{M1} (T_{WM1} - T_{OM1})) \gamma_P V_{OM1}}{\rho_{wTP} (1 + \gamma_P (T_{WP} - T_{OP}))^2} \quad \text{cm}^3 / ^{\circ}\text{C} \quad (\text{Eq.6-42})$$

สำหรับเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ จำนวน 2 เครื่องตวงแบบมาตรา

$$c_{T_{WP}} = \frac{\partial V_{OP}}{\partial T_{WP}} = \frac{-[\rho_{wTM1} (1 + \gamma_{M1} (T_{WM1} - T_{OM1})) \gamma_P V_{OM1}] + [\rho_{wTM2} (1 + \gamma_{M2} (T_{WM2} - T_{OM2})) \gamma_P V_{OM2}]}{\rho_{wTP} (1 + \gamma_P (T_{WP} - T_{OP}))^2} \quad \text{cm}^3 / ^{\circ}\text{C} \quad (\text{Eq.6-43})$$

- ประเมินค่าความไม่แน่นอนการวัดอุณหภูมิของน้ำในการสอบเทียบ

สำหรับเครื่องตวงแบบมาตราถึงที่ 1

$$u_{T_{WM1'}} = \sqrt{u_{T_{w1}}^2 + u_{T_{w2}}^2 + u_{T_{w3}}^2} \quad ^{\circ}\text{C} \quad (\text{Eq.6-44})$$

สำหรับเครื่องตวงแบบมาตรา 2 ถึง ถึงเครื่องตวงแบบมาตราที่ 2 จะได้ว่า

$$u_{T_{WM2'}} = \sqrt{u_{T_{w1}}^2 + u_{T_{w2}}^2 + u_{T_{w3}}^2} \quad ^{\circ}\text{C} \quad (\text{Eq.6-45})$$

สำหรับเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ

$$u_{T_{WP'}} = \sqrt{u_{T_{w1}}^2 + u_{T_{w2}}^2 + u_{T_{w3}}^2} \quad ^{\circ}\text{C} \quad (\text{Eq.6-46})$$

- มี Probability Distribution เป็นลักษณะ Rectangular

ประเมินอิทธิพลที่มีผลต่อการวัดค่าอุณหภูมิของน้ำในการสอบเทียบด้วยกัน 3 สาเหตุ

3.1. ค่าความไม่แน่นอนเครื่องวัดอุณหภูมิของน้ำจากใบรายงานผลการสอบเทียบ

$$u_{T_{w1}} = \frac{U_{T_w}}{k} \quad (\text{Eq.6-47})$$

3.2. ค่าความไม่แน่นอนของการอ่านค่าบนเครื่องวัดอุณหภูมิของน้ำ (Resolution $\pm d_{T_w}$)

$$u_{T_{w2}} = \frac{d_{T_w}}{2\sqrt{3}} \quad (\text{Eq.6-48})$$

3.3. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความแปรปรวนหรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำขณะทำการสอบเทียบ ($\pm 0.5^\circ\text{C}$)

$$u_{T_{w3}} = \frac{T_w^+ - T_w^-}{2\sqrt{3}} \quad (\text{Eq.6-49})$$

4. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลือกใช้ค่าการขยายตัวตามปริมาตรลูกบาศก์ของเครื่องตวงแบบมาตราและเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ (Standard Uncertainty of Coefficient of Cubical Thermal Expansion of the Material of the Measure ($^\circ\text{C}^{-1}$)); u_{γ_M} , u_{γ_P}

- มี Sensitivity Coefficient

สำหรับเครื่องตวงแบบมาตราถึงที่ 1

$$c_{\gamma_{M1}} = \frac{\partial V_{0P}}{\partial \gamma_{M1}} = \frac{\rho_{wTM1}(T_{wM1} - T_{0M1})V_{0M1}}{\rho_{wTP}(1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P}))} \quad \text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C} \quad (\text{Eq.6-50})$$

สำหรับเครื่องตวงแบบมาตรา 2 ถึง ถึงเครื่องตวงแบบมาตราที่ 2 จะได้ว่า

$$c_{\gamma_{M2}} = \frac{\partial V_{0P}}{\partial \gamma_{M2}} = \frac{\rho_{wTM2}(T_{wM2} - T_{0M2})V_{0M2}}{\rho_{wTP}(1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P}))} \quad \text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C} \quad (\text{Eq.6-51})$$

สำหรับเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ

$$c_{\gamma_P} = \frac{\partial V_{0P}}{\partial \gamma_P} = - \frac{\rho_{wM}(1 + \gamma_M(T_{wM} - T_{0M}))V_{0M}(T_{wP} - T_{0P})}{\rho_{wP}[1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P})]^2} \quad \text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C} \quad (\text{Eq.6-52})$$

สำหรับเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบเมื่อใช้เครื่องตวงแบบมาตรา 2 ถึง

$$\begin{aligned} c_{\gamma_P} &= \frac{\partial V_{0P}}{\partial \gamma_P} \\ &= \frac{-[\rho_{wTM1}(1 + \gamma_{M1}(T_{wM1} - T_{0M1}))V_{0M1}(T_{wP} - T_{0P})] + [\rho_{wTM2}(1 + \gamma_{M2}(T_{wM2} - T_{0M2}))V_{0M2}(T_{wP} - T_{0P})]}{\rho_{wTP}[1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P})]^2} \\ &\quad \text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C} \quad (\text{Eq.6-53}) \end{aligned}$$

- ประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าที่เลือกใช้ บนพื้นฐาน OIML R118 (TEST REPORT) แนะนำ

$$u_{\gamma'} = 0.5 \times 10^{-7} \quad ^\circ\text{C}^{-1} \quad (\text{Eq.6-54})$$

- มี Probability Distribution เป็นลักษณะ Rectangular

5. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการหาค่าปริมาตรที่วัดได้จากขั้นตอนการสอบเทียบในแต่ละครั้ง (Standard Uncertainty from the Measurement (cm^3)); u_R

- มี Sensitivity Coefficient

$$c_{\sigma} = \frac{\partial V_{0P}}{\partial \sigma} = 1 \quad (\text{Eq.6-55})$$

- ประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากผลการสอบเทียบหาค่าปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง

$$u_{R'} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{cm}^3$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \quad (\text{Eq.6-56})$$

เมื่อ s = Estimated Standard Deviation ของค่าปริมาตรที่คำนวณได้จากผลการสอบเทียบ

n = จำนวนครั้งในการสอบเทียบ

- มี Probability Distribution เป็นลักษณะ Normal

6. ค่าความไม่แน่นอนสาเหตุเกิดจากการเลื่อนค่าของถังตวงแบบมาตรา (Standard uncertainty of the standard volume drift (g)); ($u_{s \text{ Drift}}$) ประเมินตามมติคณะอนุกรรมการพิจารณารับรองห้องปฏิบัติการสอบเทียบทางกลและเคมี (มติการประชุมครั้งที่ 3-1/2547) มี 3 กรณี

- 1) กรณีที่ 1 มีประวัติการสอบเทียบของ Standard และมีค่า Drift ของ Standard น้อยมากๆ เกือบเป็นศูนย์ ค่า Drift ของ Standard อาจกำหนดได้จาก Import uncertainty ที่ 1σ และกำหนดการกระจายแบบ Triangular และ divisor = $\sqrt{6}$ อ้างอิงตาม M3003
- 2) กรณีที่ 2 มีการสอบเทียบของ Standard ครั้งแรก ไม่รู้ค่า Drift ของ Standard จะมีกำหนดการกระจายแบบ Rectangular ซึ่งจะได้ค่า Drift ของ Standard เท่ากับ Import uncertainty ที่ 2σ และ divisor = $\sqrt{3}$
- 3) กรณีที่ 3 มีประวัติการสอบเทียบของ Standard และมีค่า Drift ของ Standard จะมีกำหนดการกระจายแบบ Rectangular ซึ่งจะได้ค่า Drift ของ Standard เท่ากับ ค่าของปีล่าสุด - ค่าของปีก่อนหน้า (จากใบรายงานผลแบบมาตรา) และ divisor = $\sqrt{3}$

- มี Sensitivity coefficient

กรณีใช้เครื่องตวงแบบมาตรา จำนวน 1 ถัง

$$c_{s \text{ Drift}} = \frac{\partial V_{0P}}{\partial V_{0M}} = \frac{\rho_{wTM}(1 + \gamma_M(T_{wM} - T_{0M}))}{\rho_{wTP}(1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P}))} \quad (\text{Eq.6-57})$$

กรณีใช้เครื่องตวงแบบมาตรา จำนวน 2 ถัง

$$c_{s \text{ Drift } V_{0M1}} = \frac{\partial V_{0P}}{\partial V_{0M1}} = \frac{\rho_{wTM1}(1 + \gamma_{M1}(T_{wM1} - T_{0M1}))}{\rho_{wTP}(1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P}))} \quad (\text{Eq.6-58})$$

$$c_{s \text{ Drift } V_{0M2}} = \frac{\partial V_{0P}}{\partial V_{0M2}} = \frac{\rho_{wTM2}(1 + \gamma_{M2}(T_{wM2} - T_{0M2}))}{\rho_{wTP}(1 + \gamma_P(T_{wP} - T_{0P}))} \quad (\text{Eq.6-59})$$

- เมื่อมีการใช้หลายเครื่องตวงแบบมาตรา นำค่า uncertainty ของแต่ละเครื่องตวงแบบมาตราจากใบรายงานผลการสอบเทียบมาใช้ (กรณีที่ 2)

$$u_{s1Drift} = U_{s1} \quad g$$

$$u_{s2Drift} = U_{s2} \quad g$$



$$u_{snDrift} = U_{sn} \quad g \quad (Eq.6-60)$$

เมื่อ U_{sn} คือ ค่าความไม่แน่นอนจากใบรายงานสอบเทียบของแบบมาตราแต่ละเครื่อง ด้วยระดับความมั่นใจ 95 % ซึ่ง k จะมีค่าเท่ากับ 2

- มี Probability distribution เป็นลักษณะ Rectangular

7. ค่าความไม่แน่นอนสาเหตุเกิดจากเครื่องวัดความยาวชนิดบรรทัดโลหะ ในการวัดความสูงของระดับท้องน้ำเทียบกับจุดอ้างอิง (Standard uncertainty of steel ruler); (u_L) ในกรณีเครื่องตวงแบบคอลเกล หรือคอมมีซีดชั้นหมายมาตรา

- มี Sensitivity Coefficient

$$c_L = \frac{\partial V_{0P}}{\partial L} = L_V \quad \text{cm}^3/\text{cm}. \quad (Eq.6-61)$$

- ประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการวัดความสูงของระดับท้องน้ำเทียบกับจุดอ้างอิงด้วยเครื่องวัดความยาวชนิดบรรทัดโลหะ

$$u_{L'} = \sqrt{u_{L_1}^2 + u_{L_2}^2} \quad \text{cm}. \quad (Eq.6-62)$$

ประเมินอิทธิพลที่มีผลต่อการวัดความสูงของระดับท้องน้ำเทียบกับจุดอ้างอิงในการสอบเทียบด้วยกัน 2 สาเหตุ

7.1. ค่าความไม่แน่นอนเครื่องวัดความยาวชนิดบรรทัดโลหะจากใบรายงานผลการสอบเทียบ

$$u_{L_1} = \frac{U_{L_s}}{k} \quad (Eq.6-63)$$

7.2. ค่าความไม่แน่นอนของการอ่านค่าบนเครื่องวัดความยาว (Resolution $\pm d_{L_s}$) รูปแบบการกระจายของค่าความไม่แน่นอน Triangular distribution, type B บรรทัดโลหะ อ่านได้ละเอียด 0.1 cm

$$u_{L_2} = \frac{d_{L_s}}{2\sqrt{6}} \quad (Eq.6-64)$$

$$u_{L_2} = \frac{d_{L_s}}{2\sqrt{6}} = \frac{0.1}{2\sqrt{6}} = 0.02041 \quad \text{cm}.$$

- มี Probability Distribution เป็นลักษณะ Normal

8. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการจับเวลา Drain Time การจับเวลาเป็นไปตามตารางที่ 6-5 จากที่ได้ศึกษาข้อมูลความคลาดเคลื่อนของระยะเวลา 3 วินาทีจาก Drain time สรุปผลไม่กระทบต่อผลการสอบเทียบจึงประเมินให้ค่าความไม่แน่นอนของการจับเวลาของนาฬิกา Drain Time เท่ากับศูนย์

9. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการระเหยของของเหลวตัวกลางสอบเทียบ (น้ำสะอาด) จากที่ได้ทดสอบเราจึงพิจารณาค่า Standard Uncertainty ความไม่แน่นอนเนื่องจากการระเหยของของเหลวตัวกลางสอบเทียบมีค่าน้อยมากเนื่องจากระยะเวลาในการวัดความสูงจากจุดอ้างอิงในช่วงเวลาสั้นๆ จึงประเมินให้ค่าความไม่แน่นอนของการระเหยของของเหลวตัวกลางสอบเทียบ (น้ำสะอาด) มีค่าเท่ากับ ศูนย์

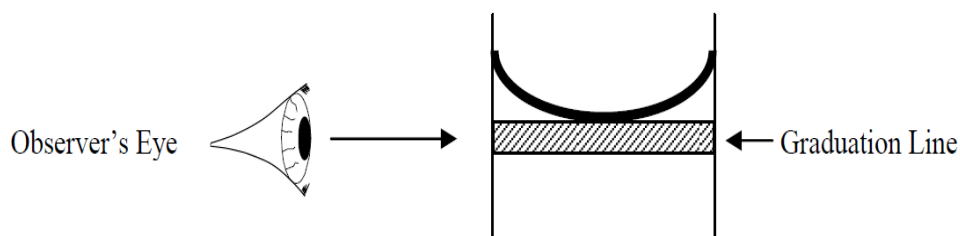
การคำนวณหาขีดขึ้นหมายมาตราของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ

เพื่อหาความสัมพันธ์ของความสูงของระดับน้ำบริเวณคอถังตวงทำด้วยโลหะเทียบกับปริมาตรความจุของคอถังตวง ค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้เรียกว่า “อัตราส่วนสเกลคอ” ซึ่งหากเป็นเครื่องชั่งตวงวัดที่ดีค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ต้องมีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง ส่วนสมการเส้นตรงนั้นจะมีค่าความชันมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับขนาดคอใหญ่ หรือขนาดคอเล็ก (คอถังตวงโลหะ)

เมื่อได้ความสัมพันธ์ค่านี้แล้ว นำไปทำอะไรต่อล่ะครับ ก็นำไปทำแผ่นขีดขึ้นหมายมาตรา (Scale Plates) ใจ แต่ถ้างถังตวงโลหะเกิดมีแผ่นขีดขึ้นหมายมาตราอยู่แล้วเรายังต้องหาอัตราส่วนสเกลคออีกหรือไม่ ตอบว่าต้องครับ จากที่ผ่านมาพบปัญหาที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น มีการซ่อมแซมคอถังตวงแบบมาตราโดยเปลี่ยนไปใช้ท่อใหม่ตัดเชื่อมเปลี่ยนขนาดคอถัง หรือทำการเปลี่ยนหลอดแก้ว sight glass ที่มีค่าความหนาบางไม่เท่าเดิมเนื่องจากหลอดแก้วแตกระหว่างขนส่ง หรือมีการใส่ท่อเสริมลงไปในคอถังตวงเพื่อสะดวกกับการทำงานทำให้มีการแทนที่ของปริมาตรคอถังด้วยท่อเสริมที่ติดตั้งเข้าไปใหม่ หรือในบางกรณีผู้ผลิตถังตวงโลหะคิดคำนวณทางคณิตศาสตร์จากขนาดมิติของคอถังตวงแล้วนำไปจัดทำแผ่นขีดขึ้นหมายมาตราโดยละเลยการบิดเบี้ยวของคอถังหลังงานเชื่อมโลหะ เป็นต้น ดังนั้นทุกครั้งที่ทำการสอบเทียบถังตวงโลหะขอแนะนำให้ตรวจสอบหาอัตราส่วนสเกลคอถังทุกครั้ง เพราะนั่นคือขีดความสามารถและความถูกต้องของถังตวงโลหะในการแสดงผลการวัดปริมาตรนั่นเอง

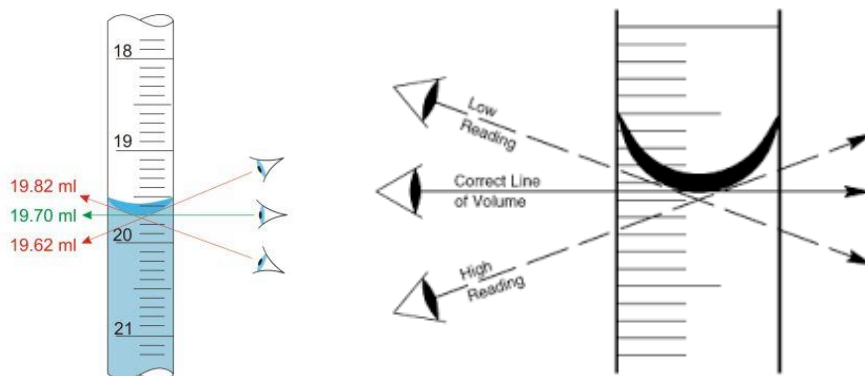
มีขั้นตอนปฏิบัติดังนี้

1) เติมน้ำลงถังตวงจนถึงระดับที่สามารถมองเห็นระดับน้ำใน sight glass จุดเริ่มแรกควรอยู่ตรงโคนคอถัง (เพื่อสามารถทำการวัดหาอัตราส่วนสเกลคอได้หลายครั้งและให้ผ่านระดับตำแหน่งระบุขีดกำลังของถังตวง)



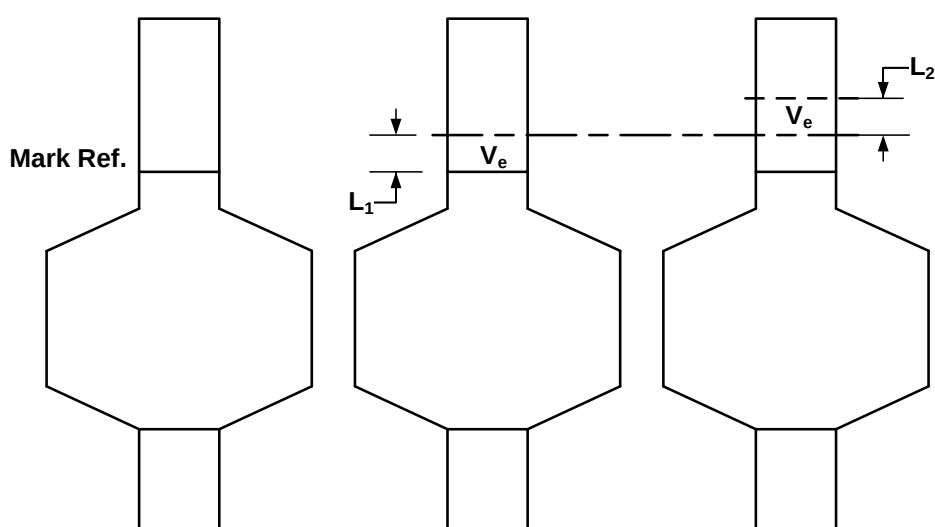
รูปที่ 6-29 การอ่านระดับน้ำและระยะที่วัดตรงใต้ท้องน้ำในหลอดวัดระดับ (sight Glass)

2) ทำการวัดระยะความสูงของระดับน้ำเทียบกับจุดอ้างอิง (เป็นตำแหน่งคงที่ตายตัวปรับแต่งไม่ได้) โดยอ่านและวัดระยะจากจุดอ้างอิงจนถึงระดับท้องน้ำ ดังรูปที่ 6-29 ที่สำคัญไม่บรรทัดหรือเครื่องวัดที่ใช้ควรได้รับการสอบเทียบและมีชั้นความเที่ยง Class 1, OIML R35 Material measures of length for general use. ยิงดี



รูปที่ 6-30 ความผิดพลาดจากการอ่านระดับของเหลวโดยระดับสายตาไม่ได้อยู่ในแนวเดียวกับระดับท้องน้ำ (Parallax Reading)

3) ใส่ ปริมาตรคงที่ V_e พร้อมวัดระยะความสูงที่เพิ่มขึ้นจากจุดอ้างอิงในแต่ละครั้ง ให้ทำประมาณ 3-5 ครั้งหรือมากกว่า เพื่อสามารถไล่ระดับสูงขึ้นไปผ่านจุดพิกัดกำลังของถังดวงแล้วให้เลยจุดขึ้นไประยะหนึ่ง ปกติแล้วกำหนดให้ปริมาตรคงที่ V_e มีค่ามากพอที่จะทำการวัดได้สะดวก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของคอลัมน์ เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ดวงโลหะประมาณ 9-12 เซนติเมตร อาจจะใช้ $V_e = 250$ มิลลิลิตร หรือถังดวงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ประมาณ 15-30 เซนติเมตร อาจจะใช้ $V_e = 500$ มิลลิลิตร เป็นต้น ทั้งก่อนทำการวัดค่าความสูงอาจใช้เทคนิคลูกยางเป่าลมด้วยมือ สอดตัวลูกยางเป่าลมเข้าไปในหลอดแก้ววัดระดับจากนั้นบีบลูกยางเป่าลมเข้าไปเพื่อให้ระดับน้ำบริเวณภายในหลอดแก้วและคอลัมน์ดวงกระเพื่อมขึ้นลงเล็กน้อยเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีฟองอากาศตลอดจนไล่หยดน้ำที่ค้างบริเวณภายในหลอดแก้วและคอลัมน์ดวงลงมา



รูปที่ 6-31 การเติมปริมาตรคงที่พร้อมวัดระดับที่สูงขึ้นเพื่อหาอัตราส่วนสเกล

4) นำค่าความสูงที่วัดได้มาคำนวณหาอัตราส่วนสเกลคอดังตามสมการข้างล่าง

ครั้งที่

1.)	V_e	ความสูงเพิ่ม	L_1	ชม.
2.)	$V_e + V_e$	ความสูงเพิ่ม	$L_1 + L_2$	ชม.
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
n.)	$V_e + \dots + V_e$	ความสูงเพิ่ม	$L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n$	ชม.
	$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{n \text{ ครั้ง}}$			

$\therefore$ ค่าอัตราส่วนสเกลคอ $L_v = \frac{n \times V_e}{(L_1 + L_2 + \dots + L_n)}$ ลิตร/ชม. (Eq.6-65)

ค่า V_e นั้นไม่จำเป็นต้องปรับแก้ไขค่าปริมาตรที่อุณหภูมิขณะทดสอบไปยังสภาวะอ้างอิงเนื่องจาก ปริมาตร V_e เป็นปริมาตรที่น้อยมาก การปรับค่าปริมาตรไปที่อุณหภูมิอ้างอิงไม่ทำให้ผลของการวัดระยะเปลี่ยนไป ตัวอย่างเช่น ใช้กระบอกแก้วตวงพิกัด 250 มิลลิลิตรมีอุณหภูมิอ้างอิง 20 °C ใช้ตวงน้ำซึ่งมีอุณหภูมิ 27 °C เพื่อหาอัตราส่วนสเกลคอของถังตวง ปริมาตรน้ำในกระบอกตวงที่ขีดสเกล 250 มิลลิลิตรที่ 27 °C จะมีปริมาตรเท่ากับ

$$V_p = V_{0p} \times C_{tsP}$$

$$V_{27} = V_{20} \times (1 + 0.00001(27 - 20))$$

$$V_{27} = 250 \times (1 + 0.00001(27 - 20))$$

$$V_{27} = 250.0175 \quad \text{มิลลิลิตร}$$

ซึ่งเมื่อเทน้ำนี้ลงไปในถังตวงเพื่อวัดความสูงบริเวณคอถังตวง ความสูงจะเพิ่มจากระดับเดิม 4.54 เซนติเมตรและเมื่อถังตวงสแตนเลสมีอุณหภูมิอ้างอิง 30 °C สมมุติว่ามีอัตราส่วนสเกลคอ 0.055 ลิตร/ชม ดังนั้น ปริมาตรของน้ำที่เทลงเมื่อปรับเป็นปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิงของถังตวงจะมีปริมาตรเท่ากับ

$$V_{30} = \frac{V_{27}}{1 + 0.0000477(27 - 30)}$$

$$V_{30} = \frac{250.0175}{1 + 0.0000477(27 - 30)}$$

$$V_{30} = 250.05 \quad \text{มิลลิลิตร}$$

ขณะที่เทปริมาตร 250.0175 มิลลิลิตร วัดความสูงได้ 4.54 เซนติเมตรเมื่อปรับเป็นปริมาตรไปที่อุณหภูมิอ้างอิง 30 °C จะมีปริมาตร 250.05 มิลลิลิตร จะมีความสูงเปลี่ยนไปเป็น

$$4.54 - \left(\frac{250.0175 - 250.05}{55} \right) = 4.54059 \quad \text{เซนติเมตร}$$

ซึ่งจะเห็นว่าความสูงเปลี่ยนไปเพียง 0.00059 เซนติเมตร ซึ่งไม่สามารถวัดได้โดยการใช้ไม้บรรทัด จึงเห็นได้ว่าไม่มีความจำเป็นที่จะต้องทำการปรับปริมาตร V_e ที่เติมไปในแต่ละครั้งเพื่อหาอัตราส่วนของคอถังตวงโลหะแต่อย่างไร

การหาขีดชั้นหมายมาตราที่พิกัดความจุ (Nominal Capacity) ของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ ณ สภาวะอ้างอิง

การสอบเทียบเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะโดยวิธีการตวงเปรียบเทียบนั้นพบว่าค่าปริมาตรที่ได้ในเครื่องตวงเป็นปริมาตร ณ อุณหภูมิที่วัดได้จริง จะถูกปรับแก้ไขค่าปริมาตรไปยังปริมาตร ณ อุณหภูมิอ้างอิง (V_{OP}) แต่โดยปกติแล้ว V_{OP} จะไม่มีค่าเท่ากับปริมาตรพิกัดความจุ (Nominal Capacity) ของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ ณ สภาวะอ้างอิง (V_{CAP}) ดังนั้นเราต้องปรับค่าปริมาตรไปยังปริมาตรที่พิกัดกำลังความจุ ณ สภาวะอ้างอิง คือ V_{CAP} เพื่อใช้ในการระบุพิกัดกำลังความจุและระบุตำแหน่งขีดชั้นหมายมาตราที่พิกัดความจุของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบก่อนนำไปใช้งานจริง

การคำนวณหาตำแหน่งขีดชั้นหมายมาตราที่แสดงพิกัดความจุของถังตวงโลหะ มีวิธีการคือ

- 1) เมื่อสิ้นสุดการถ่ายน้ำจากเครื่องตวงแบบมาตราจนได้ปริมาตรตามพิกัดกำลังของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ ให้วัดระยะความสูงจากจุดอ้างอิง (เป็นตำแหน่งคงที่ตายตัวปรับแต่งไม่ได้) ไประดับที่แสดงปริมาตรขณะนั้น สมมติให้เท่ากับ h_1 ซม. ปริมาตรดังกล่าวจะถูกปรับแก้ไขค่าเป็นปริมาตรที่สภาวะอ้างอิงของเครื่องตวงมีค่าเท่ากับ V_{OP1} นั่นคือความสัมพันธ์ที่ปริมาตรถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ V_{OP1} ลิตร ได้ค่าความสูงเท่ากับ h_1 ซม.
- 2) คำนวณหาตำแหน่งความสูงของขีดชั้นหมายมาตราพิกัดความจุของเครื่องตวง (Nominal Capacity) ณ สภาวะอ้างอิง (V_{CAP}) โดยนำอัตราส่วนสเกลคอดึงซึ่งคำนวณได้ก่อนหน้านี้ คำนวณหาความสูงขีดชั้นหมายมาตราสำหรับแสดงค่าปริมาตรพิกัดความจุของเครื่องตวงที่ทำการสอบเทียบ ณ สภาวะอ้างอิง (h_{01}) เทียบบัญญัติไตรยางศ์

เมื่ออัตราส่วนสเกลคอดึง L_V ลิตร 1 ซม.

ถ้าปริมาตรเท่ากับ $\Delta V_1 = V_{OP1} - V_{CAP}$ ลิตร $\frac{V_{OP1} - V_{CAP}}{L_V}$ ซม.

ดังนั้น ความสูงขีดชั้นหมายมาตราที่พิกัดความจุของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ ณ สภาวะอ้างอิง (h_{01}) ในการสอบเทียบครั้งที่ 1 มีค่าเท่ากับ

$$h_{01} = h_1 - \left(\frac{V_{OP1} - V_{CAP}}{L_V} \right) \quad \text{ซม.} \quad (\text{Eq.6-66})$$

- 3) เมื่อทำการสอบเทียบเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะ จำนวนไม่น้อยกว่า 4 ครั้ง ให้นำค่า h_0 ที่ได้จากการคำนวณหาแต่ละครั้งของการสอบเทียบมาหาค่าเฉลี่ย เป็นความสูงขีดชั้นหมายมาตราที่พิกัดความจุ (Nominal Capacity) ของเครื่องตวงที่สภาวะอ้างอิง (h_{0AVG})

$$h_{0AVG} = \frac{h_{01} + h_{02} + \dots + h_{0n}}{n} \quad \text{ซม.} \quad (\text{Eq.6-67})$$

การคำนวณหาความสามารถทำซ้ำได้ (Repeatability)

ค่าความสามารถทำซ้ำได้ของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบต้องมีความสามารถในการแสดงค่าซ้ำได้ไม่เกิน 0.05 % คัดจากผลต่างปริมาตรสูงสุดกับปริมาตรต่ำสุดที่คำนวณได้ที่สภาวะอ้างอิงเทียบกับปริมาตรพิกัดกำลังของเครื่องตวงที่สภาวะอ้างอิง

ในการสอบเทียบแต่ละครั้ง เมื่อคำนวณหาค่าความสูงวัดระยะจากจุดอ้างอิงไปที่ระดับความสูงแสดงปริมาตรพิกัดกำลังของเครื่องตวงที่สภาวะอ้างอิงในแต่ละครั้งเท่ากับ

ครั้งที่	1	ขีดพิกัดความจุมีความสูง	h_{01}
	2	"	h_{02}
	⋮	⋮	⋮
	n	"	h_{0n}

ให้ปริมาตรภายในเครื่องตวงตั้งแต่ล่างสุดจนถึงระดับจุดอ้างอิงมีค่าปริมาตรเท่ากับ V_{0B} ดังนั้นปริมาตรพิกัดกำลังเครื่องตวงที่สภาวะอ้างอิงในการสอบเทียบแต่ละครั้งจะมีค่าเท่ากับ

$$V_{0CAB1} = (h_{01} \times L_V) + V_{0B}$$

$$V_{0CAB2} = (h_{02} \times L_V) + V_{0B}$$

⋮

$$V_{0CABn} = (h_{0n} \times L_V) + V_{0B}$$

เมื่อกำหนดให้ค่าความสามารถทำซ้ำได้ของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบต้องไม่เกิน 0.05 %

$$\text{Repeatability} = \frac{(V_0)_{\max} - (V_0)_{\min}}{V_{0CAB}} \times 100 \quad (\text{Eq.6-68})$$

$$= \frac{(h_{0\max} \times L_V + V_{0B}) - (h_{0\min} \times L_V + V_{0B})}{V_{0CAB}} \times 100$$

$$= \frac{h_{0\max} - h_{0\min}}{\left(\frac{V_{0CAB}}{L_V} \right)} \times 100 \quad (\text{Eq.6-69})$$

$$\text{Repeatability} = \frac{h_{0\max} - h_{0\min}}{\left(\frac{V_{0CAB}}{L_V} \right)} \times 100 \leq 0.05\% \quad (\text{Eq.6-70})$$

เมื่อ $h_{0\max}$ = ค่าความสูงที่สูงสุดวัดระยะจากจุดอ้างอิงถึงระดับแสดงปริมาตรพิกัดกำลังของเครื่องตวงที่สภาวะอ้างอิง ในหลายรอบสอบเทียบ, ซม.

$h_{0\min}$ = ค่าความสูงที่ต่ำสุดวัดระยะจากจุดอ้างอิงถึงระดับแสดงปริมาตรพิกัดกำลังของเครื่องตวงที่สภาวะอ้างอิง ในหลายรอบสอบเทียบ, ซม.

V_{0CAB} = ปริมาตรพิกัดกำลังของเครื่องตวงที่สภาวะอ้างอิง, ลิตร

V_{0B} = ปริมาตรของเครื่องตวงถึงระดับอ้างอิงที่สภาวะอ้างอิง, ลิตร

L_V = อัตราส่วนสเกลคอดึง, ลิตร/ซม.

การคำนวณเลขและการปัดค่า

ในการคำนวณหาค่าปริมาตรที่สภาวะอ้างอิงของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ ต้องทำการคำนวณตัวแปรแก้ไขค่าทั้งหมดเสียก่อน (correction factors และ intermediate calculation) โดยเริ่มจากลำดับความสำคัญจาก คูณ,หาร จากนั้นให้ทำการปัดค่าศนิยมให้เหลือ 6 ตำแหน่ง (6 decimal places) ในส่วนของปริมาตรที่ต้องการทำการปรับค่าไปยังปริมาตรอ้างอิงให้ปัดค่าให้เหลือเลขนัยสำคัญ 5 ตำแหน่ง (5 Significant digits) และหลังจากนำปริมาตรดังกล่าวไปคูณกับตัวแปรแก้ไขปรับค่าเป็นที่เรียบร้อยแล้วต้องทำการปัดค่าให้เหลือเลขนัยสำคัญ 5 ตำแหน่ง (5 Significant digits)

ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดกำลังของเครื่องตวงแบบมาตรากับพิกัดกำลังเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ต้องการสอบเทียบ

ในขั้นตอนเตรียมการเมื่อต้องการสอบเทียบถังตวงโลหะ มักมีคำถามหนึ่งที่เกิดขึ้นบ่อยครั้ง นั่นคือเราจะใช้เครื่องตวงแบบมาตราหรือถังตวงแบบมาตราพิกัดกำลังเท่าไรเพื่อใช้สอบเทียบถังตวงหนึ่งเพื่อให้แน่ใจว่าผลการสอบเทียบถังตวงนั้นยังคงมีค่าที่น่าไว้วางใจได้ เราจึงมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาดังนี้ ให้พิจารณาเลือกพิกัดกำลังถังตวงแบบมาตราให้สอดคล้องและเหมาะสมกับพิกัดกำลังเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ต้องการสอบเทียบ โดยให้ “พิกัดกำลังเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ต้องการสอบเทียบไม่ควรมากกว่าพิกัดกำลังถังตวงแบบมาตรา 5 เท่า”

พิกัดกำลัง เครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะ (ลิตร)	พิกัดกำลัง ถังตวงแบบมาตรา (ลิตร)
50	10, 50
100	50, 100
200	50, 100, 200
500	100, 500
1,000	200, 500, 1,000
2,000	500, 1,000, 2,000
3,000	500, 1,000, 3,000
5,000	1,000, 5,000

ตารางที่ 6-9 ความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดกำลังถังตวงแบบมาตรากับถังตวงที่ต้องการสอบเทียบ

ในกรณีที่จำเป็นจริงๆ ที่ไม่สามารถหาถังตวงแบบมาตราที่มีพิกัดกำลังสูงเพียงพอเพื่อสอบเทียบเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะไม่เกิน 5 ครั้ง ต่อรอบการสอบเทียบ เราอาจยอมรับได้ถึง 10 ครั้งต่อรอบการสอบเทียบ เช่นใช้ถังตวงแบบมาตราพิกัดกำลัง 500 ลิตรสอบเทียบเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะพิกัดกำลัง 5,000 ลิตร ซึ่งพอยอมรับได้ แต่ต้องแลกมาซึ่งค่าความไม่แน่นอนสูงและผลผิดที่อาจเพิ่มขึ้นมาจากปัจจัยอื่นๆ และทุกฝ่ายผู้มีส่วนได้เสียรวมทั้งผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องสัดส่วนต้องยอมรับผลการสอบเทียบ (หากไม่มีผลต่องานซึ่งตวงวัดในเชิงกฎหมาย) และนี่คือเหตุผลที่ต้องกำหนดพิกัดกำลังถังตวงอยู่ในรูปของค่า 1×10^k , 2×10^k หรือ 5×10^k ลิตร โดยที่ k เป็นเลขจำนวนเต็มบวก จำนวนเต็มลบ หรือศูนย์

ตัวอย่างการคำนวณผลสอบเทียบ 1

สอบเทียบเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะพิกัดกำลัง 5 ลิตรด้วยเครื่องตวงแบบมาตราพิกัดกำลัง 5 ลิตร

		เครื่องตวงแบบมาตรา	ถังตวงโลหะ
แบบ		คอน้ำล้น	คอมิซีตขึ้นหมายมาตรา
หมายเลขประจำเครื่อง		702-0741-56	702-0770-57
พิกัดกำลัง	(ลิตร)	5	5
ประเภทการใช้งาน(สำหรับจ่าย, สำหรับรับ)		สำหรับจ่าย	-
วัสดุ (Mild Steel หรือ Stainless Steel)		Stainless Steel 316	Stainless Steel 304
สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามปริมาตร	(/ °C)	0.00004770	0.00005180
อุณหภูมิอ้างอิง	(°C)	30	30
เส้นผ่าศูนย์กลางคอถัง	(ซม.)	-	-
อัตราส่วนสเกลคอ	(ลิตร/ซม)	-	0.021
ความสูงอ้างอิง	(ซม.)	-	-
ชั้นหมายมาตรา (d)	ml	-	5
ระยะเวลาการถ่ายเทน้ำ	(วินาที)	30	30
ปริมาตรจริง	(ลิตร)	5.00037	5
ค่า Uncertainty	(มิลลิลิตร)	0.33	-
ใบรายงานผลสอบเทียบ (เดิมถ้ามี)		1383(V)-57	-
ตรวจสอบครั้งสุดท้ายเมื่อ		10 ต.ค. 57	-
ซีลหมายเลข		ชตว 211	ชตว 211
ระยะเวลาที่ควรทำการสอบเทียบครั้งต่อไป	(ปี)	1	1

1. ดำเนินการสอบเทียบตามขั้นตอน ด้วยการตวงเปรียบเทียบ (“Volumetric Method” or “Comparative Method”) แบบ Filling Method
2. เนื่องจากเครื่องตวงแบบมาตรามีพิกัดกำลังเท่ากับ 5 ลิตร ใช้สอบเทียบเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะพิกัดกำลัง 5 ลิตร จึงเป็นการสอบเทียบในสัดส่วน 1 : 1 เนื่องจากมีพิกัดกำลังเครื่องตวงเท่ากัน

ผลการ สอบเทียบ	อุณหภูมิที่วัดได้ @ แบบมาตรา (T _{obsM}) (°C)					อุณหภูมิที่วัดได้ @ ถังที่ ตรวจสอบ (T _{obsP}) (°C)	ส่วนสูงที่วัดจาก จุดอ้างอิงถึงระดับน้ำ
	1	2	3	4	5	(°C)	(ซม)
ครั้งที่ 1	26.9					26.9	11.1
ครั้งที่ 2	26.9					26.9	11.1
ครั้งที่ 3	26.9					26.9	11.1
ครั้งที่ 4	26.9					26.9	11.1
ครั้งที่ 5							

3. ปริมาตรเครื่องตวงแบบมาตราจากใบรายงานผลการสอบเทียบด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก (Gravimetric Method) เท่ากับ 5.00037 ลิตรที่อุณหภูมิอ้างอิง 30 °C และความดันอ้างอิงเท่ากับความดันบรรยากาศ ในการสอบเทียบครั้งแรกต้องเติมน้ำสะอาดเข้าเครื่องตวงแบบมาตรา วัดอุณหภูมิน้ำภายในเครื่องตวงแบบมาตราและภายในเครื่องตวงที่ต้องการสอบเทียบ เท่ากับ 26.9 °C

ค่าปริมาตรของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่สอบเทียบ ณ สภาวะอ้างอิง 30 °C ความดันบรรยากาศ มีค่าเท่ากับ

$$V_{0P} = V_{0M} \times C_{tw} \times \frac{C_{tsM}}{C_{tsP}}$$

$$V_M = V_{0M} \times C_{tsM}$$

เมื่อ $C_{tsM} = 1 + \gamma_M(T_M - T_{0M})$

$$V_P = V_{0P} \times C_{tsP}$$

เมื่อ $C_{tsP} = 1 + \gamma_P(T_P - T_{0P})$

ตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาตรสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิกระทำต่อน้ำ เราเรียกว่า C_{tw} (the Correction Factor for the Effect of Temperature on Water) คือ

$$C_{tw} = \frac{\rho_{TM}}{\rho_{TP}}$$

ค่าความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิวัดได้ขณะทำการสอบเทียบในเครื่องตวงแบบมาตราเท่ากับ 26.9 °C หลังปรับแก้ไขค่าจากใบรายงานผลสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิยังคงมีค่าเท่ากับ 26.9 °C ส่วนในเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะเท่ากับ 26.9 °C หลังแก้ไขค่าเช่นเดียวกันยังคงมีค่าเท่ากับ 26.9 °C เช่นกัน ในที่นี้เราแทนค่า

$$\rho_w = \frac{\sum_{n=0}^5 a_n \times t_w^n}{1 + b t_w}$$

เราก็จะได้ค่า C_{tw}

$$C_{tw} = \frac{0.996538}{0.996538} = 1$$

$$V_{0P} = V_{0M} \times C_{tw} \times \frac{C_{tsM}}{C_{tsP}}$$

$$V_{0P} = 5.00037 \times \frac{0.999852}{0.999840} = 5.00043 \quad \text{ลิตร}$$

หมายเหตุ อุณหภูมิของน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางสอบเทียบ ภายในเครื่องตวงแบบมาตรา และ/หรือ ภายในเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะต้องไม่แตกต่างกันเกินกว่า 2 °C ในระหว่างทำการสอบเทียบจนกว่าแล้วเสร็จในแต่ละรอบการสอบเทียบ

4. วัดระยะจากจุดอ้างอิงซึ่งเป็นตำแหน่งคงที่ตายตัวปรับแต่งไม่ได้ไปที่ระดับแสดงปริมาตรขณะนั้น ซึ่งปริมาตรดังกล่าวจะถูกปรับแก้ไขค่าเป็นปริมาตรที่สภาวะอ้างอิงหรือมาตรฐาน (Standard Conditions) ของเครื่องตวงมีค่าเท่ากับ $V_{0P} = 5.00043$ ลิตร ให้เป็นระยะความสูง $h = 11.1$ ซม.

5. หาเสถียรของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบด้วยการเติมน้ำลงไปเพิ่มครั้ง ละ 25 ml วัดความสูงเพิ่มขึ้น 1.2 ซม. ทำซ้ำกันจำนวน 4 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย $L_V = 0.021$ ลิตร/ซม.
6. หาขีดสเกลที่พิกัดความจุ (Nominal Capacity) ของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ เท่ากับ 5 ลิตร ที่สภาวะอ้างอิง คือ

$$h_0 = h - \left(\frac{V_{OP} - V_{CAP}}{L_V} \right) \quad \text{ซม.}$$

$$h_{01} = 11.1 - \left(\frac{5.00043 - 5}{0.021} \right) = 11.0795 \cong 11.1 \quad \text{ซม.}$$

7. สำหรับการสอบเทียบรอบที่ 2 3 และ 4 ให้ดำเนินการคำนวณซ้ำข้อ 1 ถึงข้อ 6
8. ให้นำค่า h_0 ที่ได้จากการคำนวณหาแต่ละรอบการสอบเทียบมาหาค่าเฉลี่ย เป็นขีดสเกลที่พิกัดความจุ (Nominal Capacity) ของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ เท่ากับ 5 ลิตร ที่สภาวะอ้างอิง

$$h_{0AVG} = \frac{h_{01} + h_{02} + \dots + h_{0n}}{n} \quad \text{ซม.}$$

$$h_{0AVG} = \frac{11.1 + 11.1 + 11.1 + 11.1}{4} = 11.1 \quad \text{ซม.}$$

9. คำนวณค่า Repeatability .ในการสอบเทียบทั้ง 4 ครั้ง

$$\text{Repeatability} = \frac{h_{0\max} - h_{0\min}}{\left(\frac{V_{0CAB}}{L_V} \right)} \times 100 \leq 0.05\%$$

$$\text{Repeatability} = \frac{11.1 - 11.1}{\left(\frac{5}{0.021} \right)} \times 100 = 0.00\% \leq 0.05\%$$

10. คำนวณผลอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาด เครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ปริมาตร 5 ลิตร มีอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดเท่ากับ $\pm 1/2000$ ของพิกัดกำลังเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะแบบคอมมีขีดชั้นหมายความว่าเท่ากับ 2.5 ml
11. คำนวณหาค่าความไม่แน่นอน สามารถศึกษาได้ใน โปรแกรมคำนวณ Excel **ขตว 106 ถังตวงโลหะแบบคอมมีขีดชั้นหมายความว่า (5 - 50 ลิตร) & เครื่องตวงแบบมาตรา.xlsx** ใน sheet **ขตว 106 Uncer-56**

ในการสอบเทียบทั้ง 4 รอบ คำนวณได้ค่า Uncertainty เท่ากับ 1.277, 1.278, 1.278 และ 1.278 ml ดังนั้นเราเฉลี่ยหาค่าได้เท่ากับ 1.278 ml จึงรายงานผลเท่ากับ 1.3 มิลลิลิตร

$$\text{Uncertainty} = 1.278 \text{ ml (mm}^3\text{)} < 1.3 \text{ ml} \quad \text{ผ่าน}$$

ANS

ตัวอย่างส่วนผสม (ลิตร/ชม) ถึงที่ตรวจสอบ						เติมน้ำ				
	เติมครั้งแรก	1	2	3	4	5				
V_e (ลิตร)	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025					
L_n (ชม.)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2					

$L_v = n \times V_e / (L_1 + L_2 + ... + L_n)$

ความสูงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่กัลจากค่าเฉลี่ยข้าง **ก่อนสอบเทียบ (cm)**

1	2	3	4
0.00	0.00	0.00	0.00

หมายเหตุ

$h_0 =$

0 ชม.

0.021

$L_y =$

0.021

ลิตร/ชม.

703-0031-55

15

0.10

0.005

131.5862

เลขที่ใบรายงาน

คำ Uncertainty (cm.)

อ่านได้ละเอียด (cm.)

พิกัดกำลัง (cm.)

บรรทัดโลหะแบบมาตรา

ความขึ้นสัมผัส (Max/Mir

อุณหภูมิห้อง (Max/Min)

เวลา

11.40

24.7

61.4

58.7 (%)

24.6 (°C)

11.45

เสร็จสิ้นสอบเทียบ

รายงานคำนวณการตรวจสอบเครื่องตวงโดยวิธีตวงเปรียบเทียบ												
สำนักงานกลางชั่งตวงวัด												
วันที่ 14 ตุลาคม 2557					เจ้าของเครื่อง บริษัท ศุภภัณฑ์และบุตร จำกัด					รอบที่ 1		
แบบมาตรฐานหมายเลข 702-0741-56					ถังตวงที่ตรวจสอบหมายเลข 702-0770-57							
ขนาดความจุ 5 ลิตร					ขนาดความจุ 5 ลิตร							
อุณหภูมิอ้างอิง 30 ซ.					อุณหภูมิอ้างอิง 30 ซ.							
วัสดุ Stainless Steel 316					วัสดุ Stainless Steel 304							
สปส.การขยายตัว 0.0000477 /°ซ.					สปส.การขยายตัว 0.0000518 /°ซ.							
					อัตราส่วนเกลคคอดัง 0.021 ลิตร/ซม.							
แบบมาตรา					ถังตวงที่ตรวจสอบ							
ครั้งที่	V _{0M} (ลิตร)	TM (ซ.)	D _{TM} (กรัม/ลิตร)	C _{tsM}	T _p (ซ.)	D _{TP} (กรัม/ลิตร)	C _{tw} (4)/(7)	C _{tsP}	CCF (5)(8)/(9)	V _{0p} (2)(10)	h (ซม.)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
1	5.00	26.90	0.996538	0.999852	26.90	0.996538	1.000000	0.999840	1.000012	5.000	11.10	
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
ด้วยความสูงจากจุดอ้างอิงที่วัดได้					11.10 ซม.		คิดเป็น V _{0p} ปริมาตรที่สภาวะอ้างอิง			5.000 ลิตร		
ตรวจสอบรอบที่ 1 ปรับปริมาตรของถังตวงที่ตรวจสอบเป็นความจุ					5.000 ลิตร ที่ระยะความสูงจากจุดอ้างอิง					11.10 ซม.		

รอบที่ 2											
แบบมาตรา					ถังตวงที่ตรวจสอบ						
ครั้งที่	V _{0M} (ลิตร)	TM (ซ.)	DTM (กรัม/ลิตร)	C _{tsM}	Tp (ซ.)	D _{TP} (กรัม/ลิตร)	C _{tw} (4)/(7)	C _{tsP}	CCF (5)(8)/(9)	V _{0P} (2)(10)	h (ซม.)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1	5.00	26.90	0.996538	0.999852	26.90	0.996538	1.000000	0.999840	1.000012	5.000	11.10
2											
3											
4											
5											
ด้วยความสูงจากจุดอ้างอิงที่วัดได้					11.10 ซม.	คิดเป็น V _{0P} ปริมาตรที่สภาวะอ้างอิง				5.000	ลิตร
ตรวจสอบรอบที่ 2 ปรับปริมาตรของถังตวงที่ตรวจสอบเป็นความจุ					5.000	ลิตร ที่ระยะความสูงจากจุดอ้างอิง				11.10	ซม.

รอบที่ 3											
แบบมาตรฐาน					ถังตวงที่ตรวจสอบ						
ครั้งที่	V _{DM} (ลิตร)	TM (°C)	DTM (กรัม/ลิตร)	C _{ISM}	T _p (°C)	D _{Tp} (กรัม/ลิตร)	C _{tw} (4)/(7)	C _{isp}	CCF (5)(8)/(9)	V _{op} (2)(10)	h (ชม.)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1	5.00	26.90	0.996538	0.999852	26.90	0.996538	1.000000	0.999840	1.000012	5.000	11.10
2											
3											
4											
5											
ด้วยความสูงจากจุดอ้างอิงที่วัดได้					11.10 ซม.	คิดเป็น V _{op} ปริมาตรที่สภาวะอ้างอิง				5.000	ลิตร
ตรวจสอบรอบที่ 3 ปรับปริมาตรของถังตวงที่สภาวะอ้างอิงเป็นความ					5.000	ลิตร ที่ระยะความสูงจากจุดอ้างอิง				11.10	ชม.

รอบที่ 4											
แบบมาตรฐาน					ถังตวงที่ตรวจสอบ						
ครั้งที่	V _{DM} (ลิตร)	TM (°C)	DTM (กรัม/ลิตร)	C _{ISM}	T _p (°C)	D _{Tp} (กรัม/ลิตร)	C _{tw} (4)/(7)	C _{isp}	CCF (5)(8)/(9)	V _{op} (2)(10)	h (ชม.)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1	5.00	26.90	0.996538	0.999852	26.90	0.996538	1.000000	0.999840	1.000012	5.000	11.10
2											
3											
4											
5											
ด้วยความสูงจากจุดอ้างอิงที่วัดได้					11.10 ซม.	คิดเป็น V _{op} ปริมาตรที่สภาวะอ้างอิง				5.000	ลิตร
ตรวจสอบรอบที่ 4 ปรับปริมาตรของถังตวงที่สภาวะอ้างอิงเป็นความ					5.000	ลิตร ที่ระยะความสูงจากจุดอ้างอิง				11.10	ชม.

ผลการ สอบเทียบ ครั้งที่	ปริมาตรถังตวงที่สอบเทียบ ก่อนปรับ ระดับ (ลิตร)	ปริมาตรถังตวงที่สอบเทียบ ที่สภาวะอ้างอิง 30 °C และความดันบรรยากาศ (ลิตร)	ความสูงจากจุดอ้างอิง (เซนติเมตร)
1	5.000	5.00	11.100
2	5.000	5.00	11.100
3	5.000	5.00	11.100
4	5.000	5.00	11.100
5			
Standard deviation 0			
ปริมาตรเฉลี่ย		5.00	11.10
Repeatability =		0.000 %	0.05%
Uncertainty =		1 mL	

ตารางที่ 6-11 ตารางผลการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณผลสอบเทียบ 2

สอบเทียบถังตวงขนาด 250 ลิตร ด้วยถังตวงแบบมาตรา (Measure) ขนาด 50 ลิตร

สอบเทียบถังตวง (Prover) ขนาด 250 ลิตร มีอุณหภูมิอ้างอิง 15 °C โดยใช้ถังตวงแบบมาตรา (Measure) ขนาด 50 ลิตร อุณหภูมิอ้างอิง 30 °C

ข้อมูลของถังตวงแบบมาตรา (M)

1. ปริมาตรจริง 49.963 ลิตร
2. วัสดุ Stainless Steel
3. สัมประสิทธิ์การขยายตัว 0.0000477 / °C
4. อุณหภูมิอ้างอิง 15 °C

ข้อมูลของถังตวงสอบเทียบ (P)

1. ขนาดความจุ 250 ลิตร
2. วัสดุ Stainless Steel
3. สัมประสิทธิ์การขยายตัว 0.0000477 / °C
4. อัตราส่วนสเกลคองถึง 0.083 ลิตร/ชม.
5. อุณหภูมิอ้างอิง 30 °C

สารตัวกลางสอบเทียบ

น้ำบริสุทธิ์

รอบที่ 1 เติมน้ำลงแบบมาตราแล้วถ่ายลงถังสอบเทียบ 5 เทียว วัดอุณหภูมิน้ำที่ถังแบบมาตราก่อนที่จะปล่อยน้ำลงถังตวงสอบเทียบก่อนทุกครั้ง เมื่อถ่ายน้ำลงมาจนเต็มถังตวงที่จะตรวจสอบแล้วจึงวัดอุณหภูมิที่ถังตรวจสอบ

ขั้นตอนการคำนวณ

ครั้งที่ 1 เมื่อถ่ายน้ำจากถังตวงแบบมาตราลงถังตวงสอบเทียบครั้งที่ 1

อ่านอุณหภูมิน้ำที่ถังตวงแบบมาตราได้ (T_M) 30.00 °C

อ่านอุณหภูมิน้ำที่ถังตวงที่ทำการสอบเทียบได้ (T_P) 30.10 °C

$$V_{0P} = V_{0M} \times C_{tw} \frac{C_{tsM}}{C_{tsP}}$$

หาค่า C_{tsM} เมื่ออุณหภูมิอ้างอิงของถังตวงแบบมาตรา เท่ากับ 15 °C

$$\begin{aligned} C_{tsM} &= 1 + \gamma_M (T_P - 15) \\ &= 1 + 0.0000477(30.0 - 15.0) \\ &= 1.000716 \end{aligned}$$

ค่า C_{tsP} เมื่ออุณหภูมิอ้างอิงของถังตวงที่ทำการสอบเทียบ เท่ากับ 30 °C

$$\begin{aligned} C_{tsP} &= 1 + \gamma_P (T_P - 30) \\ &= 1 + 0.0000477(30.1 - 30) \\ &= 1.000005 \end{aligned}$$

เปิดตารางหาค่าความหนาแน่นของน้ำที่ 30.00 °C และ 30.10 °C

ρ_M ที่ 30.00 °C $\rho_M = 0.995645$ กรัมต่อลิตร

ρ_P ที่ 30.10 °C $\rho_P = 0.995615$ กรัมต่อลิตร

ดังนั้น

$$C_{tw} = \frac{0.995645}{0.995615} \\ = 1.000030$$

แทนค่าในสมการหาค่า V_{OP}

$$V_{OP} = V_{OM} \times C_{tw} \frac{C_{tsM}}{C_{tsP}} \\ = 49.963 \times 1.00003 \times \frac{1.000716}{1.000005} \quad \text{ลิตร} \\ = 50.00002 \\ = 50.00$$

ครั้งที่ 1 ปริมาตร $V_{OP} = 50.000$ ลิตรที่อุณหภูมิอ้างอิง 30 °C

ครั้งที่ 2 และ 3 อ่านอุณหภูมิน้ำที่แบบมาตราและอ่านอุณหภูมิน้ำที่ถังสอบเทียบได้เท่ากับ**ครั้งที่ 1** คือ

$$T_M = 30.00 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_P = 30.10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

ดังนั้นปริมาตร V_{OP} ครั้งที่ 2 = 50.000 ลิตรที่อุณหภูมิอ้างอิง 30 °C

ครั้งที่ 3 = 50.000 ลิตรที่อุณหภูมิอ้างอิง 30 °C

ครั้งที่ 4 และ 5 $T_M = 30.10 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$T_P = 30.10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

ความหนาแน่นน้ำไม่เปลี่ยนเพราะอุณหภูมิเท่าเดิมจึงไม่ต้องนำมาพิจารณา ($C_{tw}=1$)

พิจารณาค่า C_{tsM} , C_{tsP} ซึ่งจะไม่เท่ากันเนื่องจากอุณหภูมิอ้างอิงของถังไม่เท่ากัน

$$C_{tsM} = 1 + \gamma_M (T_P - 15) \\ = 1 + 0.0000477 (30.1 - 15) \\ = 1.000720$$

$$C_{tsP} = 1 + \gamma_P (T_P - 30) \\ = 1 + 0.0000477 (30.1 - 30) \\ = 1.000005$$

ปริมาตรของเที่ยวที่ 4 และ 5

$$V_{OP} = 49.963 \times \frac{1.000720}{1.000005} \\ = 49.963 \times 1.000715 \\ = 49.998 \quad \text{ลิตร}$$

ดังนั้นปริมาตร V_{OP} ครั้งที่ 4 = 49.999 ลิตรที่อุณหภูมิอ้างอิง 30 °C

ครั้งที่ 5 = 49.999 ลิตรที่อุณหภูมิอ้างอิง 30 °C

ดังนั้นปริมาตรน้ำในถังตรวจสอบเทียบ

$$V_{OP} = 50.000 + 50.000 + 50.000 + 49.999 + 49.999 \\ = 249.998 \quad \text{ลิตรที่อุณหภูมิอ้างอิง 30 }^{\circ}\text{C}$$

หาสเกลที่พิกัดความจุถัง (nominal capacity)

วัดระดับความสูงของระดับน้ำในหลอดแก้วจากจุดอ้างอิงสำหรับรอบการสอบเทียบ รอบที่ 1 ได้มีค่าเท่ากับ **28.10 ซม.**

ดังนั้น ขีดสเกลที่ความจุ (Nominal Capacity) ของ ถังตวง 250 ลิตร

$$h_o = 28.10 - \left(\frac{249.998 - 250}{0.083} \right) \\ = 28.12 \quad \text{ซม.}$$

ความสูงเฉลี่ยจากการสอบเทียบ 3 รอบ

หลังจากดำเนินการสอบเทียบ 5 ครั้งใน 1 รอบ ครบ 3 รอบ ดำเนินการคำนวณซ้ำเหมือนเดิมแต่ข้อมูลแตกต่างกัน สรุปได้ว่า

รอบที่ 1	คำนวณหาความสูงได้	28.12 ซม.
รอบที่ 2	"	28.04 ซม.
รอบที่ 3	"	27.97 ซม.

ความสูงเฉลี่ย (h_{0avg}) คือ **28.04 ซม.**

ดังนั้นถังตวงที่นำมาสอบเทียบนี้มีปริมาตร 250 ลิตรที่ระยะความสูงจากจุดอ้างอิงเท่ากับ **28.04 เซนติเมตร**

หาค่าความสามารถทำซ้ำได้ (Repeatability)

$$\text{Repeatability} = \frac{28.12 - 27.97}{\left(\frac{250}{0.083} \right)} \times 100 \\ = 0.005 \%$$

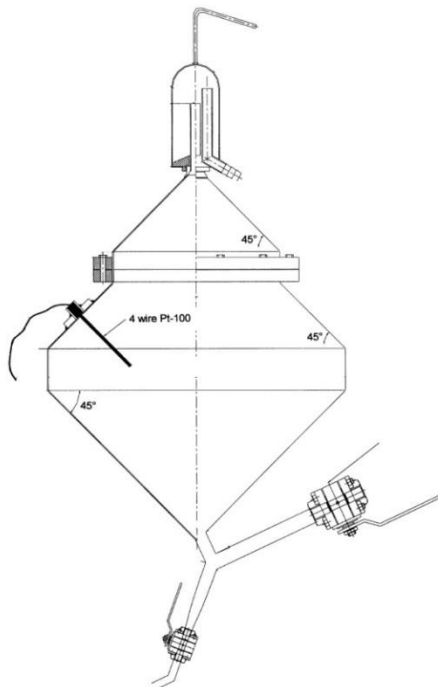
ค่า Repeatability การสอบเทียบมีค่าเท่ากับ **0.005 %** น้อยกว่า 0.05% ถือว่าผ่านเกณฑ์

ANS

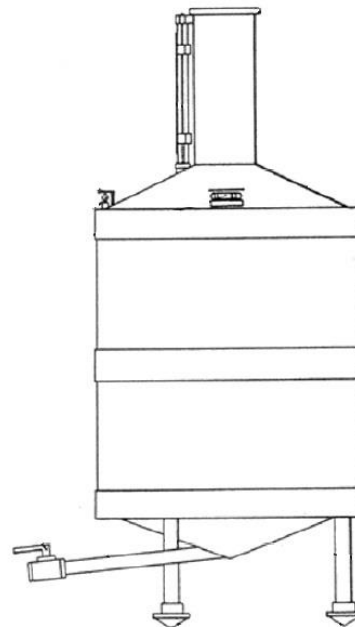
การสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก (Gravimetric Method)

การสอบเทียบด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก (Gravimetric Method) นอกจากมีข้อจำกัดในเรื่องพิกัดกำลังของเครื่องชั่งและค่าความถูกต้องของเครื่องชั่งแล้ว ยังคงต้องพิจารณาตามลักษณะของเครื่องตวงอีกด้วย ซึ่งพอจะแยกแยะได้เป็น 2 กรณีหลัก คือ

กรณีที่ 1 เครื่องตวงแบบมาตราแบบคอมมีซีตขึ้นหามาตรา เราสามารถสอบเทียบด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักโดยตรง (Gravimetric Method: Proving Tank) นั่นคือ สามารถยกเครื่องตวงไปวางและยกออกจากเครื่องชั่งได้โดยตรงเช่นเดียวกับการเครื่องตวงขนาดเล็กซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 5 แต่ต้องแน่ใจว่าไม่มีส่วนใดภายนอกเครื่องตวงขึ้นส่วนใดกักเก็บน้ำไว้อย่างเด็ดขาด ถ้าหากไม่แน่ใจให้ใช้วิธีการชั่งน้ำหนักทางอ้อม (Gravimetric Method: Transfer Tank) นั่นคือต้องหาภาชนะรองรับน้ำจากเครื่องตวงที่ต้องการสอบเทียบเพื่อนำไปชั่งน้ำหนักได้



เครื่องตวงชนิดค่อน้ำล้น (Weir Type)



เครื่องตวงชนิดคอมมีซีตขึ้นหามาตรา

รูปที่ 6-32 เครื่องตวงแบบมาตราแบ่งตามชนิดคอ

กรณีที่ 2 เครื่องตวงแบบมาตราแบบค่อน้ำล้น บริเวณคอส่วนที่เป็นน้ำล้นและอุปกรณ์ที่ประกอบรวมอยู่พบว่าเมื่อน้ำล้นออกจากเครื่องตวงแบบมาตราแล้วยังคงมีน้ำบางส่วนค้างหลงเหลืออยู่และไม่สามารถระบายน้ำออกไปจากเครื่องตวงแบบมาตราได้ อีกทั้งปริมาณน้ำที่ค้างอยู่บริเวณดังกล่าวมีปริมาณไม่คงที่ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการชั่งน้ำหนักโดยทางอ้อมวิธีการเดียวเท่านั้น จนกว่าผลงานการสร้างเครื่องตวงแบบมาตราแบบค่อน้ำล้นได้รับการออกแบบและผลิตแล้วสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ นั่นคือไม่มีน้ำค้างหลงเหลือบริเวณค่อน้ำล้นทุกครั้ง

เครื่องตวงแบบมาตราแบบ	วิธีการสอบเทียบ
1. คอมมิชิตชั้นหมายมาตรา	ทางตรง/ทางอ้อม
2. คอน้ำล้น	ทางอ้อม

ตารางที่ 6-12 พิกัดความจุของเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะ

การเลือกเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์

เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมในการใช้งานสอบเทียบ ควรพิจารณาดังนี้

1. ต้องมีพิกัดกำลังสูงเพียงพอในการรองรับน้ำหนักที่ทำการชั่งทุกขั้นตอน
2. มีชั้นหมายมาตรา (resolution) อ่านได้ละเอียดเพียงพอและต้องมีย่านความไม่แน่นอน (uncertainty) ที่ยอมรับได้ในการสอบเทียบ ($1/3 \text{ MPE}$) พิจารณาเครื่องชั่ง (analytical or precision balance) ที่ใช้ในการสอบเทียบควรมีค่าชั้นหมายมาตราตรวจรับรอง (e) เท่ากับ

$$e \leq (2-5) \times 10^{-3} \times \text{MPE} \times W \quad \text{g} \quad (\text{Eq.6-71})$$

เมื่อ W = น้ำหนักของปริมาตรทดสอบ (g)

MPE = อัตราเพื่อเหลือเผื่อขาดของปริมาตรที่ต้องการทดสอบ (%)

หรืออย่างน้อยที่สุดเครื่องชั่งไฟฟ้าก็ควร

$$\text{ชั้นหมายมาตรา (d)} \leq 1/3 * \text{MPE. ของปริมาตรที่ต้องการทดสอบ} \quad (\text{Eq.6-72})$$

และด้วยข้อจำกัดของเครื่องชั่งที่นำมาใช้นี้เอง ดังนั้นการสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักในปัจจุบันจึงไม่สามารถทำการสอบเทียบได้ที่พิกัดกำลังสูงกว่า 150 ลิตร

ขั้นตอนการสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก

เนื่องจากขั้นตอนการสอบเทียบมีรายละเอียดมากไม่สามารถบรรจุไว้ในหนังสือเล่มนี้ได้ ซึ่งครอบคลุมถึง สภาวะแวดล้อม ชีตความสามารถของแบบมาตราและเครื่องมืออุปกรณ์ การคำนวณผล เกณฑ์การตัดสินใจ การรายงานผลการสอบเทียบ เป็นต้น ดังนั้นจึงขอให้ไปอ่านขั้นตอนปฏิบัติการสอบเทียบโดยสำนักงานกลางชั่งตวงวัด SOP-VOL-105 ขั้นตอนการปฏิบัติงานสอบเทียบเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะ (5-100 ล.) แบบคอมมิชิตชั้นหมายมาตรา & แบบคอน้ำล้นด้วยการชั่งน้ำหนัก (Gravity Method)

การคำนวณผลการสอบเทียบเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะแบบคอมมิชิตชั้นหมายมาตรา (Narrow Neck Scale) & แบบคอน้ำล้น (Weir Type)

ขั้นตอนการคำนวณ พบว่าสภาวะแวดล้อมห้องปฏิบัติการถือเป็นปัจจัยที่สำคัญในการปฏิบัติงานและคำนวณผลสอบเทียบและประเมินค่าความไม่แน่นอน จึงให้ข้อมูลการปฏิบัติงาน ณ ปัจจุบัน ของสำนักงานกลางชั่งตวงวัดดังนี้

สภาวะแวดล้อมห้องปฏิบัติการการปรับอากาศภายในห้องปฏิบัติการเป็นระบบปรับอากาศแบบ Precision Air Condition System

- สภาวะอุณหภูมิ $(25 \pm 3) ^\circ\text{C}$ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุด $3 ^\circ\text{C} / \text{hr}$.
- ความชื้นสัมพัทธ์ $(50 \pm 15)\%$ อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด $15 \% / 4 \text{ hr}$.
- ความดันบรรยากาศ $(1010 \pm 20) \text{ hPa}$ ($1 \text{ mBar} = 1 \text{ hPa}$)
- อุณหภูมิของน้ำกลั่นตัวกลางสอบเทียบ $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน $0.1 ^\circ\text{C}$ ตลอดช่วงการสอบเทียบ

การคำนวณปริมาตรที่สภาวะขณะทำการสอบเทียบแต่ละครั้งของการสอบเทียบเราใช้สมการเดียวกับการสอบเทียบเครื่องตวงขนาดเล็กด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก (ด้วยเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์) จึงมีค่าเท่ากับ

$$V_{\text{wt}} = (O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \quad (\text{Eq.6-73})$$

เมื่อ กรณีสอบเทียบแบบ “รับ” / “to contain” / “In” ($O_1 - O_2 - O_3 - O_4$)

กรณีสอบเทียบแบบ “จ่าย” / “to deliver” / “Ex” ($O_1 - O_2 - O_4 - O_3$)

O_1 = เครื่องชั่งแสดงค่าน้ำหนักศูนย์ (Set Zero), kg (g)

O_2 = เครื่องชั่งแสดงค่าน้ำหนักตุ้มแบบมาตรา (มากกว่า o_4 เล็กน้อย), kg (g)

O_3 = เครื่องชั่งแสดงค่าน้ำหนักถังตวงเปล่าหรือหลังถ่ายน้ำ, kg (g)

แบบรับ : เครื่องตวงแห้งสนิทซึ่งหลายครั้ง แล้วเฉลี่ยหาค่าน้ำหนัก

แบบจ่าย : ถ่ายน้ำออกจากเครื่องตวงตามเวลา drain time ไปชั่งน้ำหนัก

O_4 = เครื่องชั่งแสดงค่าน้ำหนักถังตวง + น้ำ, kg (g)

$\frac{M_s}{O_2 - O_1}$ = เป็นค่าแก้ไขการแสดงผลเครื่องชั่งเนื่องจากค่าความหนาแน่นของตุ้มน้ำหนัก

ที่อาจแตกต่างจากค่าความหนาแน่นของตุ้มน้ำหนักอ้างอิงของผู้ผลิตเครื่อง

ชั่ง (the apparent mass conversion factor) จาก ASTM E542-01

(Reapproved 2012) เรียกเทอมนี้ว่า “the apparent mass

conversion factor” ซึ่งจะมีค่าไม่เท่ากับ 1.0000 สำหรับเครื่องชั่งแบบมี

ส่วนรับน้ำหนักเพียง 1 ส่วน (single-pan) ของเครื่องแสดงค่าอัตโนมัติ

ด้วยเหตุนี้

$$\frac{M_s}{O_2 - O_1} \leq 1.00013 \quad (\text{Eq.6-74})$$

แต่โดยทั่วไปอาจให้มีค่าเท่ากับ 1.00000 ก็ได้

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำขณะชั่ง, kg/m^3 (g/cm^3)

ρ_s = ความหนาแน่นของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน, kg/m^3 (g/cm^3)

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศขณะชั่ง, Kg/m^3 (g/cm^3)

เมื่อทราบค่า ตัวแปรต่างๆ ในสมการของการหาค่าปริมาตรที่สภาวะขณะทำการสอบเทียบแต่ละครั้งของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะแบบคอมมีซีตั้นหมายมาตรา (Narrow Neck Scale) & แบบค่อน้ำล้น (Weir Type) ในสมการข้างบนแล้ว จะได้ค่า V_{wt} ซึ่งเป็นค่าปริมาตรน้ำที่อุณหภูมิขณะซึ่งบรรจุอยู่ในเครื่องตวง ดังนั้นจำเป็นต้องทำการปรับค่าปริมาตร V_{wt} ไปยังค่าปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง V_0 ด้วยการปรับค่าปริมาตรที่คำนวณได้ด้วยตัวแปรแก้ไขค่าปริมาตร C_{ts} อันเนื่องมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อเครื่องตวงดังนั้นจะได้ปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิงและความดันอ้างอิง (ความดันบรรยากาศ) เท่ากับ

$$V_0 = \frac{V_{wt}}{C_{ts}} \quad (\text{Eq.6-75})$$

เมื่อ $C_{ts} = 1 + \gamma(t_w - t_0)$

C_{ts} = ตัวแปรแก้ไขปรับค่าปริมาตรสำหรับอิทธิพลของอุณหภูมิกระทำต่อเครื่องตวง
(the correction factor for the effect of temperature on steel)

γ = ค่าการขยายตัวตามปริมาตรลูกบาศก์ของเครื่องตวง ; $^{\circ}\text{C}$ (ตารางที่ 6-8)

t = อุณหภูมิของเหลวขณะซึ่ง, $^{\circ}\text{C}$

t_0 = อุณหภูมิอ้างอิงของเครื่องตวง (15, 20 หรือ 30), $^{\circ}\text{C}$

ดังนั้น

$$V_0 = \frac{V_{wt}}{[1 + \gamma(t_w - t_0)]} \cong V_{wt} \times [1 - \gamma(t_w - t_0)] \quad (\text{Eq.6-76})$$

ในการสอบเทียบเครื่องตวงจำเป็นต้องทำการสอบเทียบหาค่า V_{wt} เป็นจำนวนหลายครั้ง ยิ่งทำการสอบเทียบจำนวนครั้งยิ่งมากความแม่นยำถูกต้องยิ่งน่าเชื่อถือมาก ดังนั้นเมื่อหาค่าปริมาตรที่คำนวณได้ในแต่ละครั้งให้นำค่าดังกล่าวมาหาค่าเฉลี่ย $\bar{V}_{wt}$ ก่อนนำไปปรับค่าเป็นปริมาตรที่สภาวะอ้างอิง หรือหากอุณหภูมิของน้ำที่ทำการซึ่งมีการเปลี่ยนแปลง ก็สามารถทำการปรับค่าปริมาตรที่ซึ่งน้ำหนักได้ไปยังปริมาตรอ้างอิงแต่ละครั้ง จากนั้นนำค่าปริมาตรอ้างอิงของแต่ละครั้งมาเฉลี่ยหาค่าเป็นปริมาตรอ้างอิงเฉลี่ยของการสอบเทียบ

ในกรณีเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะแบบค่อน้ำล้น (Weir Type) หลังจากคำนวณหาปริมาตรอ้างอิงของแต่ละครั้งมาเฉลี่ยหาค่าเป็นปริมาตรอ้างอิงเฉลี่ยของการสอบเทียบ ก็ถือว่าเป็นอันสิ้นสุด

ในกรณีเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะแบบคอมมีซีตั้นหมายมาตรา (Narrow Neck Scale) เนื่องจากการสอบเทียบเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะแบบคอมมีซีตั้นหมายมาตรา พบว่าค่าปริมาตรที่ได้จะเป็นค่าปริมาตรที่ความจุต่างๆ ซึ่งเราต้องการจะทำชั้นหมายมาตราที่พิกัดความจุ (Nominal Capacity) ดังนั้นต้อง

- ทำการหาอัตราส่วนสเกลคอดัง
- ทำการหาความสูงของตำแหน่งพิกัดความจุของเครื่องตวงที่ปริมาตรอ้างอิงในแต่ละครั้งของการสอบเทียบ จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยเป็นค่าความสูงของซีตั้นพิกัดกำลังความจุของเครื่องตวงที่ปริมาตรอ้างอิง โดยใช้ค่าอัตราส่วนสเกลคอดัง ประกอบการคำนวณ การหาซีตั้นสเกลแสดงค่าปริมาตรที่พิกัดความจุของเครื่องตวง (Nominal Capacity) ที่สภาวะอ้างอิง

การคำนวณหาความไม่แน่นอนของผลการวัดค่าในการสอบเทียบ (standard uncertainty) โดยยึดเอาสมการการหาค่าปริมาตรอ้างอิงของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะแบบคอมมีซีดชั้นหมายมาตรา (Narrow Neck Scale) & แบบค่อน้ำล้น (Weir Type) ในการสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก (Gravimetric Method) ในที่นี้สมมติให้อุณหภูมิอ้างอิงเท่ากับ 20 °C

$$V_0 = (O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \times (1 - \gamma(t_w - 20)) \quad (\text{Eq.6-77})$$

ดังนั้นความไม่แน่นอนจากสมการการหาค่าปริมาตรของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะแบบคอมมีซีดชั้นหมายมาตรา (Narrow Neck Scale) & แบบค่อน้ำล้น (Weir Type) จึงมีค่าเท่ากับ

$$u_c = \sqrt{c_s^2 \cdot u_s^2 + c_{ps}^2 \cdot u_{ps}^2 + c_{pw}^2 \cdot u_{pw}^2 + c_{pa}^2 \cdot u_{pa}^2 + c_{tw}^2 \cdot u_{tw}^2 + c_\gamma^2 \cdot u_\gamma^2 + c_\sigma^2 \cdot u_\sigma^2 + c_{ba}^2 \cdot u_{ba}^2 + c_{s\text{Drift}}^2 \cdot u_{s\text{Drift}}^2 + c_{L\text{L}}^2 \cdot u_{L\text{L}}^2} \quad (\text{Eq.6-78})$$

ในการรายงานผลการสอบเทียบเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะ มีค่าปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง ด้วยค่าความไม่แน่นอน ด้วยระดับความมั่นใจ 95% (k=2)

$$V_0 \pm 2u_c \text{ ลิตร} \quad (\text{Eq.6-79})$$

พิจารณารายละเอียดดังต่อไปนี้

$$V_0 = (O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \times (1 - \gamma(t_w - 20))$$

$$\rho_w = \frac{\sum_{n=0}^5 a_n \times t_w^n}{1 + b t_w}$$

$$\rho_a = \frac{0.34848 \times p - 0.009024 \times h_r \times e^{(0.0612t)}}{273.15 + t}$$

การประเมินความไม่แน่นอนจากสมการการหาค่าปริมาตรของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะแบบคอมมีซีดชั้นหมายมาตรา (Narrow Neck Scale) & แบบค่อน้ำล้น (Weir Type) คำนึงสาเหตุหลัก 12 สาเหตุหลัก โดยสาเหตุที่ 1 ถึง 9 จะกระทำเช่นเดียวกับในบทที่ 5 ส่วนในสาเหตุที่ 10 -12 พิจารณาได้ว่า

1. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากตม้น้ำหนักแบบมาตรา (Standard uncertainty of the standard mass (g)); u_s
2. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าความหนาแน่นของตม้น้ำหนักแบบมาตรา (Standard uncertainty of density of the standard mass (g cm⁻³)); u_{ps}
3. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการหาค่าความหนาแน่นของน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางในการสอบเทียบ โดยสมการของ H. Wagenbreth และ W. Blanke, PTB (Standard uncertainty of density of the water (g cm⁻³)); u_{pw}
4. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการหาค่าความหนาแน่นของอากาศภายในห้องปฏิบัติการ (Standard uncertainty of density of the air (g cm⁻³)); u_{pa}

5. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการวัดอุณหภูมิของน้ำในการสอบเทียบ (Standard uncertainty of temperature of the water ($^{\circ}\text{C}$)) ; u_{tw}

6. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลือกใช้ค่าการขยายตัวตามปริมาตรลูกบาศก์ของเครื่องตวง (Standard uncertainty of coefficient of cubical thermal expansion of the material of the measure ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)) ; u_{γ}

7. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการหาค่าปริมาตรที่วัดได้จากขั้นตอนการสอบเทียบในแต่ละครั้ง (Standard uncertainty from the measurement (cm^3)) ; u_{σ}

8. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากผลของเครื่องชั่ง, u_{ba} (Standard uncertainty of balance (cm^3))

9. ค่าความไม่แน่นอนสาเหตุเกิดจากการเลื่อนค่า (drift) ของตม้น้ำหนักแบบมาตรา ($u_{s \text{ Drift}}$) ประเมินตามมติคณะอนุกรรมการพิจารณารับรองห้องปฏิบัติการสอบเทียบทางกลและเคมี (มติการประชุมครั้งที่ 3-1/2547)

10. ค่าความไม่แน่นอนสาเหตุเกิดจากเครื่องวัดความยาวชนิดบรรทัดโลหะ ในการวัดความสูงของระดับท้องน้ำเทียบกับจุดอ้างอิง (Standard uncertainty of steel ruler); (u_L) ในกรณีเครื่องตวงแบบคอสเกล หรือ คอมีซีตชั้นหมายมาตรา โดยค่าความไม่แน่นอนนี้จะไม่นำมาคิดสำหรับเครื่องตวงแบบค่อน้ำล้น

- มี Sensitivity Coefficient

$$c_L = \frac{\partial V_{op}}{\partial L} = L_V \quad \text{cm}^3/\text{cm}. \quad (\text{Eq.6-80})$$

L_V อัตราส่วนสเกลคองถึง

- ประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการวัดความสูงของระดับท้องน้ำเทียบกับจุดอ้างอิง ด้วยเครื่องวัดความยาวชนิดบรรทัดโลหะ

$$u_{L'} = \sqrt{u_{L_1}^2 + u_{L_2}^2} \quad \text{cm}. \quad (\text{Eq.6-81})$$

ประเมินอิทธิพลที่มีผลต่อการวัดความสูงของระดับท้องน้ำเทียบกับจุดอ้างอิงในการสอบเทียบ ด้วยกัน 2 สาเหตุ

- 10.1. ค่าความไม่แน่นอนเครื่องวัดความยาวชนิดบรรทัดโลหะจากใบรายงานผลการสอบเทียบ

$$u_{L_1} = \frac{U_{L_s}}{k} \quad \text{cm}. \quad (\text{Eq.6-82})$$

- 10.2. ค่าความไม่แน่นอนของการอ่านค่าบนเครื่องวัดความยาว (Resolution $\pm d_{L_s}$) รูปแบบการกระจายของค่าความไม่แน่นอน Triangular distribution, type B บรรทัดโลหะ อ่านได้ละเอียด 0.1 cm

$$u_{L_2} = \frac{d_{L_s}}{2\sqrt{6}} \quad (\text{Eq.6-83})$$

$$u_{L_2} = \frac{d_{L_s}}{2\sqrt{6}} = \frac{0.1}{2\sqrt{6}} = 0.02041 \quad \text{cm}.$$

- มี Probability Distribution เป็นลักษณะ Normal

11. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการจับเวลา Drain Time ในทางปฏิบัติและได้ศึกษาข้อมูลความคลาดเคลื่อนของระยะเวลา 3 วินาที พบว่าระยะเวลาคลาดเคลื่อนไปเนื่องจากการจับเวลา Drain Time ไม่มีต่อผลการสอบเทียบ จึงประเมินให้ค่าความไม่แน่นอนของการจับเวลาของนาฬิกา Drain Time เท่ากับศูนย์

12. ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการระเหยของของเหลวตัวกลางสอบเทียบ (น้ำสะอาด) พิจารณาค่า Standard Uncertainty ความไม่แน่นอนเนื่องจากการระเหยของของเหลวตัวกลางสอบเทียบมีค่าน้อยมาก จึงให้มีค่าเท่ากับ ศูนย์

การคำนวณหาความสามารถทำซ้ำได้ (Repeatability) พิจารณาออกไปเป็น 2 กรณีด้วยกันคือ ค่าความสามารถทำซ้ำได้ (Repeatability) ของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะแบบมาตราต้องมีความสามารถในการแสดงค่าซ้ำได้ไม่เกิน 0.02 %

$$\text{Repeatability} \leq 0.02 \% \quad (\text{Eq.6-84})$$

1. เครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะแบบคอมีขีดขึ้นหมายมาตรา (Narrow Neck Scale) ค่าความสามารถทำซ้ำได้ (Repeatability) คัดจาก

$$\begin{aligned} \text{Repeatability} &= \frac{(V_{0\text{CAP}})_{\max} - (V_{0\text{CAP}})_{\min}}{V_{\text{CAP}}} \times 100 \\ &= \frac{[(h_{0\max} \times L_v) + V_{0B}] - [(h_{0\min} \times L_v) + V_{0B}]}{V_{\text{CAP}}} \times 100 \\ &= \frac{h_{0\max} - h_{0\min}}{(\frac{V_{\text{CAP}}}{L_v})} \times 100 \end{aligned} \quad (\text{Eq.6-85})$$

เมื่อ V_{0B} เป็นปริมาตรที่สภาวะอ้างอิงภายในเครื่องตวงที่ระดับจุดวัดระดับอ้างอิง

ดังนั้นในการสอบเทียบในแต่ละครั้ง จากการทดสอบหาพิสัยความจุของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะเมื่อปรับค่าปริมาตรไปยังอุณหภูมิอ้างอิงและความดันบรรยากาศ จำนวน n ครั้ง จะได้ระดับค่าความสูงที่แตกต่างกัน

ครั้งที่	1	ขีดพิสัยความจุ	h_{01}
ครั้งที่	2	"	h_{02}
	⋮	⋮	⋮
ครั้งที่	n	"	h_{0n}

ให้นำค่าดังกล่าวไปหาความสามารถทำซ้ำได้ (Repeatability) ของเครื่องตวงที่ปริมาตรพิสัยกำลังความจุ ณ สภาวะอ้างอิง (อุณหภูมิอ้างอิงและความดันบรรยากาศ)

2. เครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะ แบบค่อน้ำล้น (Weir Type) เนื่องจากเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะแบบค่อน้ำล้นประเภทนี้ไม่สามารถปรับสเกลค่าไปยังค่าพิสัยความจุได้ แต่เพียงปรับปริมาตรแทนที่ภายในเครื่องตวงได้ระดับหนึ่ง ดังนั้นในการหาความสามารถทำซ้ำได้จึงใช้ค่าปริมาตรพิสัยกำลังความจุเฉลี่ยที่สภาวะอ้างอิง

$$\text{Repeatability} = \frac{(V_0)_{\max} - (V_0)_{\min}}{(V_0)_{\text{Avg}}} \times 100 \quad (\text{Eq.6-86})$$

ตัวอย่างการรายงานผลการสอบเทียบ

ตัวอย่างการแสดงวิธีการคำนวณในที่นี้เป็นการสอบเทียบเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะแบบคอมิซิดซ์ขึ้นหมาย
มาตรา (Narrow Neck Scale)

- พิกัดกำลัง 60 ลิตร
- ทำด้วยวัสดุโลหะ Stainless Steel 316
- อุณหภูมิอ้างอิง 15 °C
- ลักษณะการใช้งาน แบบรับ
- Drain time 60 วินาที

1. ดำเนินการสอบเทียบตามขั้นตอน ลักษณะการใช้งานแบบรับ กดปุ่มตั้งศูนย์ (Zero) เครื่องชั่ง ทำการบันทึกค่าน้ำหนักที่อ่านได้ บันทึกเป็นค่า O_1 เท่ากับ 0

2. วางตุ้มน้ำหนักแบบมาตราลงบนส่วนรับน้ำหนักเครื่องชั่ง บันทึกเป็นค่า O_2 เท่ากับ 97998.0 กรัม โดยใช้ตุ้มน้ำหนักแบบมาตราทั้งหมด 8 ต้ม รวมกันแล้ว 98 กิโลกรัม นำค่าแก้ไขน้ำหนักตุ้มและ ค่าความไม่แน่นอนจากใบรายงานสอบเทียบตุ้มน้ำหนักแบบมาตรา สรุปแล้วได้เท่ากับ

— ค่าน้ำหนักตุ้ม	98,000 กรัม
— ค่าแก้ไขน้ำหนักตุ้ม	0.1115 มิลลิกรัม
— ค่าความไม่แน่นอนน้ำหนักตุ้มรวม	0.0983 มิลลิกรัม

3. เติมน้ำเข้าเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะจนถึงค่าพิกัดกำลัง บันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำภายในเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะ เท่ากับ 29.0 °C แต่ปรับแก้ไขค่าเครื่องวัดอุณหภูมิ RTD หมายเลข 7-9695 จะได้ค่าอุณหภูมิเท่ากับ 29.0 °C ซึ่งเราจะใช้ค่านี้ในการคำนวณ

4. กดปุ่มตั้งศูนย์ (Zero) เครื่องชั่ง ให้อ่านภาชนะรองรับน้ำจากเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะเปล่าลงบนเครื่องชั่ง ทำการบันทึกค่าน้ำหนักภาชนะเปล่าที่อ่านได้ บันทึกเป็นค่า O_3 เท่ากับ 38,223 กรัม

5. ถ่ายน้ำจากเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะไปยังภาชนะรองรับน้ำซึ่งอยู่บนเครื่องชั่ง พร้อมจับเวลาระยะเวลาในการถ่ายน้ำ ทำการบันทึกค่าน้ำหนักที่อ่านได้ บันทึกเป็นค่า O_4 เท่ากับ 97,958 กรัม

6. บันทึกเวลา อุณหภูมิเฉลี่ย 25.9 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 51.5 % และความกดดันอากาศเฉลี่ย 1001.5 hPa เมื่อเริ่มและเสร็จสิ้นการสอบเทียบ

7. คำนวณหาค่าปริมาตรเครื่องตวง ที่อุณหภูมิอ้างอิง

7.1. น้ำหนักที่ชั่งได้

$$O_4 - O_3 = 59735 \quad \text{กรัม}$$

$$O_2 - O_1 = 97998 \quad \text{กรัม}$$

7.2. ข้อมูลตุ้มน้ำหนักแบบมาตรา

$$M_s = 98000.112 \quad \text{กรัม}$$

$$\rho_s = 7.95 \quad \text{กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

7.3. คำนวณหาค่าความหนาแน่นอากาศ

$$\rho_a = \frac{0.34848 \times p - 0.009024 \times h_r \times e^{(0.0612t)}}{273.15 + t}$$

$$\text{เมื่อ } t = 25.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$h_r = 51.5 \%$$

$$p = 1001.5 \text{ hPa}$$

$$\text{แทนค่า } \rho_a = \frac{0.34848 \times (1001.5) - 0.009024 \times (51.5) \times e^{(0.0612 \times 25.9)}}{273.15 + (25.9)} = 0.001159 \text{ g/cm}^3$$

7.4. คำนวณหาค่าความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิวัดได้ $t_w = 29.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\rho_w = \frac{\sum_{n=0}^5 a_n \times t_w^n}{1 + b t_w}$$

$$\rho_w = 0.995943 \text{ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

7.5. คำนวณหาค่าปริมาตรเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะ เมื่อใช้น้ำเป็นตัวกลางสอบเทียบที่อุณหภูมิวัดได้

$$V_{wt} = (O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right)$$

$$V_{wt} = (59735) \times \left(\frac{98000112}{97998} \right) \times \left(1 - \frac{0.001159}{7.95} \right) \times \left(\frac{1}{0.995943 - 0.001159} \right) = 6004075121 \text{ cm}^3$$

คำนวณหาค่าปริมาตรเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะ ที่อุณหภูมิอ้างอิง $t_0 = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$V_0 = \frac{(O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right)}{(1 + \gamma(t_w - 15))}$$

$$\cong (O_4 - O_3) \times \left(\frac{M_s}{O_2 - O_1} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_w - \rho_a} \right) \times (1 - \gamma(t_w - 15))$$

$$V_0 = \frac{(6004075121)}{(1 + 0.000047(29.0 - 15))} = 6000068275 \text{ cm}^3$$

8. หาค่าความสูงขีดขึ้นหมายมาตราที่พิกัดความจุของเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะที่ทำการสอบเทียบ 60 ลิตร ณ สภาวะอ้างอิง อุณหภูมิอ้างอิง $t_0 = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (h_0) มีค่าเท่ากับ

$$h_0 = h - \left(\frac{V_{0P} - V_{CAP}}{L_V} \right) = 24.1 - \left(\frac{600000.68275 - 60000}{41.67} \right) = 24.08 \text{ ซม.}$$

เมื่อทำการสอบเทียบเครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะ จำนวน 5 ครั้ง ก็ให้นำค่า h_0 ที่ได้จากการคำนวณหาแต่ละครั้งของการสอบเทียบมาหาค่าเฉลี่ย เป็นความสูงขีดขึ้นหมายมาตราที่พิกัดความจุ (Nominal Capacity) ของเครื่องตวงที่สภาวะอ้างอิง (h_{0AVG})

$$h_{0AVG} = \frac{h_{01} + h_{02} + \dots + h_{0n}}{n} = \frac{24.08 + 24.16 + 24.11 + 24.19 + 24.09}{5} = 24.1 \text{ ซม.}$$

9. คำนวณค่า Repeatability ในการสอบเทียบทั้ง 5 ครั้ง

$$\text{Repeatability} = \frac{h_{0\max} - h_{0\min}}{\left(\frac{V_{CAP}}{L_V} \right)} \times 100$$

$$\text{Repeatability} = \frac{60000.68275 - 59996.2064}{\left(\frac{60000}{41.67}\right)} \times 100 = 0.008\%$$

10. คำนวณผลอัตราเพื่อหล่อเพื่อขาด ที่กำหนดให้ $\pm 1/2000$ เท่าของพิกัดกำลังความจุเครื่องตวง

$$\text{MPE} = \pm \frac{60 \times 1000}{2000} = \pm 30.0 \text{ cm}^3$$

$$\text{MPE} = 60000 - 59998.91 = 1.09 \text{ cm}^3$$

ค่า MPE อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ แต่ให้ทำการปรับความสูงของแผ่นซีดชั้นหมายมาตราไปยังความสูงที่คำนวณได้ที่มีค่าเท่ากับพิกัดกำลัง 60 ลิตร

11. คำนวณหาค่าความไม่แน่นอน สามารถศึกษาได้ใน โปรแกรมคำนวณ Excel **ขตว 105 ถึงตวง (5-100 ล) คอซีดชั้นหมายมาตรา_คอน้ำล้น & GravMTD.xlsx** ใน sheet **ขตว 105 Uncer-56**

$$\text{Uncertainty} \leq \text{MPE}/3 = 10.0 \text{ cm}^3$$

$$\text{Uncertainty} = 6.7 \text{ cm}^3$$

ANS

พารามิเตอร์ (มิลลิกรัม/ซีซี) ถึงที่ตรวจสอบ		เริ่มที่				
	1	2	3	4	5	
เริ่มที่ครั้งที่					5	
V_c (มิลลิกรัม, CC)	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	
L_n (ซีซี)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	
$L_p = n \times V_c / (L_1 + L_2 + \dots + L_n)$						
					41.667 มล./ซีซี	

หาค่าเฉลี่ยจากทั้งสี่ครั้ง				
ครั้งที่	1	2	3	4
L_p (ซีซี)	24.0	24.0	24.0	24.0

*** ถังวัดน้ำเปลี่ยนค่า 0 cm ลงไป ***

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบพกพา			
Model	TP-7	Δ (°C)	0.1
Serial	7-9695	Uncertainty (°C)	0.091
Cert. No.	131749	Date	11-Jul-13 ช่วงการวัด 10-100 °C
เครื่องวัดอุณหภูมิแบบพกพา			
STD	Read	Max	Temperature Range
Min. Temp. Input	15.0031	15.0	Min. Temp. 28.8 °C
Max. Temp. Input	25.0026	25.0	Max. Temp. 29.0 °C
Min. Temp. Input	35.0040	35.0	
Max. Temp. Input	45.0033	45.0	
Min. Temp. Input	0.0000	0.0000	
Max. Temp. Input	0.0000	0.0000	

ตารางที่ 6-13 ตารางบันทึกผลการสอบเทียบ

เกณฑ์การตัดสินใจผลการตรวจสอบความเที่ยงการสอบเทียบเครื่องตวงแบบมาตราชนิดถังตวงทำด้วยโลหะ
โดยวิธีการชั่งน้ำหนัก (Gravimetric Method)

เครื่องตวงชนิดถังตวงโลหะแบบคอมีขีดขึ้นหมายมาตรา (Narrow Neck Scale) & แบบค่อน้ำล้น (Weir Type) ต้องมี

1. อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดไม่เกิน $\pm 1/2000$ ของพิกัดกำลัง
2. ความสามารถในการทำซ้ำได้ (Repeatability) ไม่เกิน 0.02%
3. ค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ไม่เกิน $1/3$ เท่าของอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาด
4. ค่าผลผิด (Error) คือผลต่างค่าปริมาณที่วัดได้เทียบกับค่าปริมาณของแบบมาตราไม่เกิน $2/3$ เท่าของอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดหรือหากค่าผลผิดมีค่าเกิน $2/3$ เท่าของอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาด
5. ผลรวมสัมบูรณ์ของค่าความไม่แน่นอนของการวัดและค่าผลผิด (Error) ต้องไม่เกินอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาด ตามที่กำหนดไว้ในกฎกระทรวงฯ พ.ศ. 2546

บทที่ 7

การสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวและมาตรวัดแบบมาตร ด้วยถึงตวงแบบมาตร (Flowmeter Calibration by Volumetric Method)

เนื่องจากมาตรวัดซื้อขายของเหลวปิโตรเลียมที่ใช้กันโดยทั่วไป เช่น สถานีจ่ายน้ำมันทางรถยนต์บรรทุก (Truck Loading) และมาตรวัดแบบมาตรซึ่งใช้งานอยู่นั้นต่างมีหลักการทำงานที่เหมือนกันเสียเป็นส่วนใหญ่ เพียงแต่ได้รับการออกแบบที่แตกต่างกันอยู่บ้างตามวัตถุประสงค์การใช้งาน และในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองยังดำเนินการที่คล้ายกัน เมื่อพิจารณาแล้วจึงขอรวบไว้เป็นเรื่องเดียวกันเสียเลย ในขณะเดียวกันก็จะได้อีกโอกาสเปรียบเทียบถึงความเหมือนและความต่างบางมุมมองควบคู่กันไปเพื่อเสริมเติมเต็มบางแง่มุมและการทำงานตามวัตถุประสงค์ของมาตรวัดนั้นๆ

ภายใต้งานซึ่งตวงวัดในเชิงกฎหมาย (Legal Metrology) เรามุ่งหวังให้ความสนใจถึงมาตรวัดที่ใช้เพื่อ วัดคุณสมบัติวัดปริมาตรของเหลวเพียงสถานะเดียว (single-phase liquid) เท่านั้น ซึ่งพอจัดกลุ่มของมาตรวัด ตามการใช้งานจริงในการวัดของเหลว, ก๊าซ, ไอน้ำ และของเหลวชั้น เช่น น้ำผสมปูน เป็นต้น ดังรูปที่ 7-1

LIQUID	GAS	STEAM	SLURRY
VARIABLE AREA	VARIABLE AREA	VARIABLE AREA	MAGNETIC
VARIABLE DIFFERENTIAL PRESSURE	VARIABLE DIFFERENTIAL PRESSURE		CORIOLIS
POSITIVE DISPLACEMENT	POSITIVE DISPLACEMENT	VARIABLE DIFFERENTIAL PRESSURE	ULTRASONIC (DOPPLER)
TURBINE	TURBINE	TURBINE	VARIABLE DIFFERENTIAL PRESSURE (ECCENTRIC, SEGMENTAL, VENTURI)
MAGNETIC	OSCILLATORY	OSCILLATORY	
ULTRASONIC	THERMAL		
THERMAL	CORIOLIS		
OSCILLATORY			
CORIOLIS			

รูปที่ 7-1 การแบ่งกลุ่มมาตรวัดตามลักษณะใช้งาน

ไม่ว่ามาตรวัดชนิดใดๆ ส่วนใหญ่พบว่าไม่สามารถทำการวัดปริมาตรของไหลชนิด 2 เฟส (two-phase fluid) เช่น วัดปริมาตรทั้งของเหลวและไอซึ่งผสมกันได้ด้วยความแม่นยำได้ (แต่วัดได้และเริ่มวัดได้แม่นยำ) ด้วยเหตุนี้เราจึงพิจารณากลุ่มมาตรวัดที่อยู่ในความสนใจดังต่อไปนี้ คือ

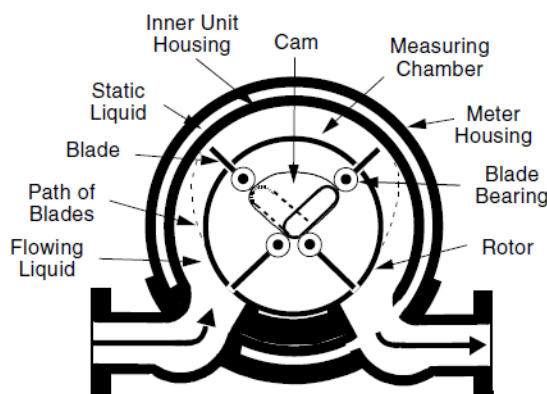
มาตรวัดปริมาตรของเหลว คือ เครื่องมือที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้วัดและส่งจ่ายของเหลวโดยปริมาตร และมีส่วนแสดงค่าเพื่อแสดงผลการวัด ได้แก่

- (ก) มาตรวัดปริมาตรน้ำมันหล่อลื่น คือ มาตรวัดที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้สำหรับการวัดและการส่งจ่ายน้ำมันหล่อลื่นเหลว รวมถึงผลิตภัณฑ์ใด ๆ ที่มีวัตถุประสงค์ในการใช้เพื่อการหล่อลื่น
 - (ข) มาตรวัดปริมาตรน้ำมันเชื้อเพลิง คือ มาตรวัดที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้สำหรับการวัดและการส่งจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง
 - (ค) มาตรวัดปริมาตรก๊าซปิโตรเลียมเหลว คือ มาตรวัดที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้สำหรับการวัดและการส่งจ่ายก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ติดตั้งอยู่กับที่หรือติดตั้งอยู่บนยานพาหนะ
 - (ง) มาตรวัดปริมาตรน้ำหวานที่ได้จากพืช คือ มาตรวัดที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้สำหรับการวัด และการส่งจ่ายน้ำหวานที่ได้จากพืช
 - (จ) มาตรวัดปริมาตรน้ำมันพืช คือ มาตรวัดที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้สำหรับการวัดและการส่งจ่ายน้ำมันพืช
 - (ฉ) มาตรวัดปริมาตรน้ำมัน คือ มาตรวัดที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้สำหรับการวัดและการส่งจ่ายน้ำมันมาตรวัดมวลโดยตรง คือ มาตรวัดที่ได้รับการออกแบบเพื่อหาค่ามวลของของเหลวหรือก๊าซที่มีสถานะเป็นไอที่ไหลผ่านมาตรวัดโดยตรง โดยไม่ต้องใช้เครื่องมืออุปกรณ์เสริมหรือข้อมูลบอกคุณสมบัติของของเหลวหรือก๊าซที่มีสถานะเป็นไอขณะทำการวัดจากแหล่งภายนอกระบบ
- มาตรวัดปริมาตรน้ำ คือ เครื่องมือที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้วัดและส่งจ่ายน้ำโดยปริมาตร และมีส่วนแสดงค่าเพื่อแสดงผลการวัด

จากนิยามดังกล่าวสามารถจัดกลุ่มมาตรวัดออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ที่ได้รับความเชื่อถือผลการวัด คือ

ก. มาตรวัดปริมาตรของเหลว PD (Positive Displacement Flow Meters)

1.) หลักการทำงานของมาตรวัดปริมาตรของเหลว PD เป็นมาตรวัดปริมาตรของเหลวซึ่งได้รับการออกแบบมาเพื่อวัดปริมาตรของเหลวโดยแบ่งของเหลวในระบบปิดออกเป็นส่วนๆ ที่มีค่าแน่นอนค่าหนึ่งแล้วทำการนับรวมกันเป็นปริมาณรวม ดังนั้นของเหลวเมื่อไหลเข้ามาตรวัดจะไหลผ่านเข้าไปยังส่วนวัดปริมาตรของเหลว (Measuring Element) ด้วยปริมาตรคงที่ค่าหนึ่งบวกกับปริมาณส่วนที่รั่วไหล (leakage or slip) อีกเล็กน้อยในแต่ละช่วงชักหรือรอบการหมุนของส่วนวัดปริมาตรของเหลว



รูปที่ 7-2 ส่วนประกอบของมาตรวัด PD

มีมาตรวัดปริมาตรของเหลวชนิด P.D. Meter จำนวนน้อยที่มีหลักการทำงานเป็นมาตรวัดแบบ Positive Displacement Meter จริงๆ นั่นคือเป็นมาตรวัดที่ประกอบด้วยซีลชนิด Positive Seal ซึ่งทำหน้าที่กัน

ของเหลวภายในมาตรวัดด้วยวัสดุซึ่งทำด้วยวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงจริงๆ ไม่ได้อาศัยปรากฏการณ์ใดๆช่วยในการซีล เช่น Capillary Seal แต่พบว่ามาตรวัดปริมาณของเหลวชนิด P.D. Meter ส่วนใหญ่จะมีระบบซีล เป็นแบบ Capillary Seal โดยมีหลักการทำงานอาศัยปรากฏการณ์ Capillary ด้วยทำการสร้างความตึงผิวหน้า (surface tension) ของแผ่นฟิล์มของเหลวซึ่งติดอยู่ระหว่างผิวหน้า 2 ชิ้นงานเพื่อป้องกันการไหลของเหลวออกจากห้องวัด ปริมาตรเมื่อทำการแบ่งแยกปริมาตรของเหลวเป็นค่าแน่นอนออกเป็นส่วนๆ เท่าๆกัน ตัวอย่างเช่น มาตรวัดชนิด Rotary Sliding Vane Meter แผ่นฟิล์มของเหลวซึ่งติดอยู่ระหว่างผิวหน้า 2 ชิ้นได้แก่ ช่องว่างระหว่างปลายแผ่นเวน (Vane Tips) กับตัวเรือนมาตรวัด (Meter Body) ทำหน้าที่ Seal (รูปที่ 7-2)

ในทางปฏิบัติ การทำงานของ capillary seal ก็ไม่สมบูรณ์ครบถ้วนทุกประการยังพบว่าประสิทธิภาพการทำงานจะสูงขึ้นเมื่อความหนืดของเหลวสูงและประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อความหนืดของเหลวต่ำ ด้วยเหตุนี้ มาตรวัดปริมาณของเหลวชนิด P.D. Meter จึงมีแนวโน้มที่จะทำงานได้ดีขึ้นเมื่อใช้กับการวัดของเหลวซึ่งมีความหนืดสูง

โครงสร้างของมาตรวัด

1.1.) ส่วนวัดปริมาตร (Measuring Element) นับว่าเป็นหัวใจของส่วนทำงานของมาตรวัด ส่วนวัดปริมาตรจะเคลื่อนที่ภายในห้องวัดทำหน้าที่แบ่งของเหลวออกเป็นส่วนๆด้วยความแม่นยำเมื่อของเหลวไหลผ่านมาตรวัด กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ “โรเตอร์”

1.2.) ห้องวัด (Measuring Chamber) ภายในห้องวัดนี้จะบรรจุด้วยส่วนวัดปริมาตรของเหลว (Measuring Elements) ของมาตรวัด สำหรับขนาดและวัสดุของห้องวัดที่ใช้กับของเหลวที่ต้องการวัดนั้น ของเหลวดังกล่าวต้องไม่มีผลกระทบทั้งโดยตรงและโดยอ้อมไม่ว่าจะเป็นเรื่องการกัดกร่อนหรือทำปฏิกิริยาใดๆ ในส่วนของความหนาของผนังห้องวัดต้องมีความหนาที่เพียงพอต่อการทนต่อความดันทำงาน (operating pressure) ขณะทำการวัด ในส่วนชนิดของห้องวัดสำหรับ PD Meter นั้นเท่าที่ทราบจะมีอยู่ 2 รูปแบบโดยทำหน้าที่ตามวัตถุประสงค์การออกแบบคือ ในกรณี

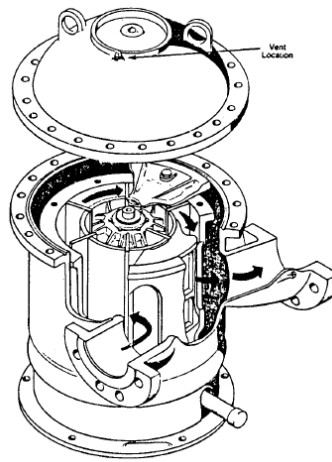
- มาตรวัดชนิดตัวเรือนชั้นเดียว (single case meters) ผนังที่ตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของตัวเรือนมาตรวัดทำหน้าที่เป็นผนังของส่วนวัดปริมาตร หรือตัวเรือนมาตรวัดทำหน้าที่เป็นห้องวัดไปในตัวนั่นเอง โดยปกติแล้วมาตรวัดชนิดตัวเรือนชั้นเดียวจะมีขนาดไม่เกิน 6 นิ้ว

- มาตรวัดชนิดตัวเรือน 2 ชั้น (Double Case Meters) จากรูปที่ 7-3 จะแยกห้องวัด ล้อมรอบส่วนวัดปริมาตรออกอย่างอิสระสมบูรณ์ โดยมีตัวเรือนมาตรวัดทำหน้าที่กับการเชื่อมต่อระบบท่อภายนอกโดยตรง เพื่อวัตถุประสงค์หลัก 2 อย่างด้วยกันคือ

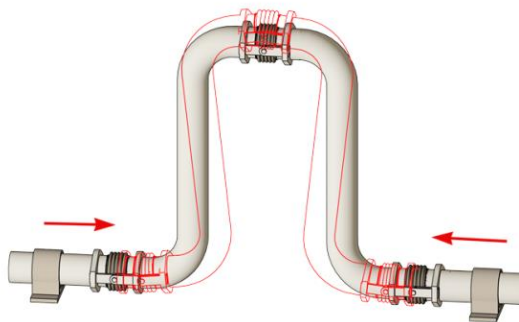
- สมดุลของความดัน (Pressure Balance) เมื่อความดันกระทำต่อผนังของห้องวัดเกิดสมดุล การบิดเบี้ยวซึ่งเกิดจากความดัน (pressure-generated distortion) ของชิ้นส่วนภายในห้องวัดมีน้อยมาก ผลกระทบต่อช่องว่างวิกฤต (critical clearance) ภายในมาตรวัด ซึ่งมีผลต่อความแม่นยำการวัดของมาตรวัดจึงแทบไม่มี

- การลดความเค้น (Stress Absorption) ในระบบท่อส่งจ่ายของเหลวจะมีความเค้น (stress) ซึ่งเกิดจากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น การขยายตัวของท่อเนื่องจากความร้อนจากแสงแดด เป็นต้น เมื่อติดตั้งมาตรวัดเข้ากับระบบท่อดังกล่าวหากมาตรวัดมีตัวเรือนชนิด 2 ชั้น ตัวเรือนภายนอกสุดจะเป็นตัว

รองรับและลดความเค้นซึ่งส่งผ่านมาจากระบบท่อไม่ให้ส่งผลไปยังตัวเรือนชั้นในซึ่งเป็นห้องวัดของส่วนวัดปริมาตร ด้วยเหตุนี้ช่องว่างวิกฤต จึงยังคงมีค่าคงที่ไม่ว่าความดันภายในระบบท่อจะเปลี่ยนแปลงไป



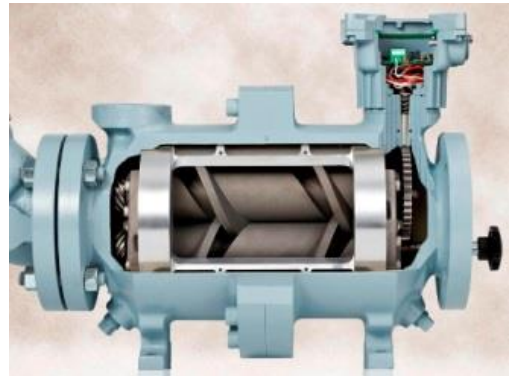
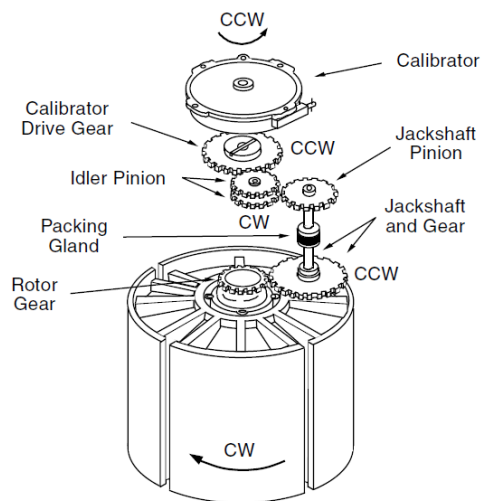
รูปที่ 7-3 มาตรวัดชนิดตัวเรือน 2 ชั้น (Double Case Meters)



รูปที่ 7-4 เมื่อติดตั้งมาตรวัดชนิดตัวเรือน 2 ชั้น ตัวเรือนภายนอกจะช่วยรับแรงเนื่องจากการขยายตัวและหดตัวของระบบท่อ แม้ระบบท่อจะมี Expansion Loop หรืออุปกรณ์อื่นๆ ลดแรงกระทำต่อหน้าแปลนมาตรวัด

1.3.) ชุดเกียร์ขับเคลื่อน (Counter Drive Gear Train) กลไกการนับหรือการบันทึกปริมาตรที่วัดได้ของมาตรวัดจะถูกขับเคลื่อนจากส่วนวัดปริมาตรของเหลว (Measuring Element) หรือ โรเตอร์ (Rotor) ด้วยการใช้ชุดเฟืองทด (gear train) ดังนั้นเมื่อเพลลาของโรเตอร์หมุนจะไปขับให้เครื่องนับหรือเครื่องบันทึกแสดงผลปริมาตรของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดได้ที่หน้าปัดโดยตรง หรือใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าเป็นพัลส์ (pulses) ให้ผลิตสัญญาณตามจำนวนรอบการหมุนแล้วต่อเข้ากับระบบประมวลผลดิจิทัล (รูปที่ 7-5)

1.4.) ตัวปรับความเที่ยงตรง (Calibrator Adjuster) มาตรวัด PD ได้รับการออกแบบเพื่อแสดงปริมาตรที่แน่นอนค่าหนึ่งในแต่ละสิ้นสุดรอบการหมุนครบ 1 รอบของโรเตอร์หรือส่วนที่เคลื่อนที่ของมาตรวัด แต่ในความเป็นจริงปริมาตรที่แน่นอนค่าหนึ่งที่ได้ทำการออกแบบไว้ในแต่ละสิ้นสุดรอบการหมุน 1 รอบของโรเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ เกิดจากหลายสาเหตุเช่น ขั้นตอนการผลิต อายุการใช้งาน ดังนั้นเพื่อให้ได้ปริมาตรแน่นอนค่าหนึ่งตามที่ได้ออกแบบ และ/หรือ เมื่อค่าปริมาตรแน่นอนนั้นๆ ได้เปลี่ยนแปลงไปเป็นค่าเดียวกับปริมาตรของเหลวจริงที่ไหลผ่านมาตรวัด โดยปรับอัตราส่วนของอัตราการหมุนของกลไกของเครื่องนับให้มีความสัมพันธ์กับอัตราการหมุนของโรเตอร์ เรียกว่า ตัวปรับความเที่ยง (calibrator)



รูปที่ 7-5 ชุดเกียร์ขับเคลื่อนเครื่องนับใช้ชุดเฟืองทด (ซ้ายมือ) กับ ตัวผลิตสัญญาณพัลส์ (ขวามือ)

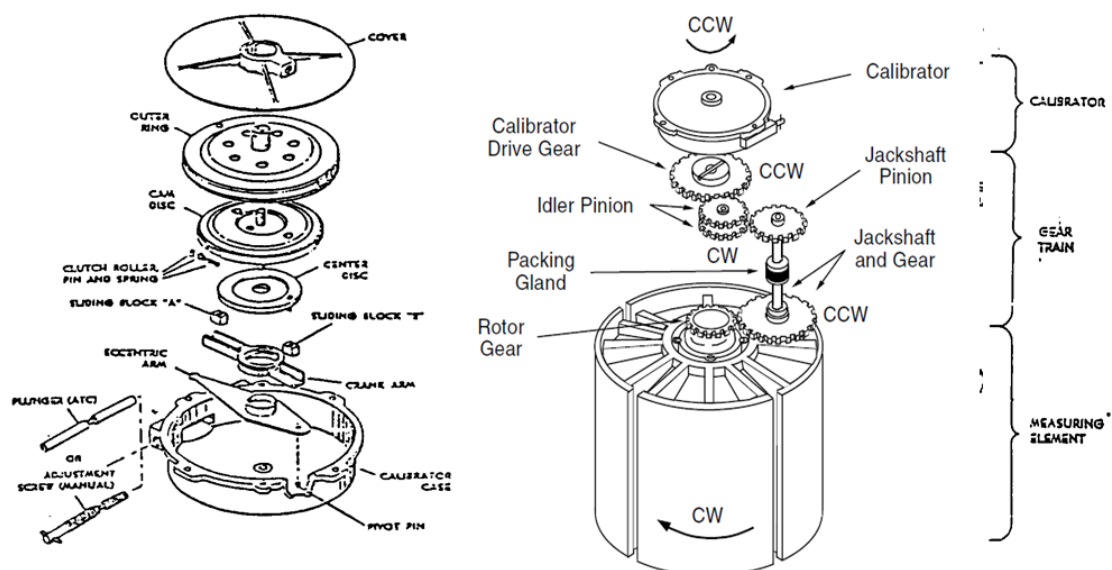
ตัวปรับความเที่ยงไม่ได้ทำให้ปริมาตรของเหลวที่ผ่านมาตรวัดต่อการหมุนเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด เพียงแต่แก้ไขค่าปริมาตรที่แสดงโดยเครื่องบันทึกค่า หรือเครื่องนับ หรือบันทึกค่าปริมาตรเท่ากับค่าปริมาตรของเหลวที่ผ่านมาตรวัดจริงหรือมีค่าใกล้เคียงที่สุด

- “แบบ Mechanical”

- Slipping Clutch Calibrators (รูปที่ 7-6)
- Friction-driven Planetary Gear Calibrators
- Change-gear and Cone-gear Calibrators (รูปที่ 7-7)

- “แบบ Electronic” จะเป็นวงจรทางไฟฟ้าในการปรับค่า K-Factor

ECCENTRIC CLUTCH CALIBRATOR



รูปที่ 7-6 ตัวปรับความเที่ยงตรงแบบ Slipping Clutch Calibrators

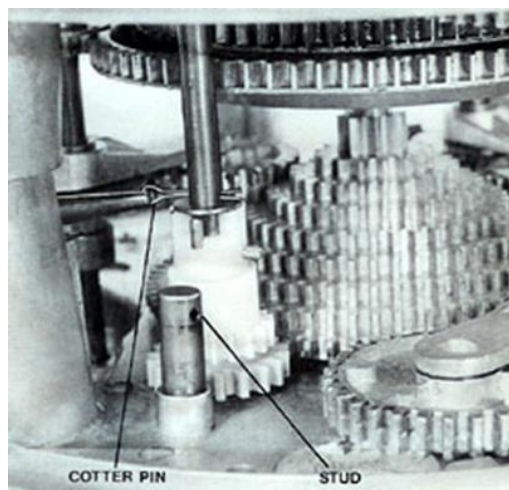
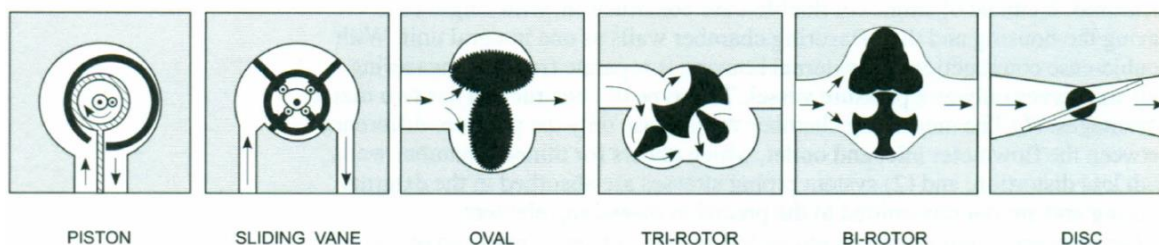


Figure 1. Removing The Cotter Pin From Dollar Drive Shaft

รูปที่ 7-7 ตัวปรับความเที่ยงตรงแบบ Change-gear and Cone-gear Calibrators

2.) ประเภทของมาตรวัดปริมาตรของเหลว PD (Positive Displacement Flow Meters)

เนื่องจากมาตรวัดชนิดนี้ผ่านการพัฒนาปรับปรุงและใช้งานมาเป็นเวลานานตลอดจนได้สร้างความมั่นใจและน่าเชื่อถือให้กับผู้ที่เกี่ยวข้องตลอดมา ส่วนใหญ่แล้วลักษณะเครื่องประกอบด้วยชิ้นส่วนกลไกเสียเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นพอสามารถแบ่งประเภทมาตรวัดชนิดนี้ออกเป็น 6 กลุ่มหลักการทำงานหลัก ดังรูปที่ 7-8 และมีแบบพิเศษอีก 4 แบบการทำงาน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทคโนโลยีเปลี่ยนแปลงรูปแบบก็เปลี่ยนแปลงมีการพัฒนานำชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เข้ามาเสริมทำงานร่วมกันบ้าง ดังนั้นเรามาศึกษาในภาพรวมก่อน ซึ่งได้แก่

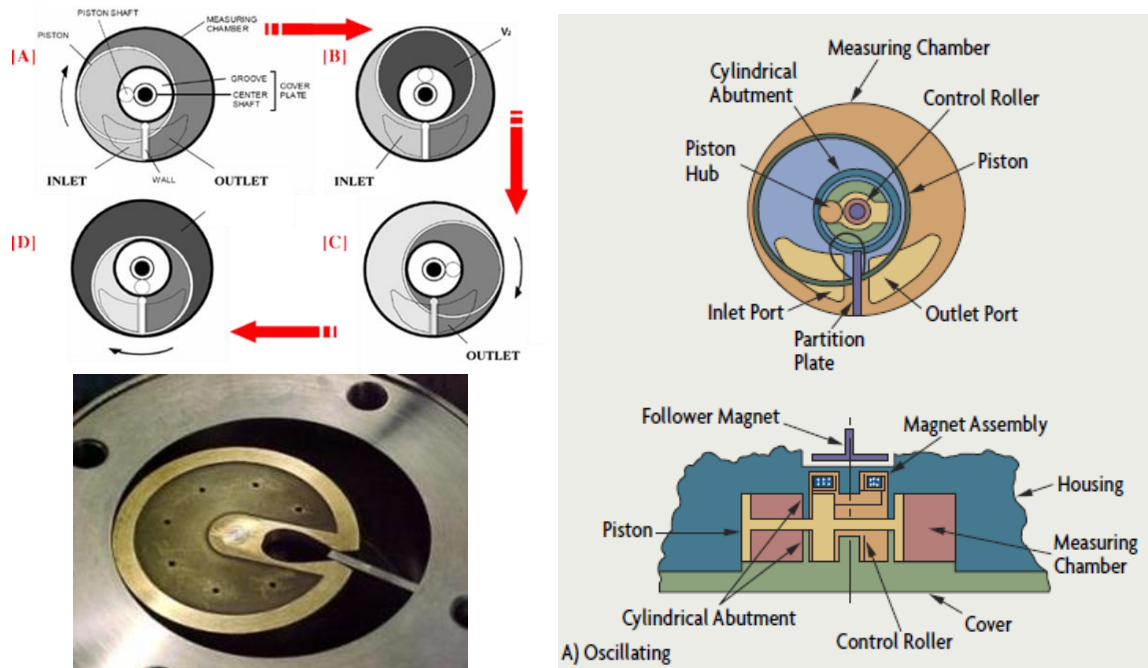


รูปที่ 7-8 หลักการทำงาน 6 ชนิดหลักของมาตรวัดปริมาตรของเหลว PD

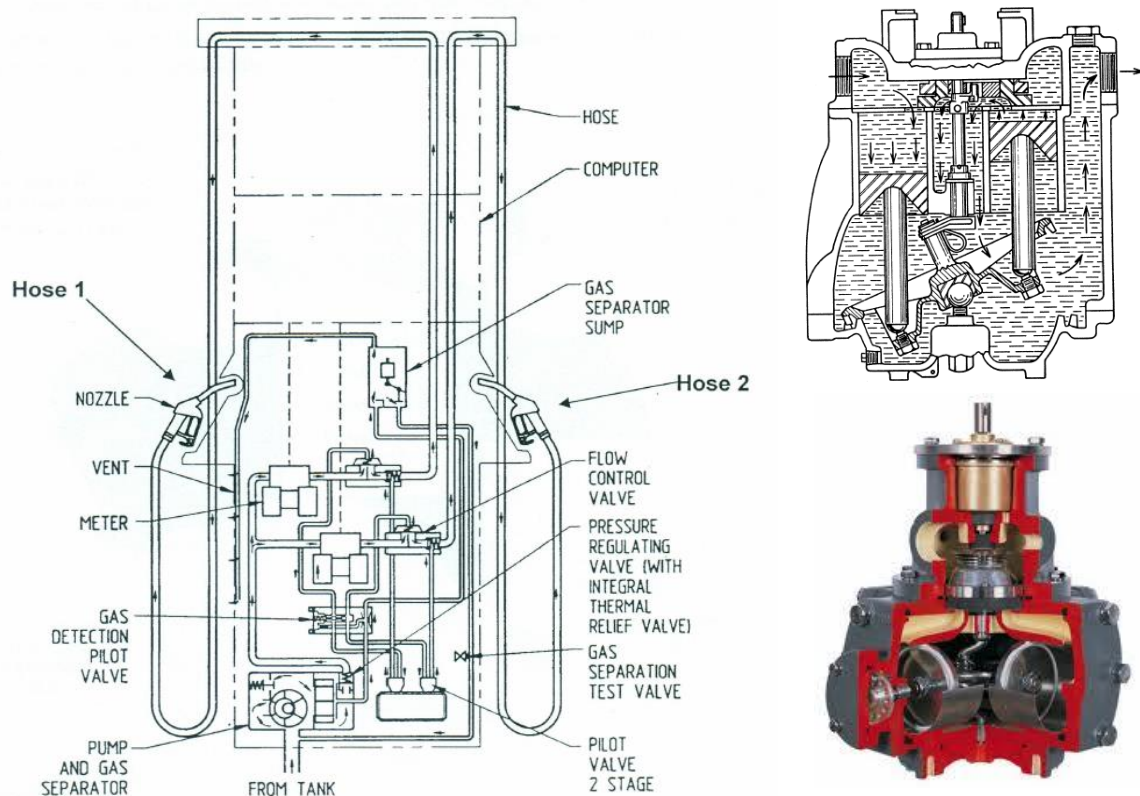
2.1.) Piston Meter

- Rotary-piston (oscillating piston) Flow Meters (รูปที่ 7-9) ประกอบด้วย cylindrical drum ติดตั้งเยื้องศูนย์กลางในตัวเรือนมาตรวัดทรงกระบอก มี partition plate กั้นของเหลวเป็นห้องๆ ด้วยปริมาตรคงที่ต่อรอบการหมุน

- Piston PD METER ลักษณะเป็นกระบอกสูบทำงานร่วมกับลูกสูบ ซึ่งลูกสูบมีช่วงชักเคลื่อนที่กวาดของเหลวออกจากกระบอกสูบด้วยปริมาตรคงที่ ในรูปที่ 7-10 ประกอบด้วยลูกสูบ 2 ชุดร่วมทำการวัดสลับกัน ซึ่งมักจะพบมาตรวัดปริมาตรของเหลวชนิดนี้ในตู้จ่ายน้ำมันตามสถานีบริการ รวมทั้งมาตรวัดก๊าซ LPG ในตู้จ่าย ในการปรับปริมาตรการส่งจ่ายจึงเป็นการปรับปริมาตรกระบอกสูบในกรณีเป็นเครื่องกลไก หรือปรับค่า K-Factor ซึ่งมีค่าเป็นจำนวนพัลส์ต่อลิตรหากเป็นเครื่องอิเล็กทรอนิกส์

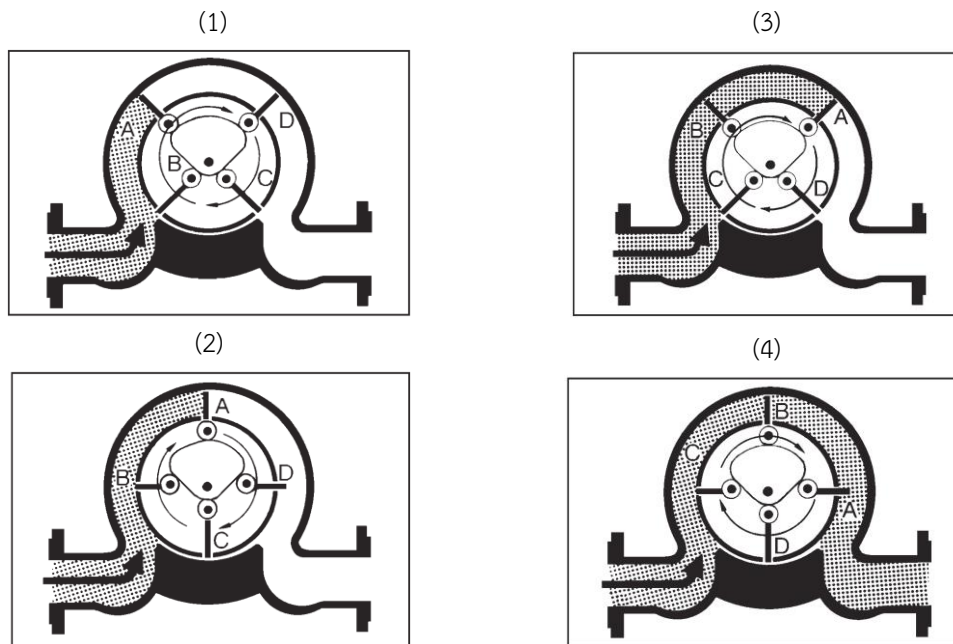


รูปที่ 7-9 Rotary-piston (oscillating piston) Flow Meters



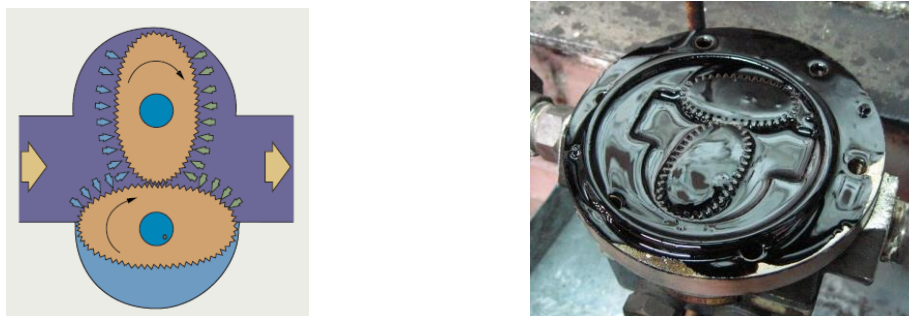
รูปที่ 7-10 Piston PD METER

2.2.) Rotating-Vane PD METER ห้องวัดทำหน้าที่เป็นทั้งตัวเรือนและห้องวัดที่มีปริมาตรคงที่ โดยมี Van ทำหน้าที่แบ่งของเหลวออกเป็นส่วนๆ เพื่อทำการวัดปริมาตรในแต่ละรอบการหมุน (รูปที่ 7-2 และ รูปที่ 7-11)



รูปที่ 7-11 ขั้นตอนการวัดปริมาตรโดย Rotating-Vane PD METER

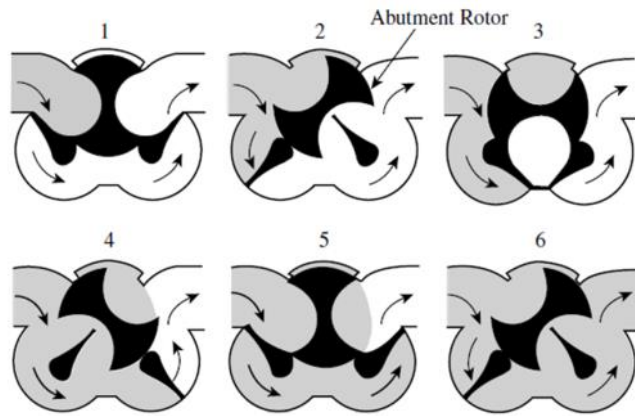
2.3.) **Oval Gear Flow Meters** ภายในห้องวัดจะมีส่วนวัดเป็นรูปทรงรีพร้อมมีเฟืองขบกันสนิทเพื่อแบ่งปริมาตรของเหลวเป็นส่วนๆ เหมาะกับของเหลวที่มีความหนืดสูง ดังรูปที่ 7-12



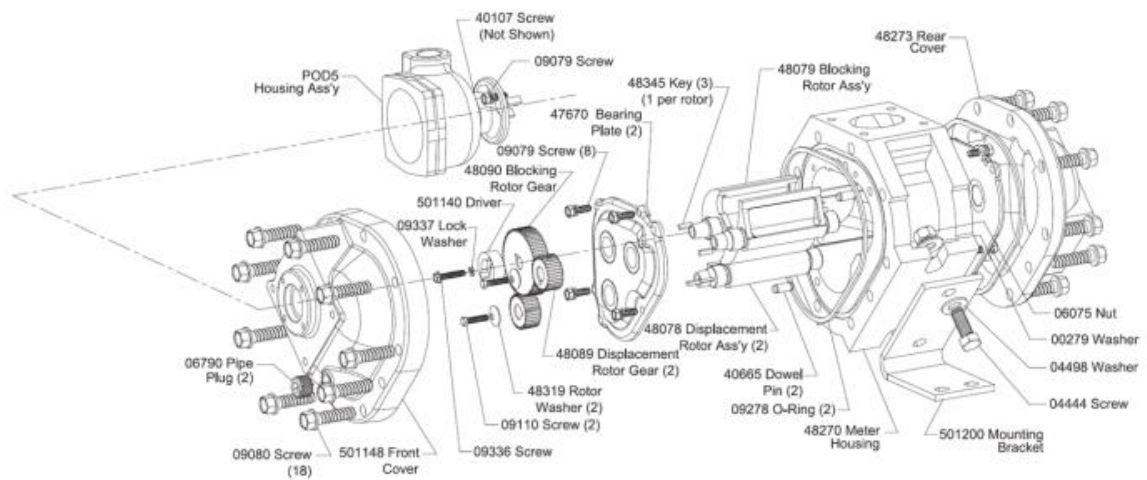
รูปที่ 7-12 Oval Gear Flow Meters

2.4.) **Tri-Rotor PD METER** เมื่อของเหลวไหลผ่านมาตรวัดเข้าห้องวัดที่ทราบปริมาตรคงที่แน่นอนเมื่อโรเตอร์จะหมุนจะกวาดปริมาตรของเหลวคงที่ในแต่ละรอบ ส่วนที่มีการเคลื่อนที่จะได้รับการออกแบบให้มีความสมดุลของมวลแต่จะไปสร้างความไม่สมดุลของของเหลวเพื่อก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ (รูปที่ 7-13) การหมุนของโรเตอร์จะไปขับกลไกกลบันทึกปริมาตรหรือก่อให้เกิด pulse ส่งไปยังส่วนประมวลผลการวัดต่อไป มาตรวัดหลักการทำงานนี้ได้รับผลกระทบต่อค่าความหนืดของเหลวด้วยเช่นกัน ดังในรูปที่ 7-15

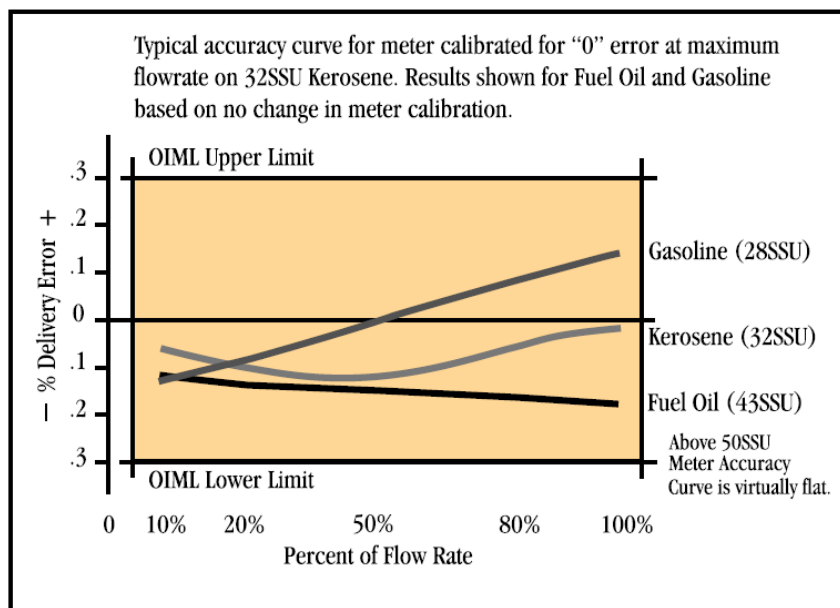
2.5.) **Bi-Rotor PD METER** จะประกอบด้วย helical rotor 2 ตัวขบกันภายในตัวเรือนมาตรวัดเพื่อให้เป็นห้องวัด (flow measuring chamber) ที่ทราบปริมาตรแน่นอนโดยปริมาตรที่วัดได้เป็นสัดส่วนของความเร็วรอบของโรเตอร์ที่หมุน การแสดงปริมาตรที่วัดได้ของมาตรวัดกระทำโดยการเชื่อมต่อเพลลาของโรเตอร์ด้วยเฟืองทดส่วนไปขับส่วนแสดงค่าในลักษณะกลไก หรืออาจการติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัวนับสัญญาณพัลส์ และ flow transmitter เพื่อนับรอบการหมุนของเพลลาโรเตอร์แล้วส่งสัญญาณไปแปลงเป็นค่าปริมาตรวัดได้ เพื่อแสดงผลการวัดปริมาตรและอัตราการไหลต่อไป (รูปที่ 7-16)



รูปที่ 7-13 ขั้นตอนทำงาน 6 ขั้นตอนของ Tri-Rotor PD METER

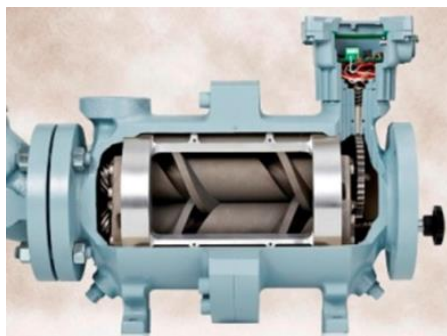


รูปที่ 7-14 ส่วนประกอบ Tri-Rotor PD METER



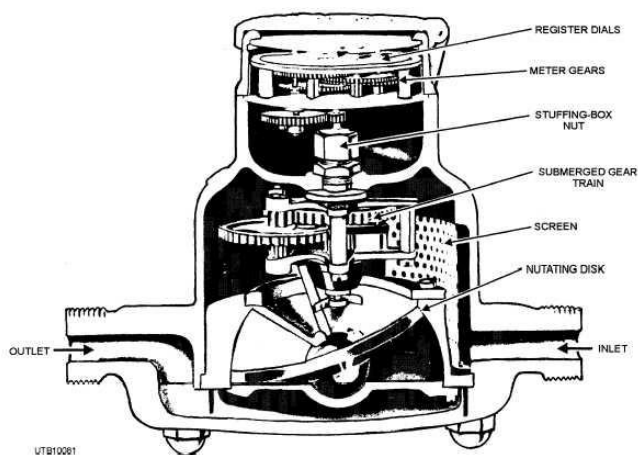
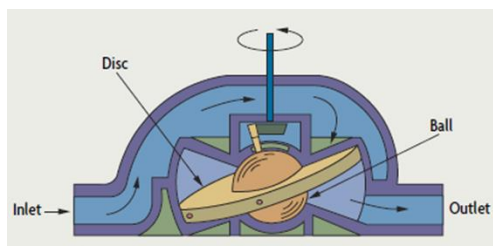
รูปที่ 7-15 ตัวอย่าง Performance Curve ของ Tri-Rotor PD METER

เนื่องจาก helical rotor ถูกออกแบบให้มีลักษณะพิเศษแตกต่างและมีข้อดีกว่ามาตรวัดชนิด Gear PD meter ทั่วไป นั่นคือสามารถลดความดันตกคร่อมของมาตรวัดได้มาก ลดการไหลที่เป็นลักษณะเป็นห่วงๆ ขาดตอน (pulsation flow) ด้านทางออกของมาตรวัด



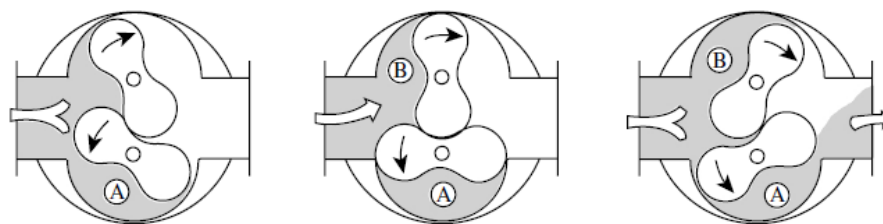
รูปที่ 7-16 Bi-Rotor PD METER

2.6.) Nutating Disk Meters มักพบกับการใช้งานที่มีความหนืดและอัตราการไหลต่ำ เช่น ใช้เป็นมาตรวัดสำหรับวัดปริมาณของน้ำมันเครื่องหล่อลื่นรถยนต์ เป็นต้น



รูปที่ 7-17 ส่วนประกอบ Nutating Disk Meters

2.7.) Rotating Lobe Meter มาตรวัดชนิดนี้เราไม่ค่อยได้พบมากนักในมาตรวัดที่ใช้ในการซื้อขายโดยทั่วไป ขั้นตอนการทำงานดังในรูปที่ 7-18

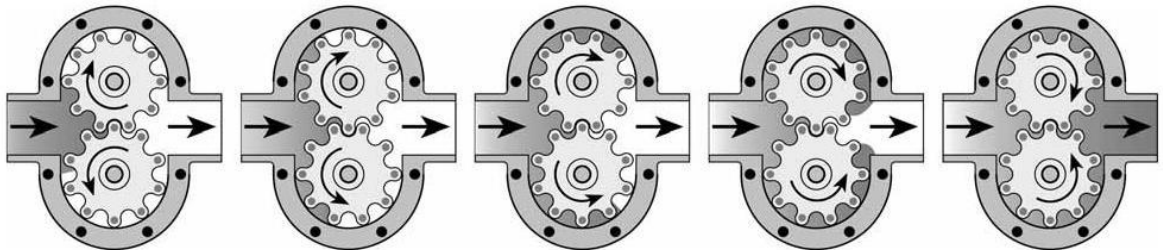


รูปที่ 7-18 Rotating Lobe Meter



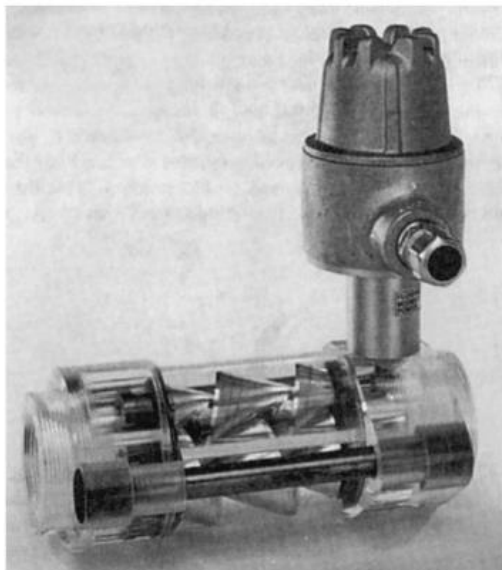
รูปที่ 7-19 Rotating Lobe Meter ขนาดใหญ่พิเศษ

2.8.) Gear Flow Meters or Rotating Impeller Flow Meter



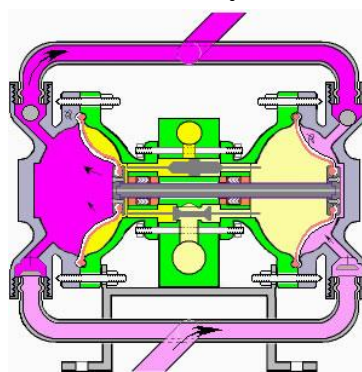
รูปที่ 7-20 Gear Flow Meters

2.9.) Helical Rotary Flow Meter or Helix Flow Meter (รูปที่ 7-21)



รูปที่ 7-21 Helix Flowmeter (Fluidyne Instrumentation)

2.10.) Diaphragm-Type Flow Meters (รูปที่ 7-22)



รูปที่ 7-22 Diaphragm-Type Flow Meters

สำหรับในประเทศไทยนั้น มาตรวัดปริมาตรของเหลวขนาดใหญ่ที่ได้ใช้งานภายในคลังน้ำมัน หรือโรงกลั่นน้ำมันมีทั้งมาตรวัดเทอร์ไบน์ และมาตรวัด PD อีกทั้งได้มีการใช้งานมาตรวัดประเภทนี้มาอย่างยาวนาน จนได้พิสูจน์เป็นที่ยอมรับ ในขณะที่มาตรวัดก็ได้รับการพัฒนาอย่างยาวนานเช่นกัน ในส่วนมาตรวัด PD ที่เราอาจพบเห็นบ่อยๆ จะเป็นมาตรวัดปริมาตรของเหลวประมาณ 2 ชนิดหลักๆ คือ Rotating-Vane และ Bi-Rotor PD METER



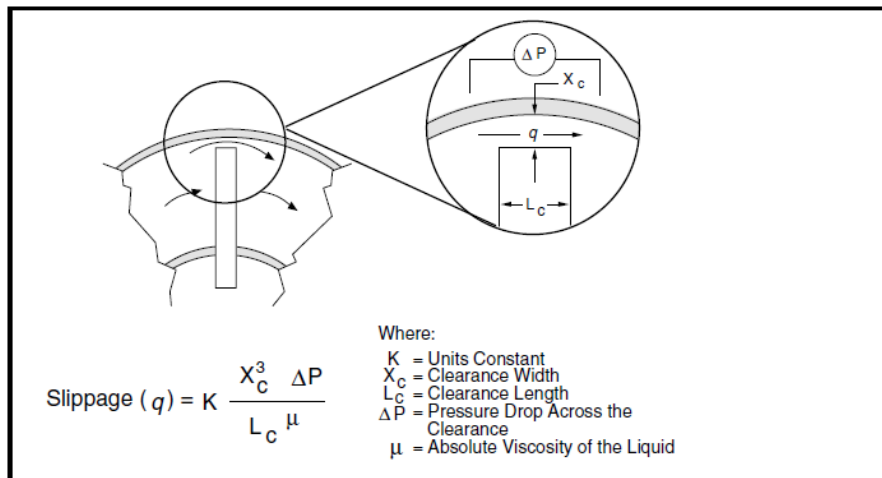
รูปที่ 7-23 มาตรวัดปริมาตรของเหลวที่พบบ่อยใช้ในงาน Custody Transfer

3.) ปัจจัยสำคัญหลัก 2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะ และความเที่ยงของมาตรวัด PD

- ปริมาตรห้องวัด (Measuring Chamber Displace Volume)
- การไหลเล็ดลอด (Slippage) ผ่านบริเวณปลายของชิ้นส่วนเคลื่อนที่กับผนังห้องวัด

จากหลักการทำงานของมาตรวัด PD นั้นจะมีชิ้นส่วนเคลื่อนที่กับชิ้นส่วนที่อยู่กับที่ ดังนั้นในการผลิตมาตรวัด PD จึงต้องมีช่องว่าง (Clearance) ระหว่างชิ้นส่วนทั้งสองระหว่างการทำงาน โดยช่องว่างดังกล่าวจะทำให้มีของเหลวที่ติดอยู่ที่ผนังของห้องวัด เรียกว่า “*Capillary Seal*” และป้องกันการเสียดสีระหว่างชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่กับชิ้นส่วนที่อยู่กับที่ ในการวัดปริมาตรภายใต้ความดันของเหลวที่กระทำต่อมาตรวัด PD นั้นจะก่อให้เกิดความแตกต่างความดันระหว่างห้องวัด (Measuring Chamber) กับภายนอกห้องวัด ด้วยสาเหตุหลัก

ดังกล่าวจึงมีการไหลล้นตลอดของของเหลวออกไปโดยไม่ถูกวัดปริมาตรนั้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “การไหลล้นตลอด (Slippage)”



รูปที่ 7-24 การไหลล้นตลอด (Slippage) ผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลว

3.1.) สาเหตุหลักของการไหลล้นตลอด (Slippage) เป็นผลที่เกิดจากสถานะที่มีความแตกต่างความดันระหว่างภายในห้องวัดกับภายนอกห้องวัด (Measuring Chamber) หรือระหว่างห้องวัดด้วยกันเอง เนื่องจาก 2 สาเหตุสำคัญ คือ

3.1.1.) ความเสียดทานของการทำงานของกลไก (Mechanical Friction) ในขณะที่มาตรวัดทำงานเนื่องจากมาตรวัดปริมาตรของเหลวชนิดนี้ส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นชิ้นส่วนกลไกที่ทำงานร่วมกันของโรเตอร์, แบริงมาตรวัด, ซีล, ประเก็น (Packing Glad), ชุดเฟืองเกียร์ (Gear Train), เครื่องนับและอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ต้องการการขับเคลื่อนแรงบิด เป็นต้น ซึ่งในแต่ละกลไกที่มีการเคลื่อนไหวก็มีความเสียดทานเชิงกลและก่อให้เกิดความแตกต่างความดันเมื่อมีของเหลวไหลเข้าสู่มาตรวัดซึ่งมีการหมุน

3.1.2.) ความเสียดทานไฮดรอลิกของของเหลว (Hydraulic Friction) ความแตกต่างของความดันเกิดจากคุณสมบัติของของเหลว (Fluid Properties) ที่ถูกวัดด้วยมาตรวัด เนื่องจากความเสียดทานระหว่างชั้นของเหลวกับผนังห้องวัดปริมาตร และ ระหว่างชั้นของเหลวกับผิวตัวโรเตอร์ รวมทั้งความเสียดทานระหว่างชั้นของของเหลวด้วยเช่นกัน

3.2.) ผลต่างความดันรวมทั้งหมด (Total Pressure Differential) คร่อมช่องว่างส่วนวัดปริมาตร (the measuring element clearance) ภายในตัวมาตรวัดปริมาตรของเหลวชนิดนี้ขณะทำการวัดปริมาตรสามารถกำหนดด้วยสมการ

$$P = P_{HB} + P_{HF} + P_{MF} + P_{Vs} \quad (\text{Eq.7-1})$$

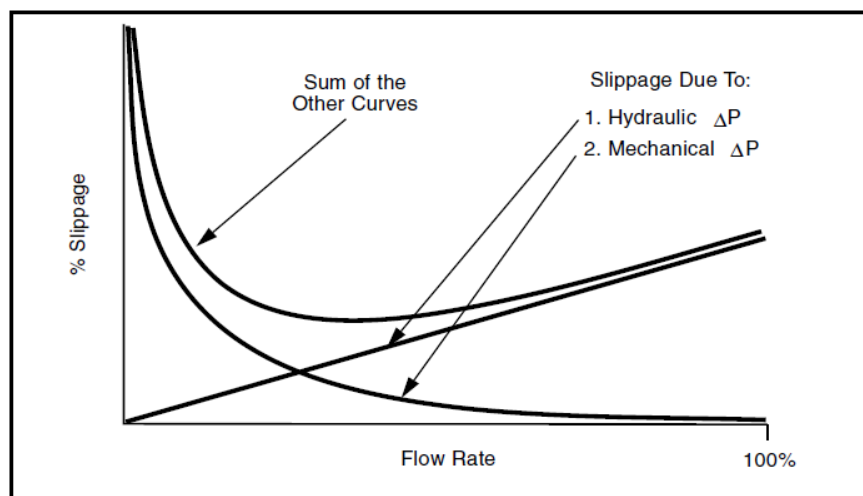
เมื่อ

P_{HB} (hydraulic bending) เป็นพลังงานเฉื่อยของเหลวหรือความดันตกที่ต้องเสียไปในการเปลี่ยนทิศทางการไหลเนื่องจากการขยายตัว (expansion) และการหดตัว (contraction) หรือการโค้งงอของแนวทางการไหลส่วนวัดปริมาตร

P_{HF} (hydraulic friction) พลังงานสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานระหว่างชั้นของเหลวกับผนังห้องวัดปริมาตรและของเหลวกับผิวตัวโรเตอร์

P_{MF} (mechanical friction) พลังงานที่สูญเสียไปให้กับแรงบิดขับเคลื่อนกลไกเพื่อเอาชนะความเสียดทานเชิงกลในแบริงมาตรวัด, ชุดเฟืองเกียร์, เครื่องนับและอุปกรณ์รวมอื่นๆที่ต้องการการขับเคลื่อนแรงบิด

P_{VS} (viscous shear) พลังงานสูญเสียไปให้แรงบิดขับเคลื่อนกลไกเพื่อเอาชนะแรงบิดอุ้งเนื่องจากความหนืด (viscous drag torque) ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าส่วนเคลื่อนที่เนื่องจากความเค้นหนืด (viscous shear stress) ที่เกิดขึ้นช่องว่างระหว่างผิวหน้าชิ้นส่วนเคลื่อนที่และผิวหน้าชิ้นส่วนอยู่กับที่



รูปที่ 7-25 ปัจจัยที่มีผลต่อการไหลเล็ดลอด (Slippage) ต่อสมรรถนะมาตรวัดของเหลว

3.3.) การวิเคราะห์ผลที่ตามมา (ดูรูปที่ 7-25)

- อัตราการไหลสูง & ของเหลวมีความหนืดต่ำ ความดันเนื่องจาก P_{HB} , P_{HF} จะเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญและเด่น อีกทั้งเป็นปัจจัยหลักที่จะก่อให้เกิดความดันแตกต่างรวมทั้งหมด (P)
- อัตราการไหลต่ำ P_{MF} จะเป็นปัจจัยเด่นที่มีผลต่อค่าความดันแตกต่างรวมทั้งหมด (P)
- ของเหลวมีความหนืดสูง P_{VS} จะเป็นปัจจัยเด่นที่มีผลต่อค่าความดันแตกต่างรวมทั้งหมด (P)
- ตั้งแต่ประมาณ 40 % ของอัตราการไหลสูงสุด ส่วนใหญ่เป็นผลมาจาก P_{HB} (hydraulic bending) และ P_{HF} (hydraulic friction)
- ที่อัตราการไหลต่ำกว่า 40 % ของอัตราการไหลสูงสุด ส่วนใหญ่เป็นผลมาจาก P_{MF} (mechanical friction)

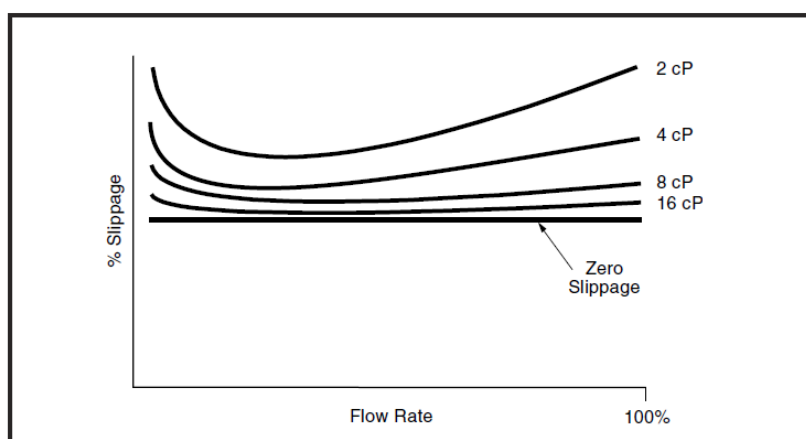
4.) ปัจจัยที่มีผลต่อการไหลเล็ดลอด (Slippage)

4.1.) อัตราการไหล (Flow Rate) เพอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงการไหลเล็ดลอด (Slippage) ผ่านช่องว่าง (Clearance) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความแตกต่างความดันภายใน กับภายนอกห้องวัด

(Measuring Chamber) ซึ่งเกิดจากผลการกระทำร่วมของสาเหตุทั้งความเสียดทานไฮดรอลิกของของเหลว (Hydraulic Friction) กับความเสียดทานของการทำงานของกลไก (Mechanical Friction) โดยทั่วไป

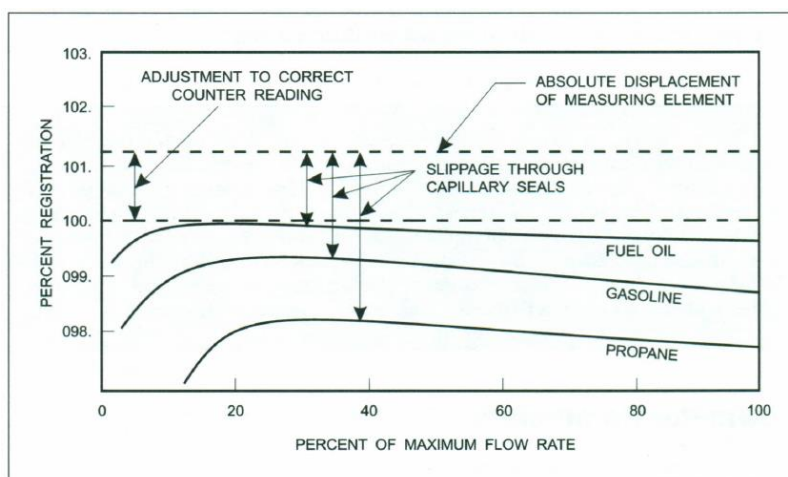
- อัตราการไหลผ่านมาตรวัดสูง สาเหตุความแตกต่างของความดันที่เกิดขึ้นจากสาเหตุ Hydraulic Friction จะเด่นและเป็นสาเหตุหลักต่อการไหลเล็ดลอด
- อัตราการไหลผ่านมาตรวัดต่ำ สาเหตุความแตกต่างของความดันที่เกิดขึ้นจากสาเหตุของ Mechanical Friction จะเด่นและเป็นสาเหตุหลักต่อการไหลเล็ดลอด

4.2.) ความหนืด (Viscosity) หากของเหลวที่ทำการวัดมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น การไหลเล็ดลอด (Slippage) ผ่านช่องว่าง (Clearance) ระหว่างชิ้นส่วนเคลื่อนที่ของห้องวัดยิ่งยากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงถือเป็นจุดเด่นของมาตรวัด PD ที่มีความสามารถวัดปริมาตรภายใต้การเปลี่ยนแปลงความหนืดได้ช่วงกว้างมากโดยยังคงมีผลผิดที่ยอมรับได้ เมื่อเทียบกับมาตรวัดที่มีหลักการวัดชนิดอื่นๆ และมาตรวัด PD มีแนวโน้มที่จะทำงานได้ดีขึ้นเมื่อใช้กับการวัดของเหลวที่มีความหนืดสูง ดังในรูปที่ 7-26



รูปที่ 7-26 อิทธิพลของความหนืดต่อสมรรถนะมาตรวัดของเหลว

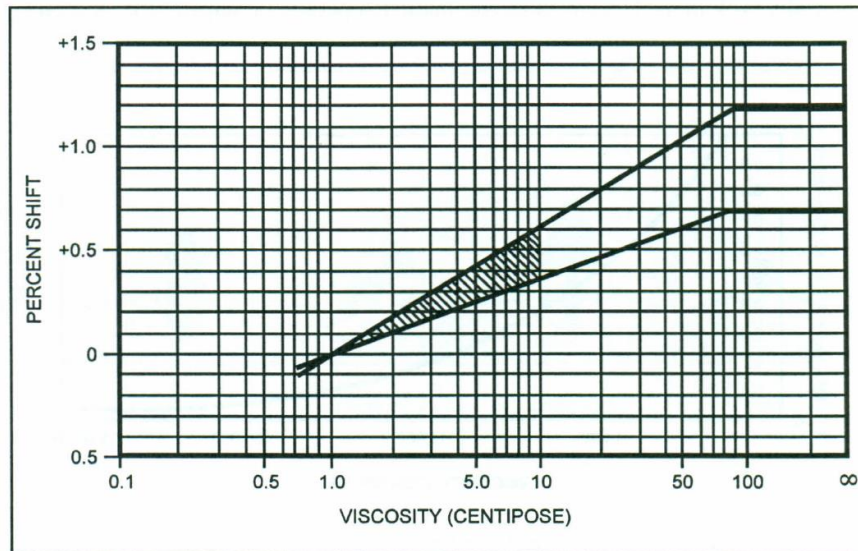
นอกจากนี้ยังพบว่ามาตรวัด PD ใช้วัดของเหลวที่มีความหนืดน้อยกว่าจะมีค่า Meter Error มากกว่าเมื่อใช้วัดของเหลวที่มีความหนืดมากกว่า ดังรูปที่ 7-27 นี้คือ เหตุผลว่าทำไมต้องใช้ของเหลวชนิดเดียวกันกับของเหลวใช้งานจริงในการตรวจสอบให้คำรับรองหรือสอบเทียบมาตรวัดนั้นๆ



รูปที่ 7-27 ปัจจัยที่มีผลต่อการไหลเล็ดลอด (Slippage) ต่อสมรรถนะมาตรวัดของเหลว

มาตรวัด PD โดยทั่วไป เมื่อวัดปริมาตรของเหลวที่มีค่าความหนืดตั้งแต่ 1 Centipoise (cP) จนถึง 100 Centipoise (cP) ดังในรูปที่ 7-28 มีข้อสังเกตว่า

- Meter Error มีค่าสูงสุดของการเลื่อนค่า (Maximum Shift) ประมาณ 1.2%
- สำหรับของเหลวที่มีค่าความหนืดสูงกว่า 100 Centipoise (cP) พบว่า Meter Error แทบไม่เปลี่ยนแปลง หรือเกือบถือว่าไม่มีการไหลเล็ดลอด (Percent Shift คงที่)



รูปที่ 7-28 ปัจจัยที่มีผลต่อการไหลเล็ดลอด (Slippage) ต่อสมรรถนะมาตรวัดของเหลว

4.3.) อุณหภูมิ (Temperature) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเหลวส่งผลต่อ

- การเปลี่ยนแปลงปริมาตร หรือความหนาแน่นของของเหลว,
- ปริมาตรห้องวัด (Measuring Chamber Volume),
- ช่องว่าง (Clearance) ระหว่างชิ้นส่วนของมาตรวัด PD และ
- ค่าความหนืดของเหลวเปลี่ยนไป

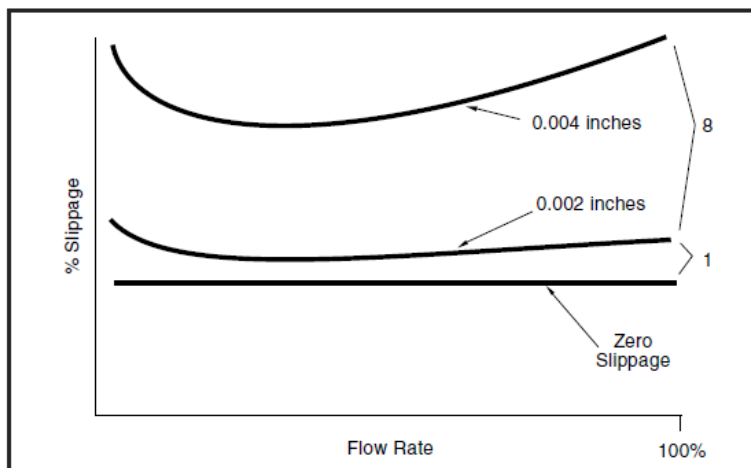
ด้วยเหตุนี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเหลวไหลผ่านมาตรวัดทำให้มาตรวัดมีค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (Meter Factor) และ Meter Error เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมินั่นเอง

4.4.) ความดันในระบบท่อ (Line Pressure) การเพิ่มความดันภายในมาตรวัดจะทำให้ตัวเรือนมาตรวัดขยายตัว ส่งผลให้ห้องวัดปริมาตรเพิ่มสูงขึ้นในขณะเดียวกันก็จะทำให้เพิ่มช่องว่าง (Clearances) ระหว่างชิ้นส่วนของมาตรวัด PD ปริมาตรห้องวัด (Measuring Chamber Volume) รวมทั้งชิ้นส่วนกลไกที่มีการเคลื่อนที่และอยู่กับที่ทั้งหมด

4.5.) ความเสียดทาน (Friction) เมื่อความเสียดทานของกลไก (Mechanical Friction) เพิ่มขึ้น ระบบการทำงานของมาตรวัดยังต้องการผลต่างความดันระหว่างชิ้นส่วนเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานในการหมุนของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ และชิ้นส่วนเชื่อมโยงต่อเนื่อง ส่งผลให้ของเหลวไหลเล็ดลอดผ่านช่องว่าง (Clearance) ระหว่างชิ้นส่วนเคลื่อนที่ของห้องวัดยิ่งมากขึ้นโดยไม่ผ่านการวัดปริมาตร

4.6.) ความสึกหรอ (Wear) เมื่อชิ้นส่วนภายในมาตรวัด PD มีการสึกหรอ รูปแบบของการสึกหรอของชิ้นส่วนดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงการไหลเล็ดลอดของมาตรวัด ดังรูปที่ 7-29 เป็น

ตัวอย่างหาก clearance ของชิ้นส่วนห้องวัดระหว่างส่วนที่เคลื่อนที่กับส่วนอยู่กับที่ของมาตรวัดเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อสมรรถนะของมาตรวัด PD ในรูปแบบและทิศทางอย่างไร แต่ไม่สามารถใช้ได้กับมาตรวัด PD ทุกชนิดนะ ยกตัวอย่างพอเป็นแนวทางเนื่องจากมาตรวัด PD เป็นการทำงานของชิ้นส่วนกลไกเป็นส่วนใหญ่



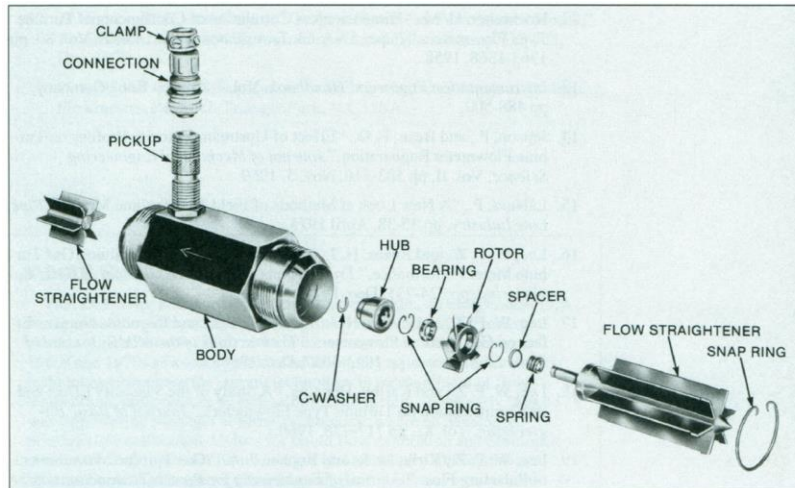
รูปที่ 7-29 ปัจจัยที่มีผลต่อการไหลเล็ดลอด (Slippage) ต่อสมรรถนะมาตรวัดของเหลว

4.7.) สภาวะการไหลไม่อุดมคติ (Non-ideal Flow Condition) สภาวะการไหลในที่นี้คือรูปแบบการไหล (Flow pattern) นั้นเอง พบว่ามาตรวัด PD ไม่ไวต่อสภาวะการไหลที่ไม่สมบูรณ์เหมือนมาตรวัดเทอร์ไบน์ ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นปรับสภาพการไหลก่อนทางเข้ามาตรวัด P.D. ให้มีรูปแบบการไหลเป็น turbulent flow อย่างสมบูรณ์เหมือนเช่นกับมาตรวัดเทอร์ไบน์ พุทธอีกนัยหนึ่งก็คือระบบท่อก่อนทางเข้ามาตรวัด PD สามารถมีข้ออ, ติดตั้งวาล์ว, ตัวกรอง หรืออุปกรณ์อื่นๆที่จำเป็นในระดับหนึ่ง โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งที่ระยะท่อทางเข้าบังคับค่าหนึ่งห่างจากมาตรวัดเหมือนเช่นอย่างมาตรวัดเทอร์ไบน์ แต่ก็ต้องติดตั้งตามคำแนะนำของผู้ผลิตอย่างเคร่งครัดเช่นกัน

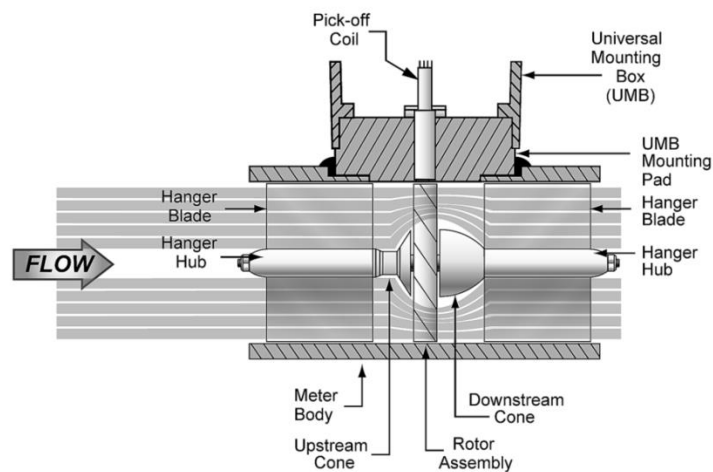
ข. มาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์ (Turbine Flow Meters)

1.) หลักการทำงานของมาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์ (Turbine Flow Meters) ประกอบด้วยตัวเรือนเป็นท่อสั้นๆ ท่อหนึ่งภายในจะมีลูกปืน (bearing) ติดตั้งอยู่ตรงกลางท่อ โดยระหว่างลูกปืนจะมีเทอร์ไบน์ (turbine) จำนวน 1 ตัวหรือ 2 ตัวแล้วแต่บริษัทผู้ผลิต ในส่วนเทอร์ไบน์จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อที่เป็นตัวเรือนของมาตรวัดเทอร์ไบน์ ทั้งนี้ตัวเทอร์ไบน์ถูกติดตั้งยึดติดแน่นอยู่บนตัวโรเตอร์ ซึ่งตัวโรเตอร์เองจะหมุนได้อิสระด้วยลูกปืนรองรับการหมุนและทั้งตัวเทอร์ไบน์และโรเตอร์จะหมุนไปพร้อมกันก็ต่อเมื่อมีของเหลวหรือแก๊สไหลผ่านมาตรวัด (รูปที่ 7-30)

โรเตอร์ของมาตรวัดเทอร์ไบน์ (Turbine Meter Rotor) จะเป็นตัวบ่งบอกปริมาตรของเหลวที่ไหลผ่านได้จากอัตราการหมุนของโรเตอร์ โดยจะเป็นสัดส่วน (หรืออยู่ในค่าขอบเขตค่าหนึ่ง) กับความเร็วการไหลของเหลวซึ่งในการการคำนวณหาปริมาตรของเหลวที่เคลื่อนไหลผ่านมาตรวัดแต่ละรอบการหมุนของโรเตอร์ ของเหลวดังกล่าวไม่ได้ถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆเหมือนเช่นเดียวกับมาตรวัดชนิด Positive Displacement แต่เป็นการวัดความเร็ว (Velocity) และรูปแบบการไหล (Flow Pattern) ของของเหลวที่ถูกเตรียมการไว้ก่อนเข้ามาตรวัดและหลังออกมาตรวัด (รูปที่ 7-31)



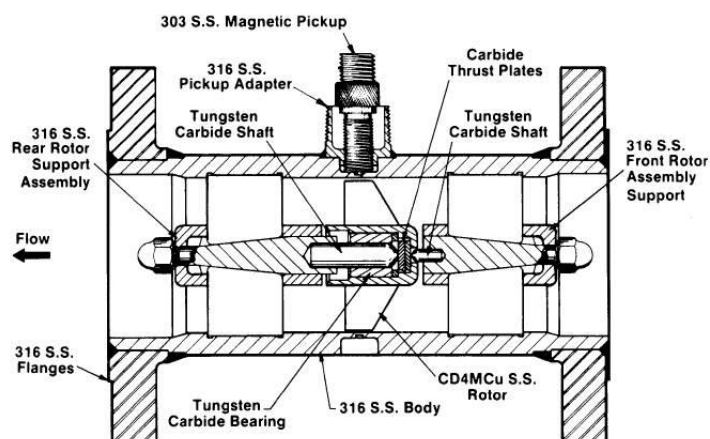
รูปที่ 7-30 ส่วนประกอบหลักๆ ของ มาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์ (Shute & Koerting Div., Ketema, Cox Instrument)



รูปที่ 7-31 หลักการทำงานมาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์

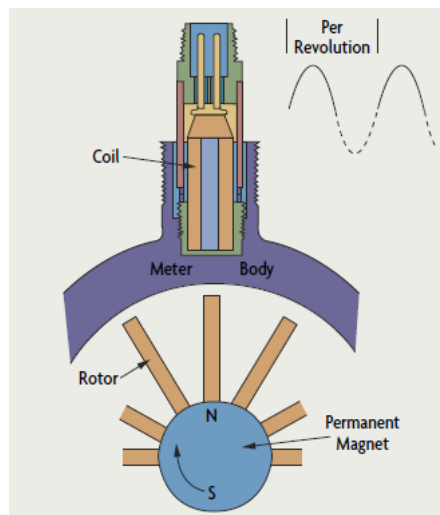
2.) โครงสร้างมาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์ (Typical Construction Flow Meters)

2.1.) ขดลวดรับ (Variable Reluctance Magnetic Pickup) ทำหน้าที่แปลงรอบการหมุนของเทอร์ไบน์ไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ก่อนถูกปรับปรุงและแปลงความหมายเป็นอัตราการไหล



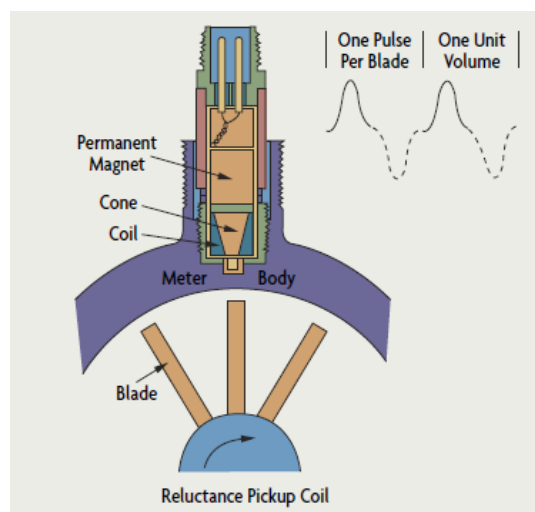
รูปที่ 7-32 หลักการทำงานมาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์

2.1.1.) **ขดลวดรับแบบการเหนี่ยวนำ (Inductance)** เมื่อโรเตอร์หมุนเนื่องจากของไหลไหลผ่านตัว Turbine แม่เหล็กถาวรติดตั้งอยู่บนปลายโรเตอร์ (Rotor Vane Tips) หรืออยู่ในกระดุม (Hub) หรือเพลลาของโรเตอร์ หมุนตัดผ่านขดลวดรับ (Pick-Up Coil) ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux) ที่กระทำต่อขดลวดเปลี่ยนแปลงไป และเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในขดลวดรับ ดังรูปที่ 7-33



รูปที่ 7-33 หลักการทำงานขดลวดแบบการเหนี่ยวนำ (Inductance)

2.1.2.) **ขดลวดรับแบบรีลัคแตนซ์แปรค่า (Variable Reluctance)** เมื่อโรเตอร์ของมาตรวัดเทอร์ไบน์เป็นโรเตอร์แม่เหล็ก (Ferrous Rotor) หมุนผ่านปลายขดลวดรับซึ่งเป็นขดลวดพันอยู่บนแกนเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Magnetized Core) ดังนั้นการหมุนของโรเตอร์เวน (Rotor Vane) ในแต่ละครั้งจะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กภายในขดลวดรับแปรเปลี่ยนไป สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่มีออกมาในรูปของพัลส์ (Pulse) ของแรงดันไฟฟ้าซึ่งมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ

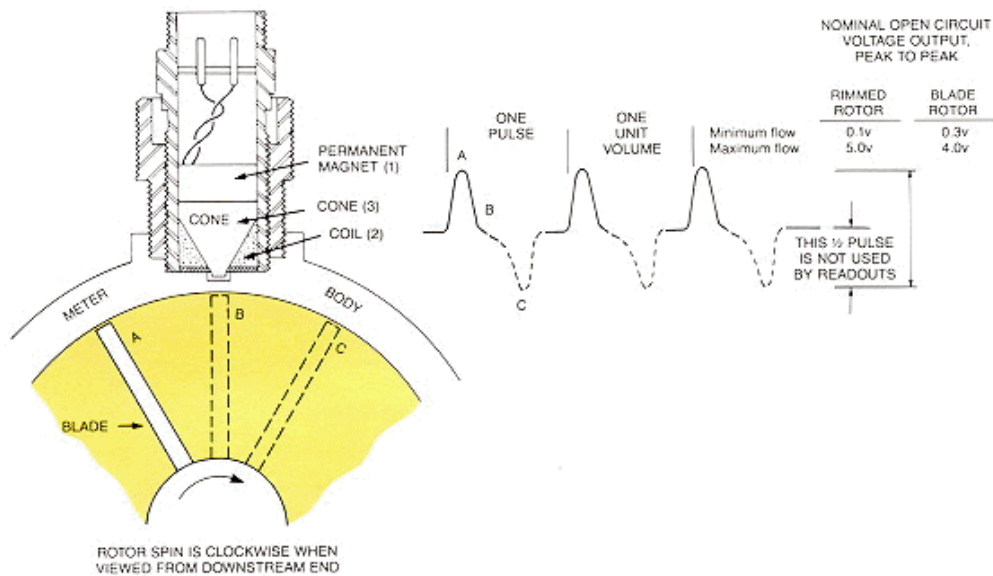


รูปที่ 7-34 หลักการทำงานขดลวดแบบรีลัคแตนซ์แปรค่า (Variable Reluctance)

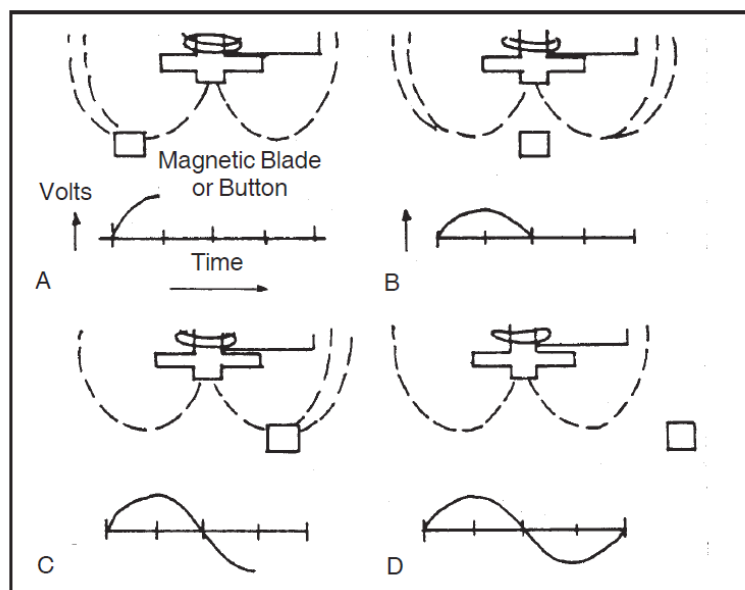
- ความถี่ของพัลส์เป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) ของโรเตอร์และอัตราการไหล

- พัลส์จะถูกนับจำนวนรวมทั้งหมดด้วยตัวนับอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Counter) จากนั้นตัวนับอิเล็กทรอนิกส์ ก็จะทำการแปรค่าสัญญาณรวมทั้งหมดให้เป็นค่าปริมาตรรวมทั้งหมด (Total Volume)
- ส่วนความถี่ของพัลส์ก็จะเป็นตัวบ่งบอกอัตราการไหล (Rate of Flow) ไม่ใช่ค่าแรงดันไฟฟ้า Peak-to-Peak Voltage; V_{p-p}
- จำนวน พัลส์ต่อหน่วยปริมาตรเรียกว่า “K -Factor” เช่น 25.64 pluses/ลิตร

จากรูปที่ 7-35 แม่เหล็กถาวร (1) จะผลิตสนามแม่เหล็กผ่านขดลวด (2) โดยขึ้นส่วนรูปโคน (3) จะเป็นตัวทำให้สนามแม่เหล็กเข้มข้นเป็นจุดบริเวณลายโคน (Meter Body เป็น Stainless Steel จึงไม่มีผลต่อสนามแม่เหล็ก & เหนี่ยวนำไฟฟ้า)

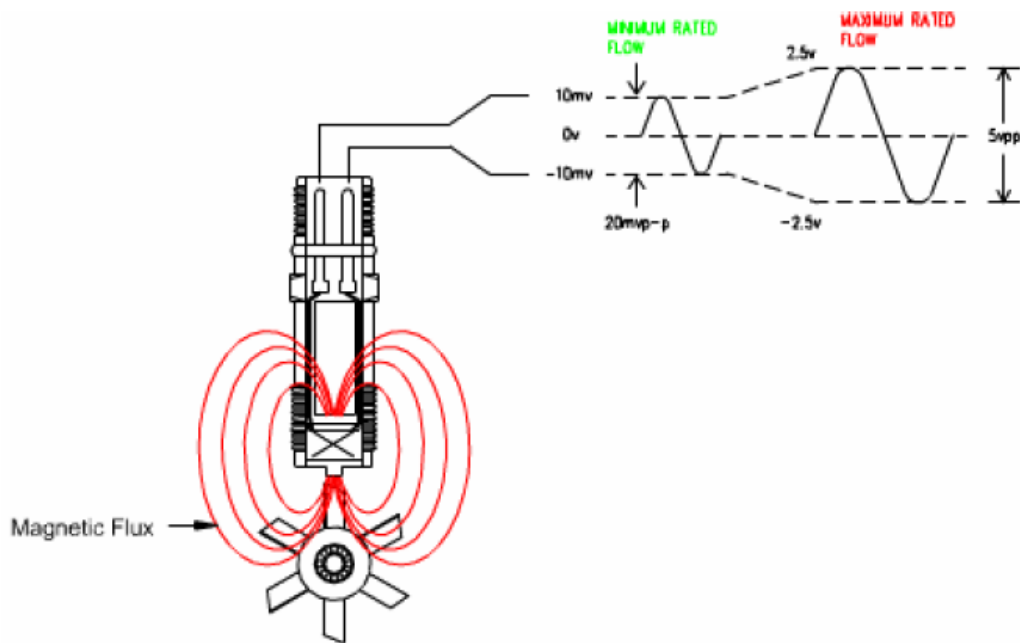


รูปที่ 7-35 หลักการเหนี่ยวนำในขดลวดแบบรีลัคแตนซ์แปรค่า (Variable Reluctance)



รูปที่ 7-36 หลักการเหนี่ยวนำในขดลวดแบบรีลัคแตนซ์แปรค่า ในรูปสนามแม่เหล็ก

- ใบพัดเทอร์ไบน์หมุนเริ่มจากตำแหน่ง (A) เคลื่อนเข้าหาใต้จุดของรูปโคน (3) จะไปเหนี่ยวนำขดลวดรับโดยเพิ่มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux) ด้วยตัวใบพัดซึ่งเป็นแม่เหล็ก จึงก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นภายในขดลวด
- เมื่อใบพัดอยู่ในตำแหน่ง (B) สนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux) มีสถานะสมดุล ทำให้แรงดันไฟฟ้าในขดลวดรับลดลงเท่ากับศูนย์ แต่
- เมื่อใบพัดเริ่มเคลื่อนที่ห่างออกไปจากจุดปลายโคน ตำแหน่ง (C) ใบพัดซึ่งเป็นแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเปลี่ยนไปในทิศทางตรงข้าม ทำให้เพิ่มแรงดันไฟฟ้าในทิศทางตรงข้าม

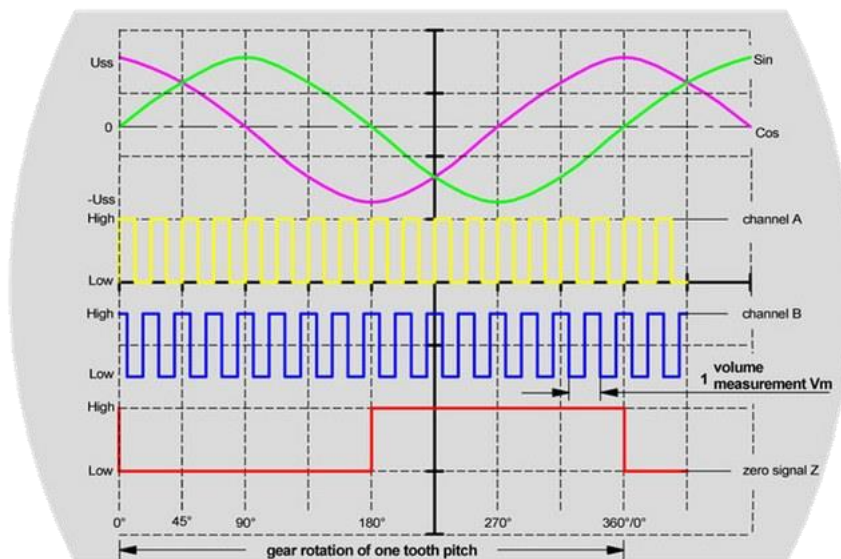
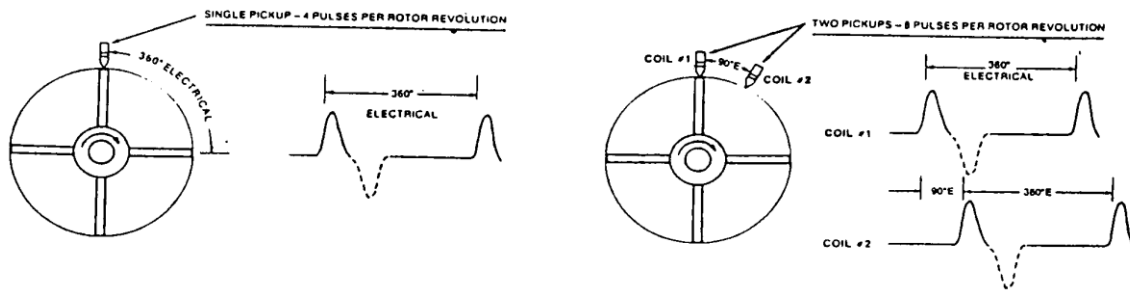


รูปที่ 7-37 แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณขดลวดรับด้านทางออกอยู่ระหว่าง 10 mV -2.5V (Q_{min} - Q_{max})

นอกจากนี้การเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของมาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์ด้วยการเพิ่มจำนวนขดลวดรับ (Pickup Coil) ให้เป็น 2 ตัว (รูปที่ 7-38) โดยวางในตำแหน่งเยื้องกันเพื่อสามารถนำสัญญาณพัลส์ที่ได้จากขดลวดรับทั้ง 2 มาเปรียบเทียบกันและใช้ทวนสอบการทำงานซึ่งกันและกัน โดยขดลวดรับจะส่งสัญญาณออกในช่องสัญญาณ channel A และ channel B ดังในรูปที่ 7-39 มักใช้กับงานที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำการวัดสูง

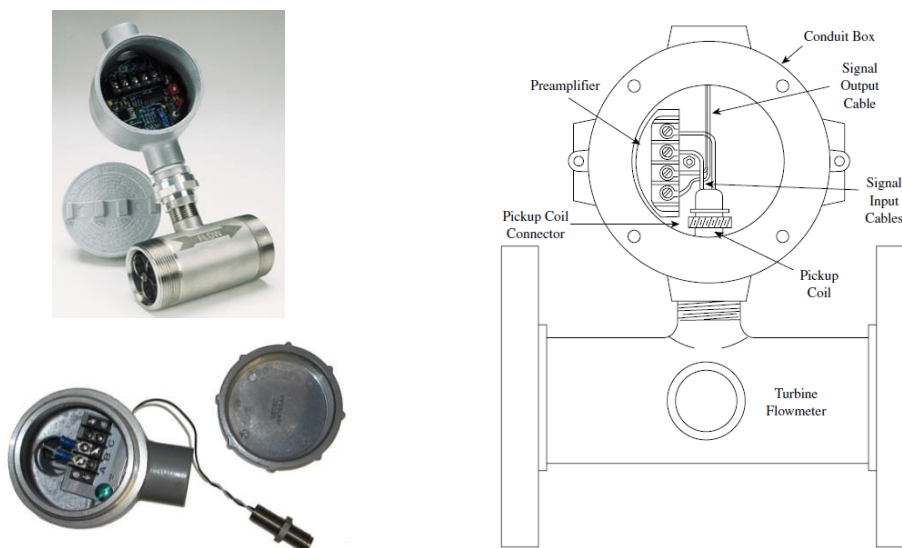


รูปที่ 7-38 มาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์มีขดลวดรับ (Pickup Coil) 2 ตัววางในตำแหน่งเยื้องกัน 90 องศา



รูปที่ 7-39 แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณที่ถูกเหนี่ยวนำแต่ละขดลวดรับ

2.2.) ตัวขยายสัญญาณ (Preamplifier) สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์พัลส์ (Electronic Pulses) ผลผลิตจากการหมุนของโรเตอร์เทอร์ไบน์ภายในมาตรวัดเทอร์ไบน์ มีความแรงของสัญญาณต่ำมากๆ (Very Low-Level Signal) ในบางกรณีมีค่าเพียง 2-3 มิลลิโวลต์เท่านั้น ก่อนถูกขยายความแรงสัญญาณ แล้วส่งสัญญาณจากตัวมาตรวัดไปยังตัวนับพัลส์ (Pulse Counter) ต่อไป จึงต้องให้ความสำคัญต่อสัญญาณดังกล่าวไม่ให้เกิดการสูญเสียหรือเพิ่มเติม (loss or gain signal) ระหว่างการส่งสัญญาณ



รูปที่ 7-40 ขดลวดรับ (Pick-Up Coil) และตัวขยายสัญญาณ (Preamplifier)

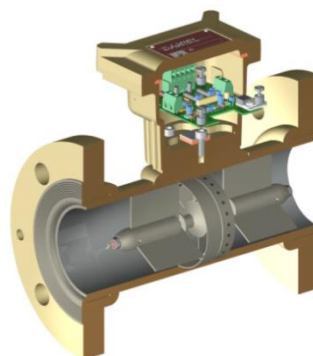
2.3.) เทอร์ไบน์โรเตอร์ (Type Rotor) เป็นส่วนที่สัมผัสของเหลวที่ทำการวัดโดยตรงและหมุนไปตามการไหลของของเหลวขณะทำการวัด แบ่งออกเป็น

2.3.1.) เทอร์ไบน์โรเตอร์แบบ Conventional Type Rotor



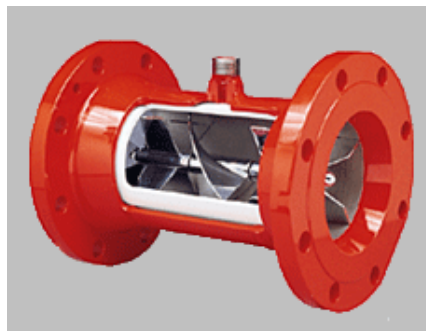
รูปที่ 7-41 หลักการทำงานมาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์

2.3.2.) เทอร์ไบน์โรเตอร์แบบ Rim Type Rotor เนื่องจากจำนวนพัลส์ขึ้นอยู่กับจำนวนใบพัดเทอร์ไบน์ ดังนั้นการเพิ่มจำนวนพัลส์เพื่อต้องการความละเอียดในการวัดค่าของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัด จึงได้นำ Rim Type Rotor มาใช้ วงล้อเป็น Stainless Steel และฝัง High Paramagnetic Soft Iron Alloy Buttons เพื่อเพิ่ม Resolution

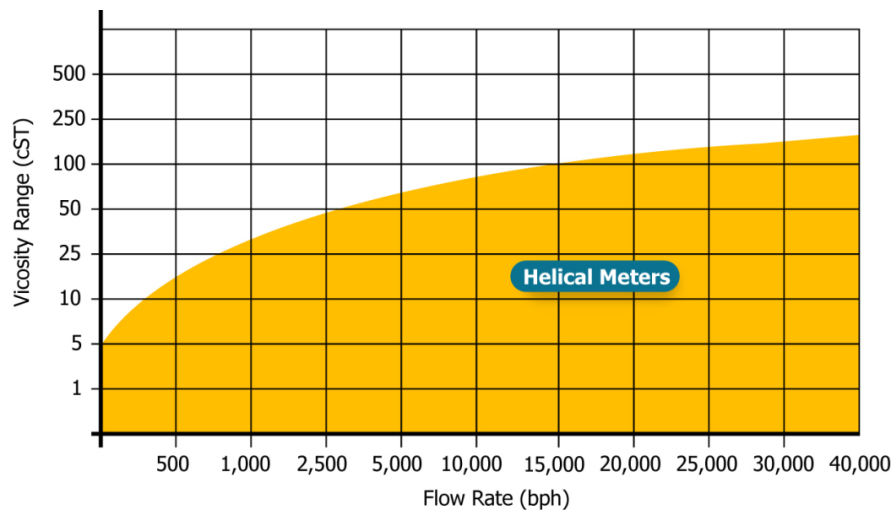


รูปที่ 7-42 Rim Type Rotor

2.3.3.) เทอร์ไบน์โรเตอร์แบบ Helical Type Rotor เหมาะกับของเหลวที่มีความหนืดสูง และทำงานครอบคลุมความหนืดสูงได้ช่วงกว้างโดยไม่ไวต่อการความหนืดเปลี่ยนแปลง ใช้งานกับการวัดของเหลวที่มีความหนืดสูง เช่น น้ำมันดิบ เป็นต้น



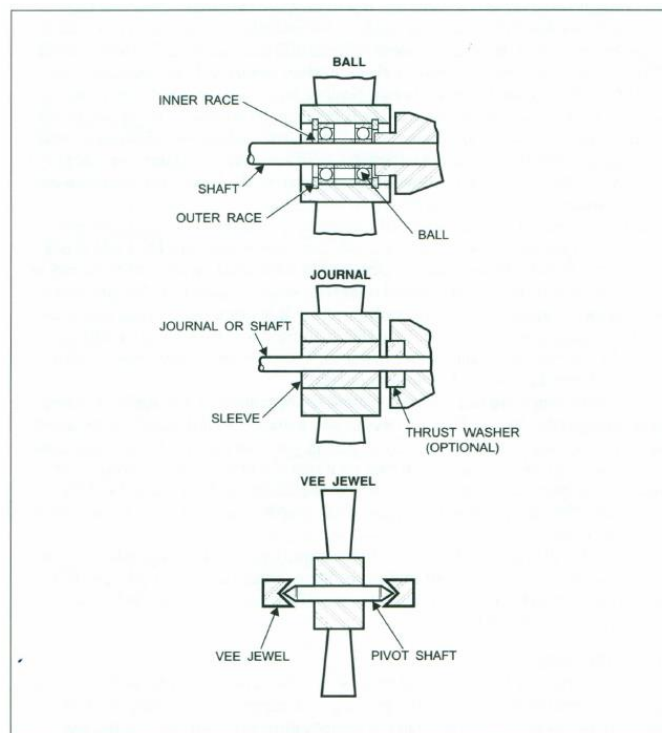
รูปที่ 7-43 Helical Type Rotor



รูปที่ 7-44 ช่วงอัตราการไหลและความหนืดในการเลือกใช้มาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์แบบ Helical Type Rotor

2.4.) Ball or Roller Bearing & Sleeve Bearing

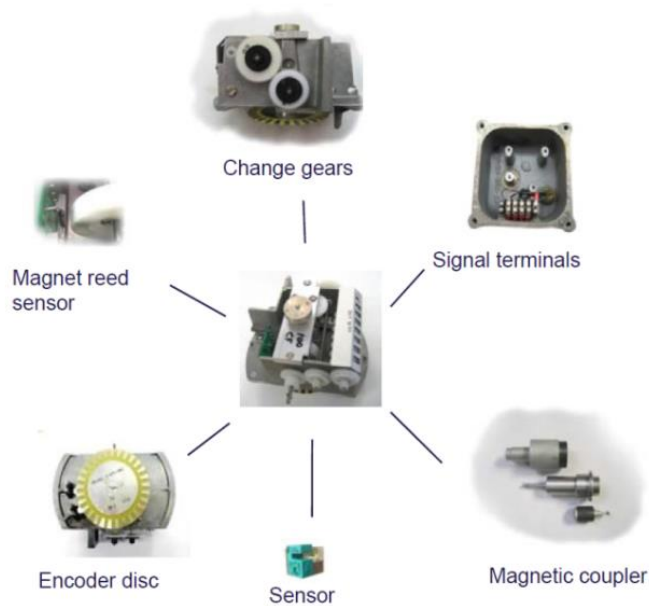
- Sleeve Bearings ถูกเลือกใช้เป็นส่วนใหญ่ วัสดุที่ใช้ทำ เช่น เซรามิก
- Ball Bearings เหมาะกับของเหลวสะอาดจำพวกน้ำมันเบา (Light Hydrocarbon)



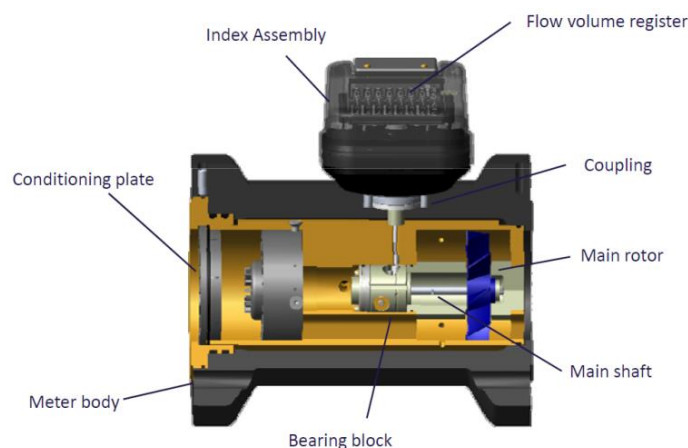
รูปที่ 7-45 ชนิดลูกปืนที่ใช้ในมาตรวัดเทอร์ไบน์ (EG&G Flow Technology)

2.5.) การบันทึกค่าปริมาณ (*Volume Registration*) ทำหน้าที่นับจำนวนรอบการหมุนของโรเตอร์ ด้วย 3 วิธีการ

- กลไกการนับ (Mechanical Counter) ต่อกับเพลลาของโรเตอร์
- นับจำนวนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์พัลส์ (Electronic Pulse Counter) ผลิตโดยการหมุนโรเตอร์
- การส่องฉายแสงแล้วตรวจจับด้วย Optical Instrument



รูปที่ 7-46 ตัวอย่างรูปแบบการบันทึกผลการวัดของมาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์



รูปที่ 7-47 กลไกการนับ (Mechanical Counter) ต่อกับเพลารองโรเตอร์ของมาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์

3.) รูปแบบการไหลของของเหลว (Characterization of Fluid Flow) เนื่องจากรูปแบบการไหลเป็นเรื่องสำคัญต่อหลักการทำงานของมาตรวัดเทอร์ไบน์ เราจึงจำเป็นต้องรู้รูปแบบการไหลภายในท่อที่ติดตั้งมาตรวัด ได้มีการแบ่งรูปแบบการไหลของเหลวโดยใช้ Reynold's Number ซึ่งเป็นค่าไม่มีหน่วย (non-dimensional) ด้วยสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Re}_D &= \frac{\rho v D}{\mu} \\ &= \frac{v D}{\nu} \end{aligned} \quad (\text{Eq.7-2})$$

เมื่อ Re_D = Reynold's number ของท่อ (Based on pipe diameter)
 ρ = ความหนาแน่น , kg/m^3
 ν = ความเร็วเฉื่อยของการไหลภายในท่อ , m/s

- D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ , m
 μ = ความหนืดของของไหล (dynamic viscosity or absolute viscosity) , kg/m.s
 ν = ความหนืดจลน์ (kinematic viscosity) , m^2/s

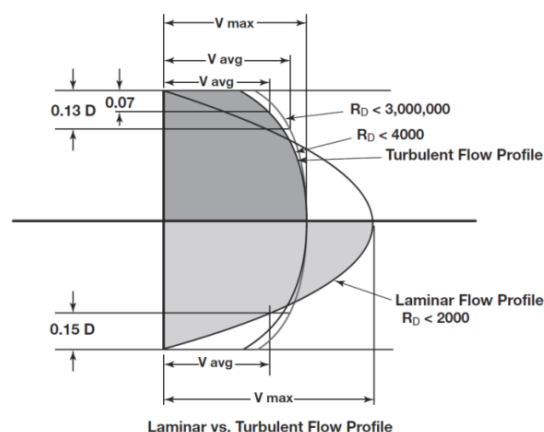
สมการดังกล่าวเป็น Reynold's number ใช้ในกรณีที่ของไหลชนิด Newtonian fluid ได้แก่ น้ำ, น้ำมัน, แก๊สทุกชนิด, ของเหลวหรือสารละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (low molecular-weight liquids or solution), สารละลายหรือ polymeric material ที่หลอมละลาย, พลาสติกเหลว (melted plastics)

ความหมายทางฟิสิกส์ของ Reynold's number มีดังนี้คือ เมื่อพิจารณาเศษส่วนจะได้ว่าค่าของเศษเป็นค่าต่อปริมาตรคูณความเร็วการไหล (ν) นั้นจะหมายถึงโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรของของไหล ; $kg/m^3 \cdot m$ (โมเมนตัมเชิงเส้น $M = mv$) เมื่อนำค่าโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรของของไหลคูณด้วยความยาว ในที่นี้เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อจะได้ผลลัพธ์เป็นโมเมนตัมของโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตร (Moment of momentum per unit volume) จึงสรุปได้ว่าค่าเศษของ Reynold's number จะแสดงถึงค่าแนวโน้มของปริมาตรหนึ่งหน่วยของของไหลที่จะก่อให้เกิดแรงจลน์ (dynamic force) หรือแรงเฉื่อย (inertia force)

หากพิจารณาค่าส่วนของ Reynold's number ค่าความหนืด (viscosity) จะเป็นตัวบ่งบอกให้รู้ถึงแนวโน้มของปริมาตรหนึ่งหน่วยที่จะก่อให้เกิดแรงหนืดหรือแรงเสียดทาน (viscous or frictional forces) จึงพอสรุปได้ว่า Reynold's number เป็นค่าแสดงบ่งบอกถึงสัดส่วนระหว่าง 2 ปริมาณคือ แรงจลน์ กับ แรงเสียดทานว่าในกรณีเฉพาะหนึ่งๆแรงชนิดใดมีผลเด่นกระทำต่อระบบการไหล นั่นคือเมื่อค่า Reynold's number มีค่าสูงมากๆ แรงจลน์ (dynamic force) หรือแรงเฉื่อย (inertia force) จะเป็นตัวควบคุมการไหลทั้งหมดไม่ว่าจะเป็นความดัน, ความเร็วการไหล, ความหนาแน่น และอื่นๆภายในระบบการไหล การไหลจะเป็นแบบ turbulent flow แต่หากว่าค่า Reynold's number มีค่าต่ำมากๆ ปรากฏการณ์การไหลเช่นความเร็วการไหล, การกระจายของความเร็ว (streamline) แทบจะขึ้นอยู่กับแรงหนืด (viscous force) ทั้งหมด การไหลจะเป็นแบบ laminar flow โดยทั่วไปรูปแบบการไหลส่วนใหญ่ที่ใช้ในการซื้อขายส่วนใหญ่จะเป็นรูปแบบการไหลแบบ Turbulent flow นะ

จากการทดลองการไหลภายในท่อเพื่อหา 3 สถานะของการไหล เป็นดังนี้

- การไหลแบบ Laminar Flow $Re_D \geq 2000$
- การไหลแบบ Transient flow (critical zone) $2000 \geq Re_D \geq 4000$
- การไหลแบบ Turbulent flow $Re_D \geq 4000$



รูปที่ 7-48 รูปแบบการไหลภายในท่อเมื่อเทียบกับค่า Reynold's number

4.) ทฤษฎีมาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์ (Theory of Operation - Turbine Flow Meters)

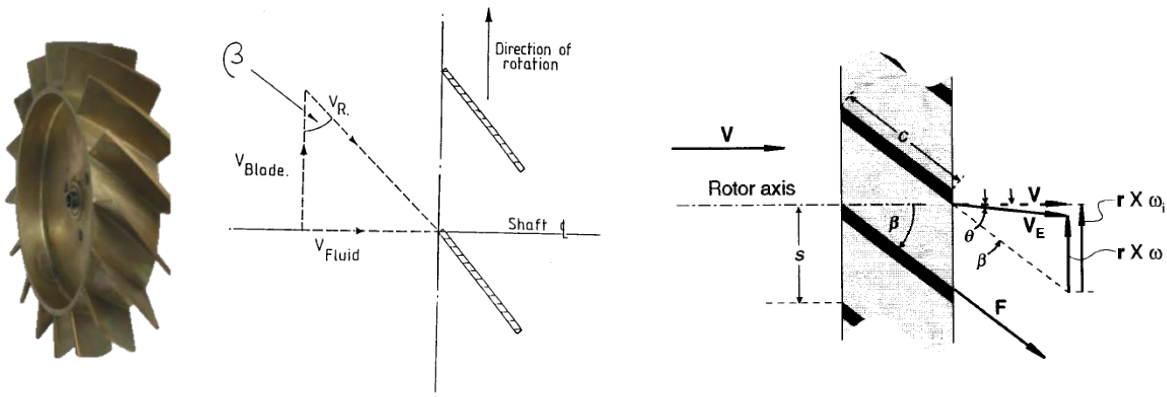
เนื่องจากเป็นเรื่องการสอบเทียบทางด้านปริมาตรคงไม่มีรายละเอียดที่ไปที่มามากนัก จึงยกรวบยอดมาเป็นสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการทำงานของมาตรวัดเทอร์ไบน์เพื่อพอให้เป็นที่เข้าใจ และรู้หลักการการทำงานเพื่อให้การดำเนินการสอบเทียบเราจะได้ระมัดระวังปัจจัยใดที่มีผลต่อการทำงาน

โดยสามารถหาค่าประมาณของค่า “K-Factor” ของมาตรวัดเทอร์ไบน์ เพราะได้แต่ละปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลต่อแรงบิดทวนของโรเตอร์เทอร์ไบน์ อีกทั้งได้ละเอียดรายละเอียดในอีกหลายปัจจัยในการออกแบบมาตรวัดรวมถึง aerodynamic factors เช่น rotor solidity และ flow velocity profile.

$$K = \frac{Q}{\omega}$$

$$= \frac{\tan \beta}{\bar{r}A} - \frac{0.036n(R+a)SA^2 \text{Re}^{-0.2} \sin \beta}{\bar{r}^2} \quad (\text{Eq.7-3})$$

เมื่อ K = pulse per volume unit
Q = อัตราการไหลของเทอร์ไบน์มิเตอร์



เทอร์ไบน์มิเตอร์ในอุดมคติ

$$\frac{\omega_i}{Q} = \frac{\tan \beta}{A \cdot \bar{r}}$$

เทอร์ไบน์มิเตอร์ในการคำนวณจริง

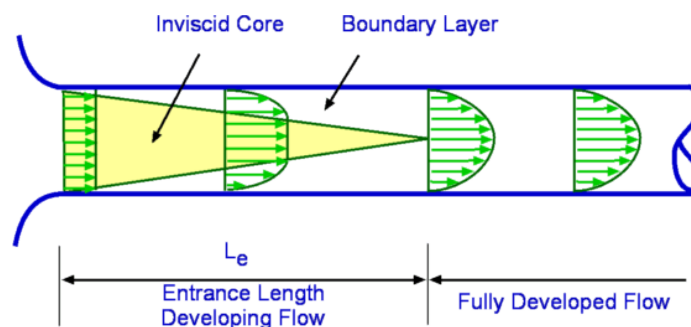
$$\frac{\omega}{Q} = \frac{\tan \beta}{\bar{r}A} - \frac{0.036n(R+a)SA^2 \text{Re}^{-0.2} \sin \beta}{\bar{r}^2}$$

รูปที่ 7-49 เปรียบเทียบค่า K-Factor ในอุดมคติกับการคำนวณจริงเมื่อออกแบบมาตรวัดเทอร์ไบน์

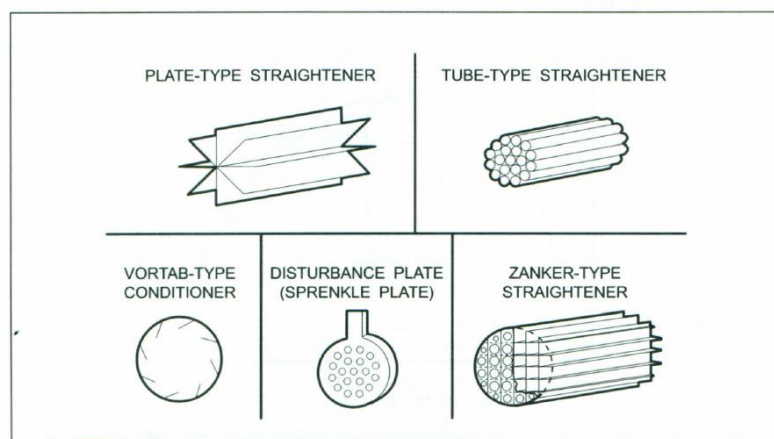
- V = incident fluid velocity vector;
- V_E = exit fluid velocity vector; actual tangential velocity vectors is the rotor slip velocity
- θ = exit flow swirl angle due to rotor retarding torques;
- β = blade pitch angle, same as angle of attack for parallel flow;
- ω = “Actual” rotational speed (rotor angular velocity vector)
- ω_i = “Ideal” rotational speed
- r = rotor radius vector;

- A = Area of the annular flow cross-section
 $\bar{r}$ = Root-mean-square of the inner and outer blade radii, (R , a)
 c = blade chord;
 s = blade spacing along the hub;
 c/s = rotor solidity factor
 n = a rotor with n blades
 S = the blade surface area per side.
 Re = is the flow Reynolds number

5.) การติดตั้งมาตรวัดเทอร์ไบน์ จากที่ได้กล่าวไว้แล้วว่า การคำนวณหาปริมาตรของเหลวที่เคลื่อนไหลผ่านมาตรวัดแต่ละรอบการหมุนของโรเตอร์ ของเหลวดังกล่าวไม่ได้ถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆเหมือนเช่นเดียวกับมาตรวัดชนิด Positive Displacement แต่เป็นการวัดความเร็ว (Velocity) และรูปแบบการไหล (Flow Pattern) ของของเหลวที่ถูกเตรียมการไว้ก่อนเข้ามามาตรวัดและหลังออกมามาตรวัด ดังนั้นการเตรียมรูปแบบการไหลก่อนของเหลวไหลเข้าสู่มาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์ จึงเป็นเรื่องสำคัญ และจำเป็นเพื่อให้ได้รูปแบบการไหลที่สมบูรณ์ของแต่ละรูปแบบการไหลที่สมบูรณ์ (รูปที่ 7-50) เราต้องติดตั้งตัวช่วยที่เรียกว่า “Flow conditioning” ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 7-51 อีกทั้งต้องการระยะทางเดินท่อวิ่งตรงก่อนทางเข้าและหลังทางออกจากมาตรวัดซึ่งพอมิมีระยะทางของท่ออย่างน้อยดังรูปที่ 7-53 ในกรณีที่ท่อน้อยกว่า 2 นิ้ว และในรูปที่ 7-54 ในกรณีที่ขนาดท่อนมากกว่า 2 นิ้วขึ้นไป



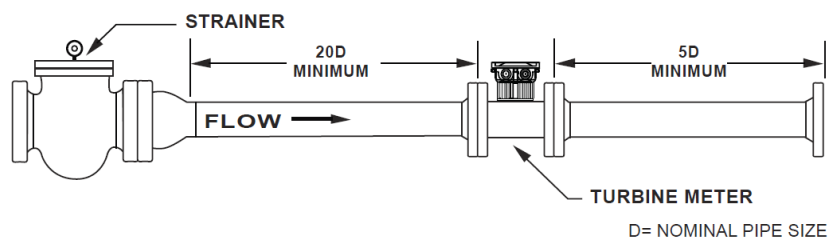
รูปที่ 7-50 การเตรียมการรูปแบบการไหลภายในท่อ



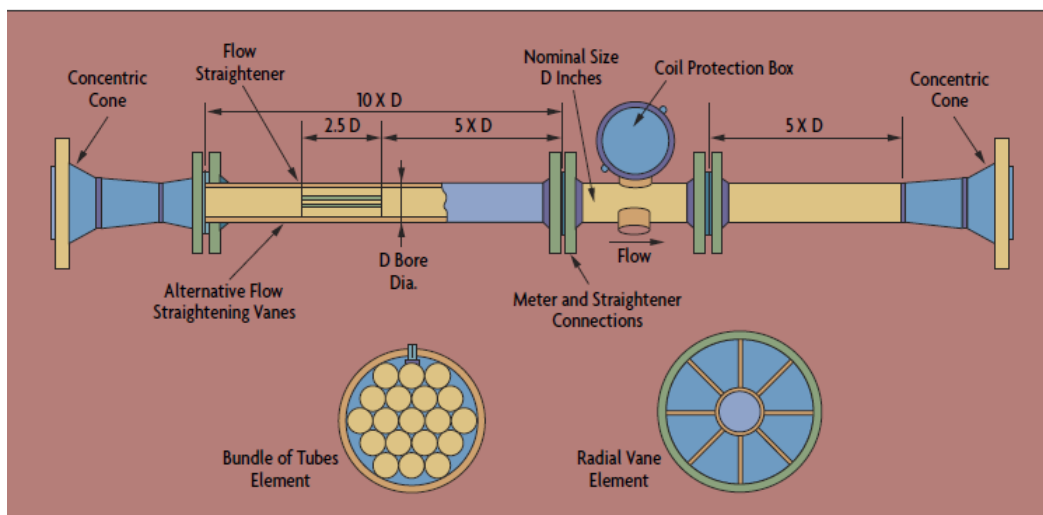
รูปที่ 7-51 ตัว Flow conditionings ใช้ในระบบท่อ



รูปที่ 7-52 ตัว Flow conditionings พร้อมกับมาตรวัด



รูปที่ 7-53 ระยะท่อตรงก่อนทางเข้าและหลังทางออกมาตรวัดเทอร์ไบน์ในระบบท่อขนาดเล็กกว่า Ø 2 นิ้วลงมา



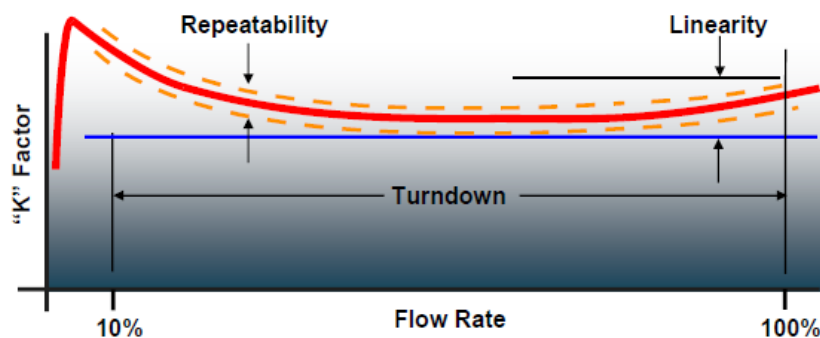
รูปที่ 7-54 ระยะท่อตรงก่อนทางเข้าและหลังทางออกมาตรวัดเทอร์ไบน์ในระบบท่อขนาด Ø 2 นิ้วขึ้นไป



รูปที่ 7-55 ระยะท่อตรงก่อนทางเข้าและหลังทางออกมาตรวัดเทอร์ไบน์ในระบบท่อขนาด Ø 2 นิ้วขึ้นไป

6.) สมรรถนะมาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์ (Turbine Flow Meter Performance) มาตรวัดเทอร์ไบน์ทุกตัวจะมีกราฟแสดงลักษณะจำเพาะเป็นของตัวเอง (Characteristic Curve) ในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเคแฟคเตอร์ (K-factor) กับค่าอัตราการไหล (flowrate) หรืออาจเรียกว่า “Performance curve” ซึ่งจะบรรจุข้อมูล

- ก. **เคแฟคเตอร์ (K-factor)** เป็นค่าสัมประสิทธิ์ประจำตัวของเทอร์ไบน์มิเตอร์มีหน่วยเป็น “พัลส์ (Pulse)/หน่วยปริมาตร” เช่น 440 Pulse/ลูกบาศก์เมตร
- ข. **มิเตอร์แฟคเตอร์ (Meter-factor)**
- ค. **ค่าลักษณะความเป็นเชิงเส้น (Linearity)** เทอร์ไบน์มิเตอร์ที่ดีที่สุดจะมีค่าลักษณะความเป็นเชิงเส้น (Linearity) เข้าใกล้ศูนย์ แต่โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ $\pm 0.25\%$ ของ nominal K-factor; K_n ตลอดช่วงประสิทธิภาพของอัตราการไหล (an effective range of flowrates) หรือ Turndown ration
- ง. **Repeatability**
- จ. **Turndown Ratio** สัดส่วนระหว่างอัตราการไหลสูงสุดเทียบกับอัตราการไหลต่ำสุดของมาตรวัดเทอร์ไบน์ที่ยังคงให้ผลการวัดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เช่น 10:1 เป็นต้น

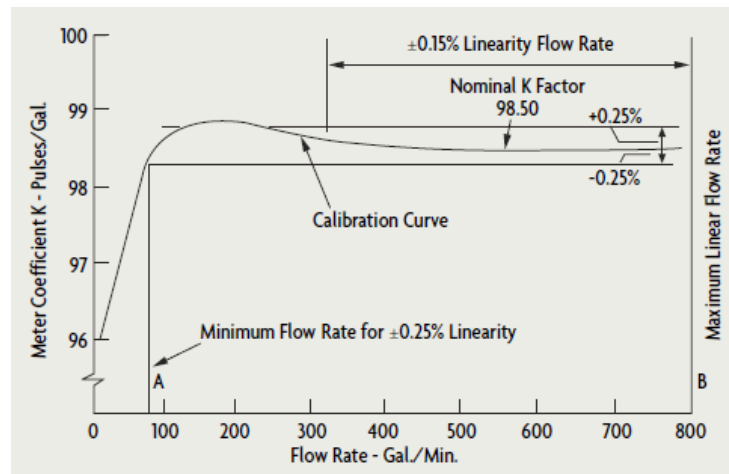


รูปที่ 7-56 ตัว Flow conditionings พร้อมกับมาตรวัด

ในทางอุดมคติ ค่าเคแฟคเตอร์ (K-factor) ของเทอร์ไบน์มิเตอร์จะเป็นเส้นตรงมีค่าคงที่ทุกๆ ที่อัตราการไหล แต่ในความเป็นจริงปกติแล้วค่าเคแฟคเตอร์ (K-factor) จะเปลี่ยนแปลง โดย

1. ช่วงอัตราการไหลต่ำ ส่วนใหญ่มีค่า K-factor มีค่าต่ำ เนื่องจากความเสียดทานของลูกป็นภายในมาตรวัดเทอร์ไบน์มีค่ามากเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วต่ำ ทั้งสูญเสียพลังงานให้กับแรงดูด (pick-up drag) ที่กระทำต่อใบพัดเทอร์ไบน์สูงมากเมื่อโรเตอร์เริ่มหมุน ทั้งนี้ก็เพราะค่า C_D (coefficient of drag) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Reynold' s number มีค่าต่ำ ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถใช้มาตรวัดเทอร์ไบน์วัดอัตราการไหลในช่วงต่ำๆ
2. ช่วงอัตราการไหลใช้งาน ค่าเคแฟคเตอร์ (K-factor) ค่อนข้างมีค่าคงที่หรืออยู่ในย่านที่มีค่าผิดพลาดอยู่ในพิสัย เช่น 0.25% หรือ 0.50%
3. ช่วงอัตราการไหลสูง ค่า K-factor จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เพราะรูปแบบการไหลของเหลวมีลักษณะซับซ้อนและยุ่งเหยิงมาก (Complex Hydrodynamic) ไม่ว่าจะเป็น Velocity Profile, การถ่ายเทโมเมนตัม (Momentum Transfer), ความหนาแน่น,

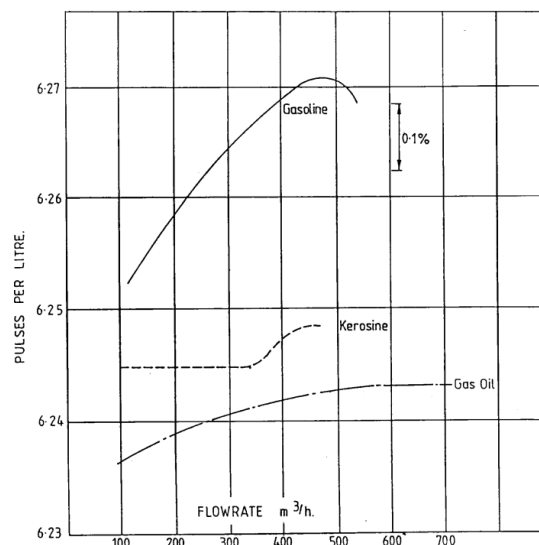
ความหนืด เป็นต้น จะเปลี่ยนแปลงและไม่มีความแน่นอนยากแก่การคาดการณ์ได้หรืออาจจะมี การเกิด Cavitation ภายในตัวมาตรวัดเนื่องจากความดันย้อนกลับ (back pressure) ด้าน ทางออกต่ำเกิดกว่าความดันไอ



รูปที่ 7-57 กราฟสมรรถนะของมาตรวัดเทอร์ไบน์โดยทั่วไป

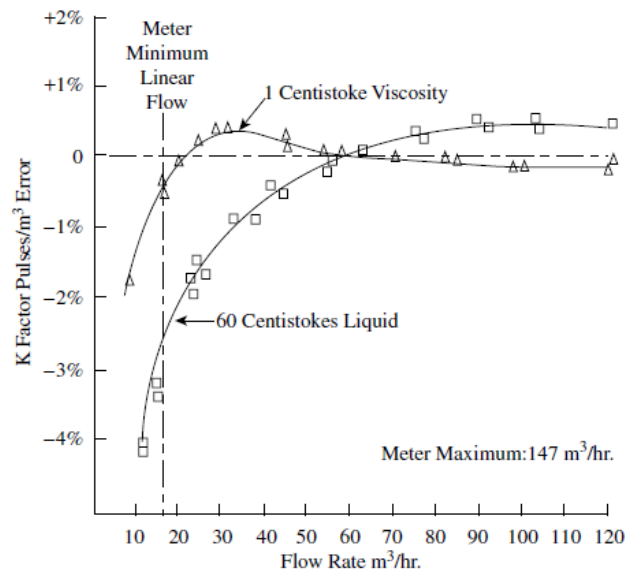
7.) ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของมาตรวัดเทอร์ไบน์

7.1.) ความหนืดของเหลวที่ทำการวัด เนื่องจากมาตรวัดเทอร์ไบน์มีหลักการการทำงานเป็นไปตามรูปแบบของเหลวและคุณสมบัติเฉพาะตัวของเหลวนั้นๆ ส่งผลให้มาตรวัดเทอร์ไบน์ตัวเดียวกันหากเปลี่ยนแปลงชนิดของเหลวซึ่งในเทอมของค่าความหนืดแล้วผลที่ตามมาจะได้ performance curve หรือ accuracy curve ที่แตกต่างกันดังในรูปที่ 7-58 ความหนืดของน้ำมันเบนซินกับน้ำมันก๊าดจะมีค่าใกล้เคียงกัน และจะแตกต่างกับน้ำมันดีเซล (Gas Oil) แต่ผลการสอบเทียบหาค่า K-factor ปรากฏว่าค่า K-factor ระหว่างน้ำมันเบนซินกับน้ำมันก๊าดจะมีค่าแตกต่างกันมากแต่ในขณะเดียวกันน้ำมันก๊าดกับน้ำมันดีเซลจะได้ค่า K-factor ใกล้เคียงกันมากกว่า เช่นเดียวกับในรูปที่ 7-59

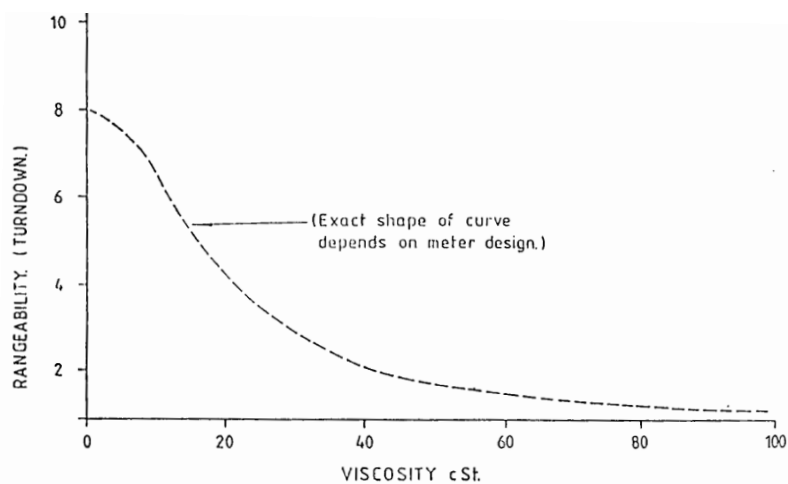


รูปที่ 7-58 กราฟสมรรถนะของมาตรวัดเทอร์ไบน์เมื่อความหนืดของเหลวเปลี่ยน

แต่หากพิจารณาคุณสมบัติของความหนืดของเหลวเราพบว่าคุณสมบัติดังกล่าวก็เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของของเหลวด้วยเช่นกัน ดังนั้นความสัมพันธ์เชิงซ้อนดังกล่าวก็ต้องคำนึงไว้ในใจด้วยเช่นกัน เพราะเมื่อความหนืด (viscosity) เพิ่มขึ้นพบว่า แรงเฉือนเนื่องจากความหนืด (viscous shear force) สำหรับตัวเทอร์ไบน์เพื่อจะหมุนตัวได้ก็เพิ่มขึ้นตามในสัดส่วนของฟังก์ชันพื้นที่ผิวของตัวโรเตอร์ที่สัมผัสของเหลวและพื้นที่ช่องเปิดของตัวโรเตอร์ ส่งผลให้ปลดความสามารถในการหมุนของโรเตอร์ในสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของเหลวที่ต้องการวัด นั่นหมายถึงมีของเหลวไหลผ่านตัวมาตรวัดเทอร์ไบน์ออกไปโดยไม่ถูกวัด ด้วยเหตุนี้ส่วนใหญ่จึงไม่ใช่มาตรวัดเทอร์ไบน์กับของเหลวที่มีความหนืดมากกว่า 50 Centistokes ดังในรูปที่ 7-60



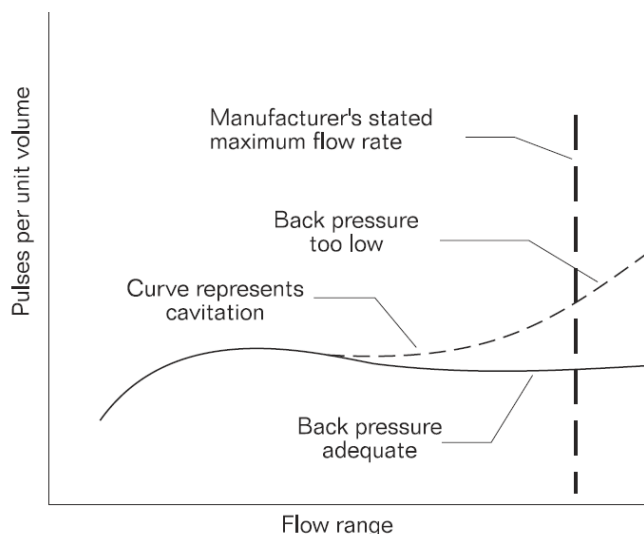
รูปที่ 7-59 กราฟสมรรถนะของมาตรวัดเทอร์ไบน์เมื่อความหนืดของเหลวเปลี่ยนจาก 1 ไปเป็น 60 centistoke



รูปที่ 7-60 ช่วงการวัดได้ (Rangeability) ของมาตรวัดเทอร์ไบน์เมื่อความหนืดของเหลวเปลี่ยนแปลง

7.2.) ความดันย้อนกลับ (Back Pressure) การรักษาความดันย้อนกลับ (Back Pressure) ทางเข้าและทางออกในมาตรวัดเทอร์ไบน์เป็นสิ่งสำคัญในการติดตั้งมาตรวัด เพื่อป้องกันการเกิดปรากฏการณ์

“Cavitation” ซึ่งส่งผลต่อความเที่ยงของมาตรวัด และทำความเสียหายกับตัวมาตรวัด โดยเฉพาะกับของเหลวที่มีค่าความดันไอสูง เช่น LPG



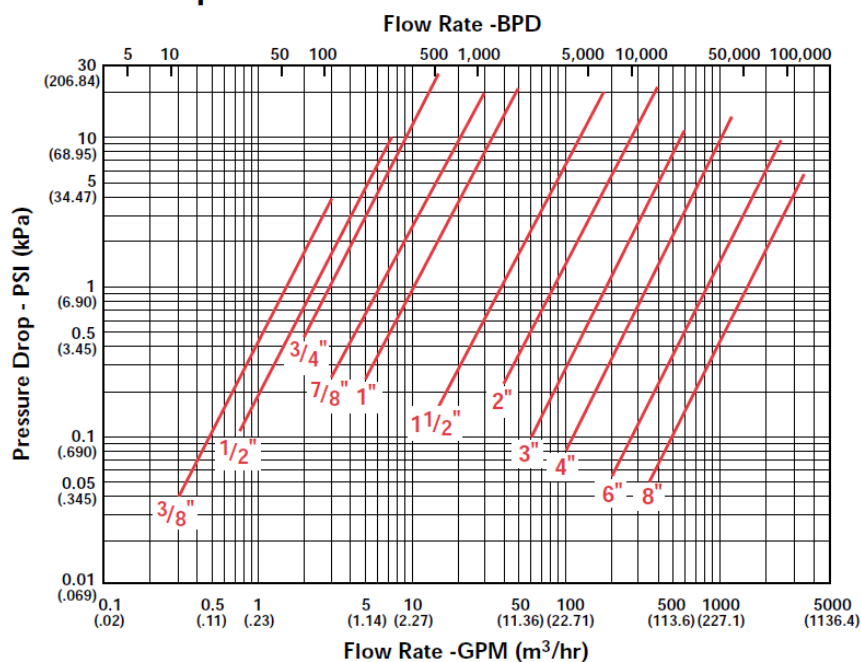
รูปที่ 7-61 ผลกระทบของความดันย้อนกลับด้านทางออกมาตรวัดเทอร์ไบน์ไม่เพียงพอ

ความดันย้อนกลับตามคำแนะนำ API

$$BP = (\Delta P \times 2) + (VP \times 1.25) \quad (\text{Eq.7-4})$$

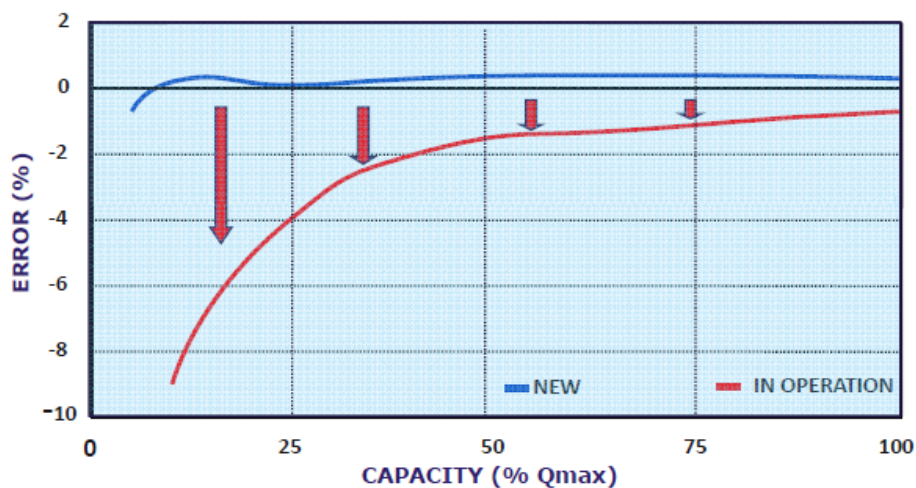
เมื่อ BP = Back pressure
 ΔP = ความดันตกคร่อม (pressure drop) ของมาตรวัดเทอร์ไบน์ที่อัตราการไหลสูงสุด
 VP = ความดันไอสมดุลของเหลวที่อุณหภูมิทำงาน (operating temperature); psia

Pressure Drop Curve for Halliburton Turbine Flow Meters



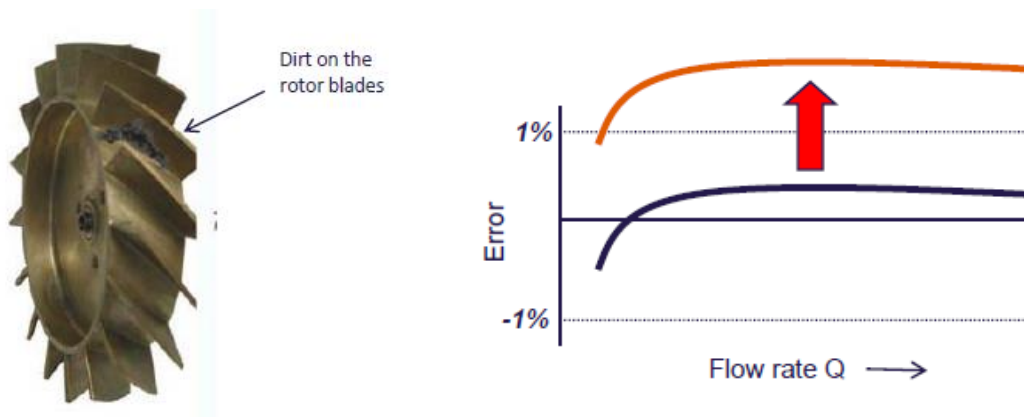
รูปที่ 7-62 ตัวอย่างความสัมพันธ์ความดันตกคร่อมกับอัตราการไหลของมาตรวัดเทอร์ไบน์

7.3.) Impact of Dirt on Turbine Meter เมื่อเวลาผ่านไปการสะสมของสิ่งสกปรกฝุ่นผงที่มา กับของเหลวจะสะสมตัวที่ลูกปืนของโรเตอร์ทำให้ไปหน่วงการหมุนของ Turbine Rotor ส่งผลให้บันทึกปริมาตร น้อยกว่าที่เป็นจริง หรือใช้งานจนครบรอบอายุของลูกปืนจนลูกปืนสึกหรอทำให้ไปหน่วงการหมุนของ Turbine Rotor อย่างรุนแรงในช่วง Low Flow ส่งผลให้สมรรถนะของมาตรวัดเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 7-63



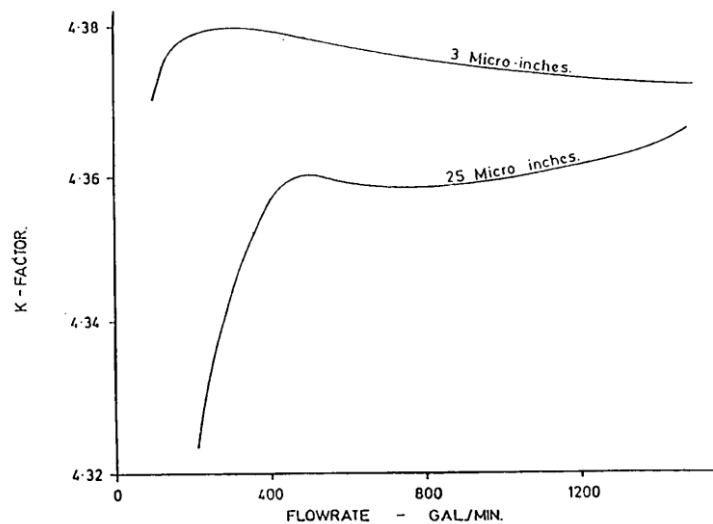
รูปที่ 7-63 ตัวอย่างผลกระทบลูกปืนชำรุดของโรเตอร์ต่อสมรรถนะมาตรวัดเทอร์ไบน์

แต่ในกรณีเมื่อมีฝุ่นหรือผงสะสมบนใบเทอร์ไบน์ หรือปัจจัยอื่นๆ ที่ทำให้ส่วนที่เป็นเทอร์ไบน์เสียสมดุล จะส่งผลให้ Turbine Rotor มีแนวโน้มหมุนเร็วขึ้น มาตรวัดบันทึกผลการวัดปริมาตรสูงเกินจริง ดังรูปที่ 7-64



รูปที่ 7-64 ตัวอย่างผลกระทบการเสียสมดุลของเทอร์ไบน์ต่อสมรรถนะมาตรวัดเทอร์ไบน์

7.4.) ความราบเรียบของลูกปืนหรือ Sleeve ของโรเตอร์ มาตรวัดเทอร์ไบน์ซึ่งมีขนาดและชนิด เดียวกันแต่มีความราบเรียบของผิว (Surface Finish) ลูกปืนแตกต่างกันระหว่าง 3 ไมโครนิ้ว (ราบเรียบกว่า) กับ 25 ไมโครนิ้ว (หยาบกว่า) ผลการสอบเทียบมาตรวัดซึ่งมีความหยาบของผิวต่างกันพบว่าตลอดช่วงอัตราการไหล ลูกปืนผิวหยาบกว่า (25 ไมโครนิ้ว) ไม่เพียงแต่ทำให้ K-Factor มีค่าลดลงไปประมาณ 0.5 % แต่ยังทำให้ช่วงการ วัดได้ (Effective Range) ของมาตรวัดลดลงอีกด้วยเช่นกัน อีกทั้งพบว่าค่า K-Factor ที่ได้มีลักษณะความเป็นเชิง เส้น (Linearity) ไม่ดีพอ ตัวอย่างดังในรูปที่ 7-65



รูปที่ 7-65 ตัวอย่างผลกระทบความเรียบของผิวของ Bearing หรือ Sleeve ของโรเตอร์ต่อสมรรถนะมาตรวัดเทอร์ไบน์

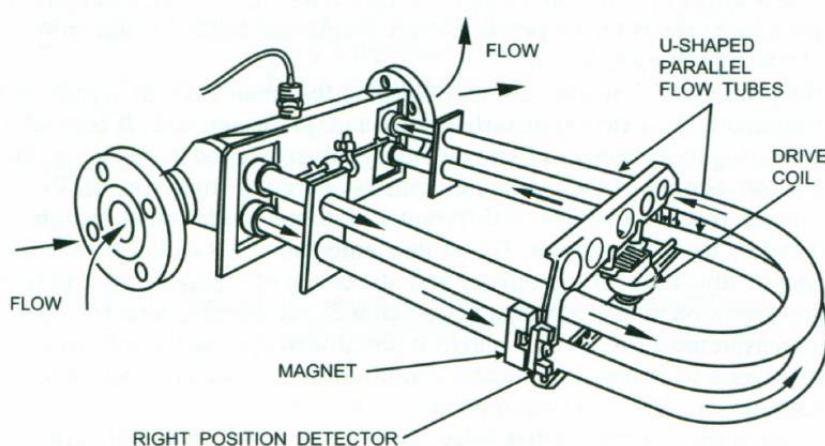
เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อความเที่ยงตรงถูกต้องของมาตรวัดเทอร์ไบน์จึงขอให้พิจารณาในภาพรวมถึงปัจจัยหลักที่มีต่อสมรรถนะของมาตรวัดคือ

1. ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงในเทอมของพื้นที่การไหลของมาตรวัด (flow AREA changes)
 - Erosion
 - Corrosion
 - Deposits and Debris, Waxing
 - Boundary layer thickening (or thinning)
 - Temperature
 - Cavitation
 - Obstructions
2. ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงในเทอมของอัตราส่วนของความเร็วเฉลี่ยของโรเตอร์กับความเร็วเฉลี่ยของเหลวภายในระบบท่อที่ทำการวัด (V_r/V_f)
 - Rotor blade angle and wear (S&W)
 - Rotor stability
 - Rotor bearing friction
 - Viscous drag
 - Fluid density
 - Velocity profile and swirl

ส่วนในรายละเอียดขอให้ผู้มีความสนใจค้นคว้าศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

ค. มาตรวัดมวลคอริออริส (Coriolis Mass Flowmeters)

ในปี ค.ศ. 1835 Gustave-Gaspard de Coriolis ได้พิสูจน์ให้เห็นว่าแรงเฉื่อย (Inertia Force) ซึ่งเกิดขึ้นในการเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้อิทธิพลของความเร็วเชิงมุมจะต้องถูกนำไปพิจารณาถ้ากฎการเคลื่อนที่วัตถุของนิวตัน (Newton's Law of Motion) ถูกใช้กับการเคลื่อนที่ของวัตถุที่เคลื่อนที่บนกรอบมิติอ้างอิงที่กำลังหมุน (Newton's Law of Motion of bodies) เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ปรากฏการณ์คอริออริส (Coriolis Effect)” ดังนั้นเมื่อมีการนำเอาปรากฏการณ์คอริออริสมาประยุกต์ใช้งานเป็นมาตรวัดปริมาตรของเหลว มาตรวัดมวลคอริออริสจึงมีหลักการทำงานที่ว่า แรงเฉื่อย (คอริออริส) ซึ่งเกิดจากการทำให้ท่อวัดสั่นเปลี่ยนแปลงไปจากลักษณะการสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติเดิม (สถานะไม่มีการไหล) เมื่อมีของเหลวไหลผ่านท่อวัดทำให้ท่อวัดบิดเป็นมุมค่าหนึ่งเมื่อวัดเทียบกับระนาบการสั่นของท่อเมื่อยังไม่มีของเหลวไหลผ่าน มุมที่ถ่วงวัดดังกล่าวจะถูกแปลงไปเป็นค่าการวัดอัตราการไหลมวล



รูปที่ 7-66 โครงสร้างโดยทั่วไปของมาตรวัดมวลคอริออริส (Micro Motion, Inc.)

$$W = \frac{k_s \theta}{4\omega r L} \quad (\text{Eq. 7-5})$$

โดยนิยาม $\Delta T = \frac{\theta}{\omega}$

$$W = \frac{k_s \omega \Delta T}{4r \omega L} = \frac{k_s}{4r L} \cdot \Delta T \quad (\text{Eq. 7-6})$$

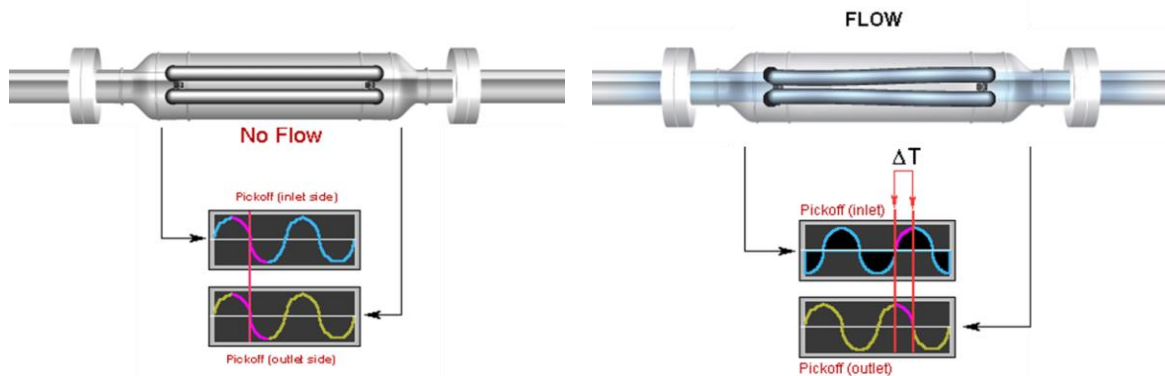
- เมื่อ
- W = อัตราการไหลมวล
 - k_s = the stiffness of the tube ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า modulus of elasticity ของวัสดุที่ใช้ทำท่อวัด (flow tube) ซึ่งจะมีค่าคงที่และแปรผันเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิ
 - θ = ค่ามุมการบิดตัวของท่อวัดซึ่งหาระยะมุมการบิดตัวได้ด้วยตัวตรวจจับตำแหน่ง (magnetic position sensors) จำนวน 2 ตัว
 - ω = ค่าความเร็วเชิงมุมที่ทราบจากบริษัทผู้ผลิตเนื่องจากท่อวัดถูกกระตุ้นโดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (electromagnetic devices) หรือตัวกำเนิดสั่นสะเทือน

(drive coil) ให้เส้นที่ความเร็วเชิงมุมค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าความถี่ธรรมชาติของท่อวัด

L = ความยาวท่อวัด โดยค่า r และค่า L เป็นค่าคงที่สามารถหาค่าจากบริษัทผู้ผลิต

ΔT = ช่วงระยะเวลาที่แตกต่างของท่อวัดที่จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเดียวกัน

$\frac{k_s}{4rL}$ = Flow calibration factor หรือที่เรียกว่า F.C.F



รูปที่ 7-67 ผลต่างความถี่ของท่อวัดสันคืดเป็นเวลา ΔT ขณะมีของเหลวไหลผ่านท่อ (FLOW) กับไม่มีของเหลวไหลผ่านท่อ (NO FLOW) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการไหลมวลของเหลว

จากสมการข้างบนนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลมวล (the mass flow rate) ที่จุดใดๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงเฉพาะกับช่วงระยะเวลา ΔT หรือช่วงระยะเวลาที่แตกต่างของท่อวัดที่จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเดียวกัน ในขณะที่ท่อวัดมีของเหลวไหลผ่านท่อเทียบกับขณะที่ท่อวัดไม่มีของเหลวไหลผ่าน และค่าคงที่ทางเรขาคณิตและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำท่อวัดเท่านั้น อีกทั้งพบว่า W ไม่ขึ้นกับความถี่ของการสั่นของท่อวัด ω แต่อย่างใด

สำหรับค่าของแรง k_s ซึ่งต้านทานต่อการบิดตัวของท่อวัดนั้นมีค่าขึ้นอยู่กับค่า modulus of elasticity ของวัสดุที่ใช้ทำท่อวัดซึ่งจะมีค่าคงที่แต่จะแปรผันเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ แต่เนื่องจากค่าของแรง k_s เป็นค่าที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วยสัดส่วนคงที่เมื่อเทียบกับค่า modulus of elasticity ของวัสดุที่ใช้ทำท่อวัด ดังนั้นในระหว่างที่ทำการวัดอัตราการไหลมวลจึงจำเป็นต้องทำการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิติดอยู่กับท่อวัด เช่น platinum RTD เมื่ออุณหภูมิของท่อวัดมีการเปลี่ยนแปลงเครื่องวัดอุณหภูมิจะส่งสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ไปยังหน่วยประมวลผลเพื่อทำการปรับค่าของ k_s ให้ถูกต้อง เพื่อให้ผลคูณค่าของ k_s และค่าช่วงระยะเวลา ΔT ให้ค่าอัตราการไหลมวลที่ถูกต้องแม่นยำ

เราสามารถจัดรูปแบบสมการ (Eq.7-6) ได้ในอีกรูปแบบหนึ่ง คือ

$$W = F.C.F \cdot \Delta T \quad (\text{g/sec}/\mu\text{sec}) (\mu\text{sec}) \quad (\text{Eq.7-7})$$

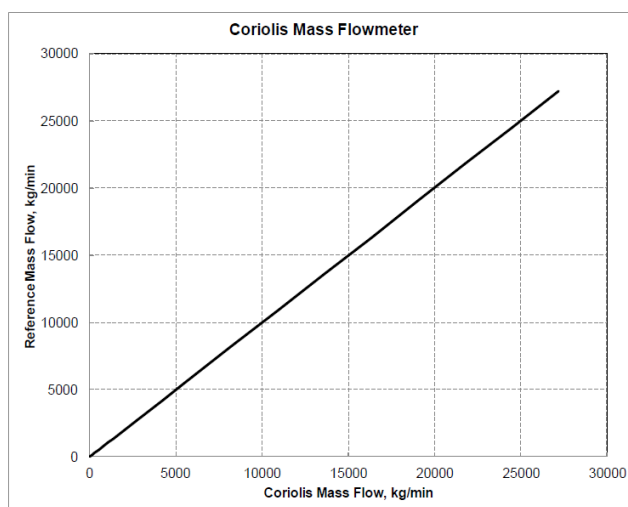
โดยค่า F.C.F เป็นค่าที่บ่งบอกว่า มาตรวัดมวลคอริสซอริสต้องการอัตราการไหลในหน่วย กรัมต่อวินาที (g/sec) ค่าหนึ่งเพื่อทำให้กราฟสัญญาณความเร็วที่วัดได้จาก sensor pickoff เลื่อนไป (shift) วัดเป็นผลผลต่างเวลา ΔT เท่ากับ $1\mu\text{sec}$ (ดูรูปที่ 7-67) แต่หากเวลาเริ่มต้นเมื่อไม่มีการไหลมวล เกิดการ shift curve ไปแล้ว ΔT_0 (residual phase at zero flow) ดังนั้นจะได้สมการอัตราการไหลมวล

$$W = F.C.F \cdot (\Delta T - \Delta T_0) \quad (\text{Eq.7-8})$$

พิจารณาสมการข้างบนจะเห็นว่าอยู่ในรูปสมการเส้นตรง $y = mx + b$ นั่นเอง ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของตัวแปร 2 ตัวจึงเป็นความสัมพันธ์ของเครื่องชั่งตวงวัดที่มนุษย์คิดค้น และเป็นเครื่องชั่งตวงวัดที่ระบบหนึ่งนั่นเอง จัดรูปสมการใหม่เป็น

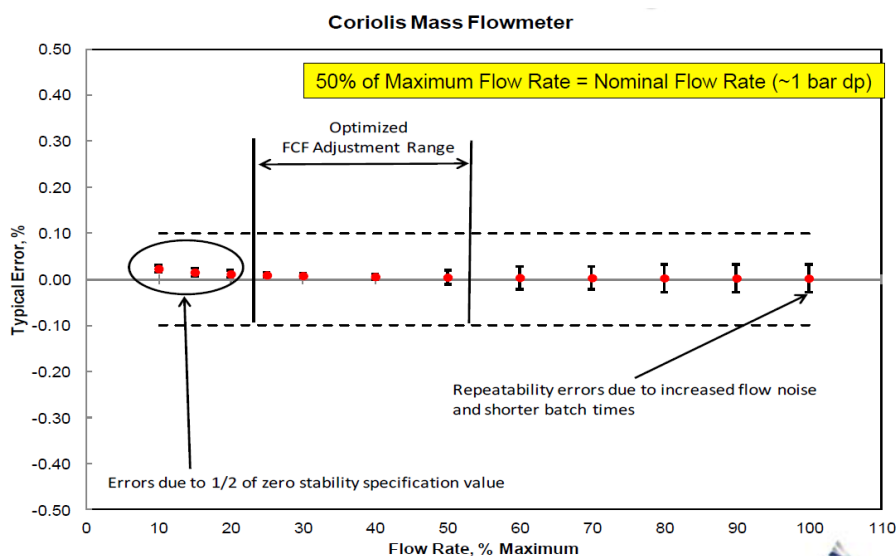
$$W = F.C.F \cdot \Delta T - (F.C.F \cdot \Delta T_0) \quad (\text{Eq.7-9})$$

โดยค่าความชันของกราฟเส้นตรง (m) คือ F.C.F และค่าตัดแกน y ก็คือ $-(F.C.F \cdot \Delta T_0)$ นั่นเองหรืออาจเรียกว่า “zero offset” ก็ได้ ทั้งนี้เพื่อให้มาตรวัดมวลคอริโอลิสมีผลการวัดเป็นสัดส่วนโดยตรงเมื่อเทียบกับผลการวัดของแบบมาตรฐานดังตัวอย่างในรูปที่ 7-68 สังเกตในรูปดังกล่าวจะให้ค่า Meter Factor (MF) เท่ากับ 1.00000 ที่ทุกอัตราการไหลมวล



รูปที่ 7-68 มาตรวัดมวลคอริโอลิสที่ดีควรมีความสัมพันธ์เชิงเส้นและเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแบบมาตรฐาน

โดยเชื่อกันว่า มาตรวัดมวลคอริโอลิสแต่ละตัวจะมีค่าคงที่ที่เรียกว่า Flow calibration factor (F.C.F) ประจำตัวที่ไม่เหมือนใคร และเมื่อสามารถหาค่า F.C.F ดังกล่าวได้ถูกต้องโดยผู้ผลิตทำการสอบเทียบแล้วค่า F.C.F ดังกล่าวนั้นจะถูกต้องและใช้ได้ตลอดช่วงการวัดได้ของมาตรวัดมวลคอริโอลิส



รูปที่ 7-69 การปรับ F.C.F

ด้วยเหตุนี้ในขั้นตอนการสอบเทียบ (calibration) จึงเป็นการหา “zero offset” และหาค่าความคลาดเคลื่อนอัตราการไหล (mass flow error) ณ ช่วงอัตราการไหลที่พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด (minimized error) และเป็นช่วงอัตราการไหลต่ำกว่าอัตราการไหลสูงสุดเพื่อปรับค่า F.C.F โดยผู้ผลิตมาตรวัด แต่ในทางปฏิบัติแล้วอัตราการไหลมวลจะถูกประเมินจากสมการ

$$W = F.C.F \cdot F_T \cdot F_P \times (\Delta T - \Delta T_0) \quad (\text{Eq.7-10})$$

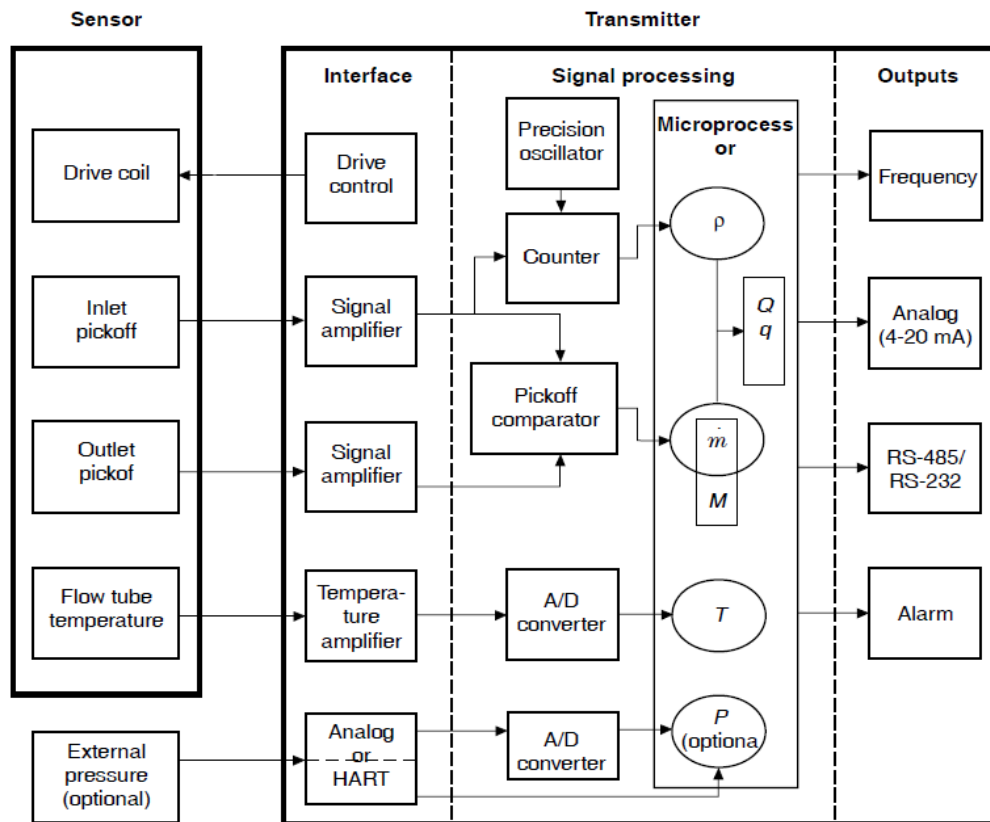
$$F_T = 1 - \frac{K_T T_{FT}}{100} \quad (\text{Eq.7-11})$$

$$F_P = 1 + \frac{K_P (P_{FT} - P_{cal})}{100} \quad (\text{Eq.7-12})$$

เมื่อ	F_T	= การชดเชยอุณหภูมิ (temperature compensation)
	K_T	= Temperature Coefficient มีค่าความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงระหว่าง Young's modulus กับ อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ทำท่อวัด (flow tube) (%/°C) เช่น ท่อวัดทำด้วย 316L จะมีค่า 4.2%/100 °C
	T_{FT}	= อุณหภูมิของวัสดุที่ใช้ทำท่อวัด ปกติได้จากเครื่องวัด RTD ประจำมาตรวัด (°C)
	F_P	= การชดเชยความดัน (pressure compensation)
	K_P	= Pressure Coefficient for flow ของมาตรวัดแต่ละโมเดล (%/psig)
	P_{FT}	= ความดันของเหลวขณะวัด (operating fluid pressure) ภายในท่อวัด (psig)
	P_{cal}	= ความดันของเหลวเมื่อทำการสอบเทียบจากโรงงาน (fluid pressure during calibration) ภายในท่อวัด (psig)
	ΔT	= phase induced by the flowing (μsec)
	ΔT_0	= residual phase at zero flow) (μsec)

รูปที่ 7-70 การทำงานของมาตรวัดคอริออริสหลังจากส่วนตรวจวัด (sensor unit) วัดอัตราการไหลมวลผลการวัดในรูปสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์จะถูกส่งจาก Pickoff ทั้ง 2 ตัวไปยังตัวถ่ายทอดสัญญาณ (transmitter) ของตัวมาตรวัดเพื่อประมวลผลสัญญาณจากนั้นตัวถ่ายทอดสัญญาณจะส่งข้อมูลออกไปยังอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อปลายทางต่อไปเช่น ส่วนแสดงค่า (display device), flow computer เป็นต้น เพื่อแปลงสัญญาณดังกล่าวเป็นอัตราการไหลมวล สัญญาณด้านทางออกส่วนใหญ่จะมี 2 รูปแบบคือสัญญาณอนาล็อก และสัญญาณดิจิทัล ในรูปแบบของสัญญาณอนาล็อก เช่น ค่ากระแสไฟ (2-40 mA output), ค่าความถี่ (frequency output), ค่า discrete output เป็นต้น ส่วนสัญญาณด้านทางออกในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัล เช่น Modbus/RS-485 เป็นต้น ทั้งนี้ระดับหรือปริมาณของสัญญาณจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอัตราการไหลมวลของมาตรวัด

ในที่นี้เราจะพูดถึงเฉพาะสัญญาณด้านทางออกในรูปแบบของสัญญาณอนาล็อก ในค่าความถี่ (frequency output) ซึ่งโดยปกติจะถูกกำหนดให้เป็นสัญญาณพื้นฐานของการถ่ายทอดสัญญาณไปยังส่วนแสดงค่าเพื่อบ่งบอกอัตราการไหลของมาตรวัดคอริออริส ถือหลักการที่ว่าความถี่ด้านทางออกสูงสุดของตัวถ่ายทอดสัญญาณเป็นตัวแทนของอัตราการไหลมวลสูงสุดของมาตรวัด แต่หากมีความจำเป็นในทางด้านวิศวกรรมสามารถ



รูปที่ 7-70 ไดอะแกรมประมวลผลสัญญาณมาตรฐานวัดมวลคอริออริส

เปลี่ยนแปลงปรับลดเพิ่มค่าความถี่ที่เหมาะสมหรือที่ต้องการให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ปลายทางได้แต่ก็ต้องคำนึงถึงความถี่ที่ผลิตได้ของอุปกรณ์ต้นทางคือตัวถ่ายทอดสัญญาณ (transmitter) ด้วยเช่นกัน เช่นอุปกรณ์ปลายทางบางตัวรองรับความถี่ได้สูง 20,000 Hz หรือบางตัวอาจรองรับความถี่ได้ 2,000 Hz เป็นต้นแต่ตัวถ่ายทอดสัญญาณของมาตรวัดสามารถผลิตได้ 10,000 Hz การส่งสัญญาณด้านทางออกของมาตรวัดก็สามารถส่งออกไปยังอุปกรณ์ปลายทางที่รับสัญญาณได้ 20,000 Hz แต่ตัวถ่ายทอดสัญญาณดังกล่าวไม่สามารถส่งสัญญาณ 10,000 Hz ไปยังอุปกรณ์ปลายทางที่รองรับความถี่ 2,000 Hz เพราะอุปกรณ์ปลายทางรับสัญญาณที่สูงกว่า 2,000 Hz ไม่ได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปรับลดความถี่ด้านทางออกจากมาตรวัดด้วยตัวถ่ายทอดสัญญาณ (transmitter) เป็นตัวแทนของอัตราการไหลมวลสูงสุดของมาตรวัดก็สามารถทำได้แต่ต้องมีค่าไม่เกินความถี่ด้านทางออกสูงสุดของตัวถ่ายทอดสัญญาณ ภายใต้วิธีการที่เรียกว่า “Frequency Output Scaling Method”

$$\text{Frequency Factor} = \frac{\text{Rate Factor}}{T} \times N \quad (\text{Eq.7-13})$$

เมื่อ Frequency Factor = ค่าความถี่ที่ต้องการแสดงผลการวัดอัตราการไหลมวล ค่าความถี่นี้ต้องอยู่ภายในช่วงขอบเขต Frequency output ของตัวถ่ายทอดสัญญาณ (transmitter) ของตัวมาตรวัด เช่น 0 – 10,000 Hz หน่วย Hz

Rate Factor = อัตราการไหลมวลสูงสุดของมาตรวัดที่ต้องการให้ในรายงานผลในรูปแบบของค่าความถี่ (kg/min, kg/hr)

T = แฟคเตอร์ที่ใช้ในการแปลงหน่วยเวลาใดๆ ของอัตราการไหลมวลให้มีค่าเป็น วินาที เช่นอัตราการไหลมวล หน่วย kg/min จะได้ว่า T = 60 หน่วย kg/hr จะได้ว่า T = 3600

ตัวอย่างเช่นมาตรวัดมวลคอโรอริสมีอัตราการไหลสูงสุด 100 kg/min มีค่า K-Factor 500 pulse/kg ใช้ Micro Motion Transmitter 1700 จะได้ว่าสัญญาณความถี่ด้านทางออกจากมาตรวัดมีค่าความถี่

$$\text{Frequency Factor} = \frac{100}{60} \times 500 = 833.333 \text{ Hz}$$

หรือพูดอีกนัยหนึ่งว่า ที่ 1 Hz แทนค่าอัตราการไหลมวลเท่ากับ $(100 \text{ kg/min} \times 1000 \text{ g/kg}) / (833.33 \text{ Hz} \times 60 \text{ sec/min}) = 2.00 \text{ g/sec}$ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้ควรนำไปพิจารณาการใช้เครื่องซึ่งว่าควรมีค่าชั้นหมายตรวจรับรอง (e) และพิกัดกำลังเครื่องซึ่งเท่าใดในการสอบเทียบมาตรวัดด้วยวิธีการ Gravimetric Method ต่อไป



รูปที่ 7-71 ตัวถ่ายทอดสัญญาณ (transmitter) และการติดตั้ง (Micro Motion Model 2700)

สำหรับการคำนวณค่า K-Factor ของมาตรวัดมวลคอโรอริสพบว่า ค่า K-Factor จะไม่เหมือนกับมาตรวัดของเหลวโดยทั่วไป เช่น มาตรวัดเทอร์ไบน์ มาตรวัดปริมาตรของเหลว PD ทั่วไป เนื่องจากค่า K-Factor ของมาตรวัดมวลคอโรอริสสามารถปรับค่าได้ตามความเหมาะสมของส่วนประมวลผลซึ่งรับสัญญาณต่อจากมาตรวัดมวลคอโรอริส ตัวอย่างเช่นในกรณีที่สัญญาณบ่งบอกค่าอัตราการไหลที่ส่งออกจากมาตรวัดไปประมวลผลอยู่ในรูปของความถี่ จึงมีข้อจำกัดแบ่งเป็น 2 กรณี คือ

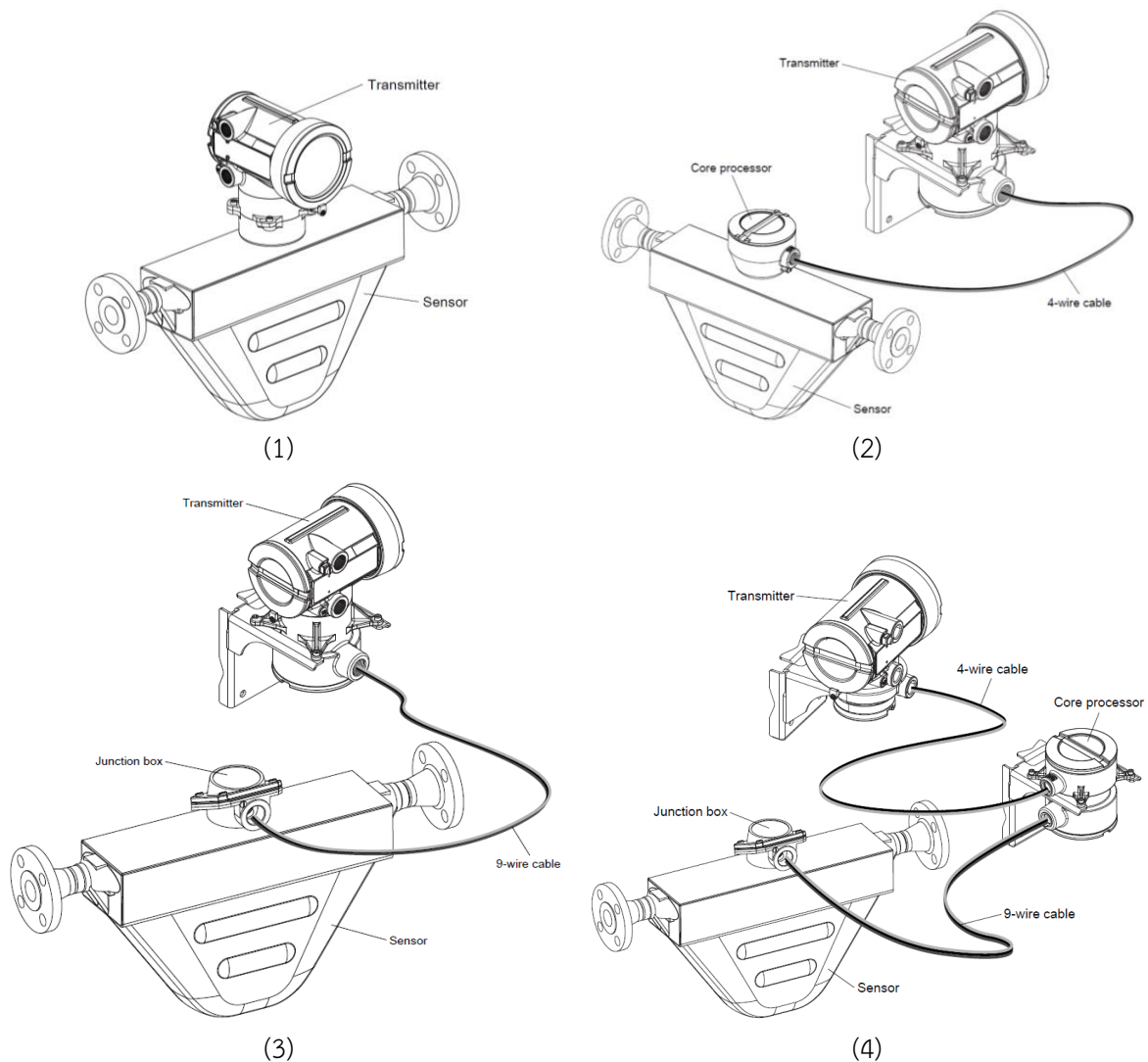
1. ความถี่ที่มาตรวัดส่งออกไปต้องไม่เกินความถี่สูงสุดของตัวถ่ายทอดสัญญาณ (transmitter) ของตัวมาตรวัดเอง และ
2. ความถี่ที่มาตรวัดส่งออกไปต้องไม่เกินความถี่สูงสุดของอุปกรณ์ปลายทาง เช่น ส่วนประมวลผลซึ่งรับสัญญาณต่อจากมาตรวัดมวลคอโรอริส

จากเงื่อนไขในกรณีแรก และปรับใช้ในการหา Frequency Factor นำไปสู่การจำกัดค่า K-Factor สูงสุดของมาตรวัดจึงต้องไม่เกิน

$$K - \text{Factor}_{\text{Max.}} = \frac{f_{\text{TRM-Max.}} \times 60}{Q_{\text{max}}} \quad (\text{Eq.7-14})$$

เมื่อ $K - \text{Factor}_{\text{Max.}}$ = ค่า K-Factor สูงสุดของมาตรวัดมวลคอโรอริส หน่วย pulse/kg

- $f_{TRM-Max.}$ = ความถี่สูงสุดของตัวถ่ายทอดสัญญาณ (transmitter) ของตัวมาตรวัด เช่นในกรณีตัว Transmitter 1000, 2000, และ 3000 series ของยี่ห้อ Micro Motion จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 10,000 Hz หรือ 10,000 pulses/sec
- $Q_{Max.}$ = อัตราการไหลสูงสุดของมาตรวัดมวลคอรีออริส หน่วย kg/min



รูปที่ 7-72 รูปแบบการติดตั้งของมาตรวัดคอรีออริส (1) Integral installation (2) 4-wire remote installation (3) 9-wire remote installation type (4) Remote core processor with remote sensor installation type (Micro Motion)

ตัวอย่างเช่นมาตรวัดมวลคอรีออริสมีอัตราการไหลสูงสุด 100 kg/min โดยใช้ Micro Motion Transmitter 1700 จะได้ว่าหากต้องการส่งสัญญาณด้านทางออกจากมาตรวัดด้วยความถี่สูงสุด 10,000 Hz เราสามารถปรับให้มาตรวัดมีค่า K-Factor สูงสุดไม่เกิน

$$K - Factor_{Max.} = \frac{10,000 \times 60}{100} = 600 \text{ pulses/kg}$$

เพื่อให้การสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาณของเหลวดำเนินการไปด้วยความเรียบร้อย ผู้ทำการสอบเทียบจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่ต้องเรียนรู้และทราบหลักการทำงานตลอดจนข้อดี ข้อเสีย ข้อจำกัดของมาตรวัดแต่ละชนิดเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาในการสอบเทียบ อีกทั้งให้ได้มาซึ่งความแม่นยำถูกต้องน่าเชื่อถือในผลการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาณของเหลวเหล่านั้นๆ เราขอสรุปภาพกว้างๆ ของมาตรวัดดังตารางที่ 7-1

รายการ	Flowmeter		
	PD	Turbine	Coriolis Mass
Recommended Service	Clean & Viscous Liquids, Clean Gases		Clean, Dirty & Viscous Liquids, Gases, Some Slurries
Turn Down Ratio	10 to 1	20 to 1	10 to 1
Pressure Loss	High	High	Medium to High
Accuracy	0.5%	0.25%	to 0.1% in liquids & to 0.35% in gas
Repeatability	±0.05%	-	-
Straight Run Required	None	5 to 10D Upstream	None
Viscosity Effect	High	High	None
Relative Cost	Medium	High	High
Sizes	12" (1/2" – 12") ใหญ่มากไม่ได้เนื่องจากมีชิ้นส่วนกลไกมาก	> 1/4"	> 1/2"
Connections	Flanged	Flanged	Flanged & Clamp-on Design
Type of Output	Linear	Linear	Linear

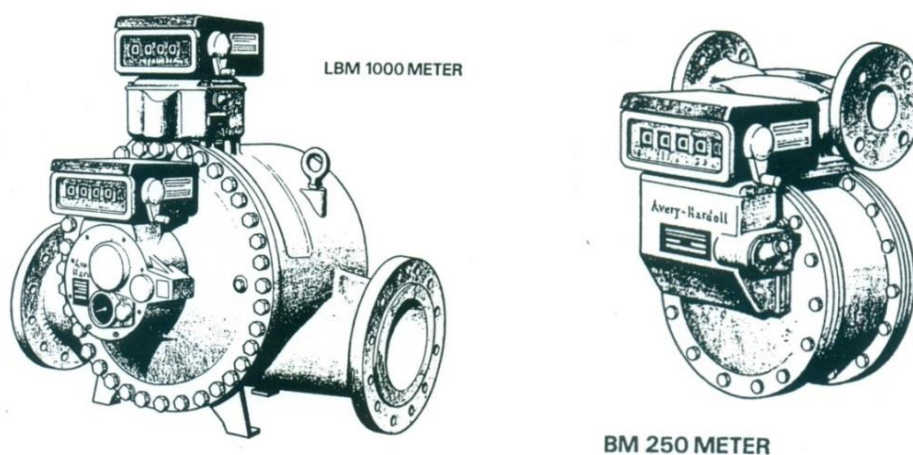
ตารางที่ 7-1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของมาตรวัดปริมาณของเหลวแต่ละหลักการทำงาน

มาตรวัดปริมาณของเหลวทั่วไป (Flowmeter) กับมาตรวัดแบบมาตรา (Master Meter) แตกต่างกันอย่างไรร

ความแตกต่างทั้งด้านความเที่ยงและราคากระหว่างมาตรวัดปริมาณของเหลวทั่วไปกับมาตรวัดแบบมาตรา ย่อมแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดจนอยู่แล้ว แต่เพื่อให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นเราอาจสังเกตได้ว่ามาตรวัดแบบมาตราจะได้รับการออกแบบพิเศษขึ้นโดยให้มี

1. ต้องสามารถวัดอัตราการไหลที่ใช้งานอยู่ได้
2. มี Meter error น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.15%
3. มีค่า Linearity น้อยกว่า 0.15%

4. มีส่วนวัดหรือส่วนแสดงค่าปริมาตรที่วัดได้ทั้งหยาบและละเอียด
5. มีส่วนวัดและแสดงอัตราการไหลขณะใช้งาน
6. มีมาตรวัดความดันติดประจำ
7. มีเทอร์โมมิเตอร์ที่สามารถวัดอุณหภูมิของของเหลวที่ไหลผ่าน
8. มีวาล์วด้านทางออกสำหรับปิด-เปิด
9. มีตัวปรับ (adjust device) สำหรับปรับความเที่ยง (accuracy)
10. ได้รับการออกแบบพิเศษ เช่น ในกรณี Rotating-Vane PD METER ตัวเรือนจะเป็น Double-case



รูปที่ 7-73 ลักษณะทั่วไปของมาตรวัดแบบมาตรา (Avery Hardoll)

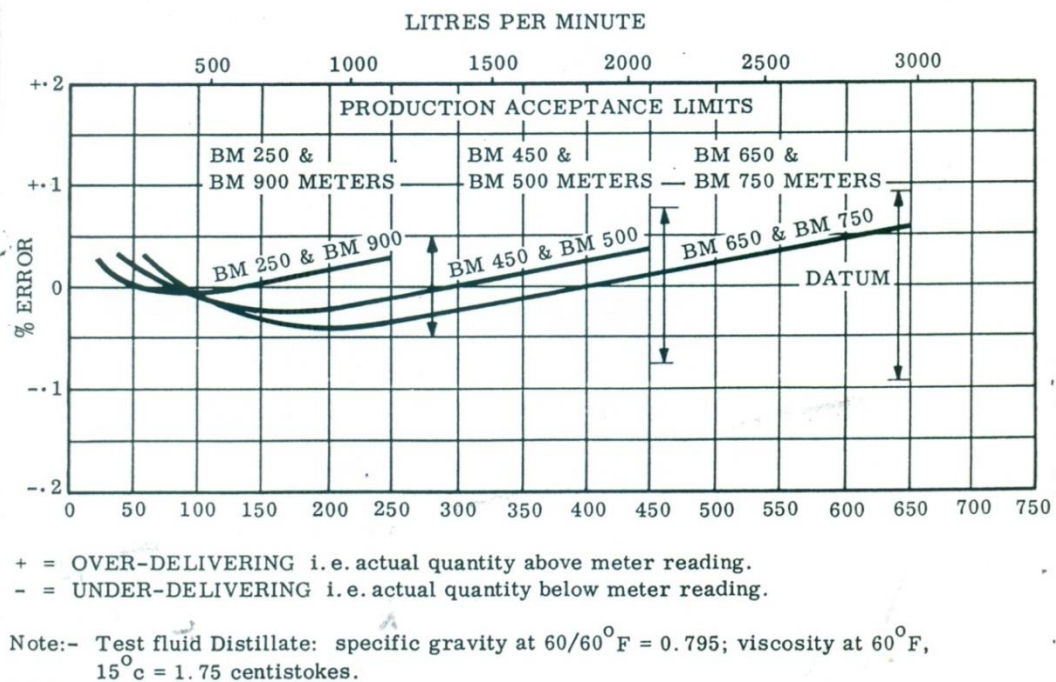
ก่อนที่เราทำการสอบเทียบและ/หรือตรวจสอบให้คำรับรองไม่ว่าจะเป็นมาตรวัดปริมาตรของเหลวโดยทั่วไป หรือมาตรวัดแบบมาตรา เราควรเรียกหา “Performance Curve” หรือ “Accuracy Curve” จากเจ้าของหรือผู้ครอบครองมาตรวัดดังกล่าว ตัวอย่างเช่นในกราฟดังรูปที่ 7-74 เนื่องจากการสอบเทียบและ/หรือตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวสุดท้ายก็เพื่อทำการยืนยันว่า มาตรวัดปริมาตรของเหลวเหล่านั้นๆ ยังคงมีสมรรถนะเป็นไปตามที่ผู้ผลิตผลิตออกมาหรือไม่ และเมื่อผ่านเวลาการใช้งานไปแล้วช่วงระยะเวลาหนึ่งแล้ว มาตรวัดปริมาตรของเหลวยังคงมีสมรรถนะไม่เบี่ยงเบนไปจากที่กำหนดไว้หรืออาจเบี่ยงเบนในช่วงที่ยอมรับได้ด้วยเหตุนี้เราจึงต้องทำการทดสอบที่อัตราการไหลที่ Q_{max} , $0.8Q_{max}$, $0.6Q_{max}$, $0.4Q_{max}$, $0.2Q_{max}$ และ Q_{min} (เป็นการกำหนดค่าอัตราการไหลที่ควรเป็น แต่ถ้าหากไม่สามารถทดสอบที่อัตราการไหลดังกล่าวหรือทำไม่ได้ก็ให้กระจายช่วงอัตราการไหลทดสอบให้ครอบคลุมช่วงการใช้งานก็แล้วกัน) เพื่อหา Meter Factor หรือ Meter Error นั้นเองและหากผลการสอบเทียบบ่งบอกว่าค่า Meter Factor หรือ Meter Error เบี่ยงเบนไปจนเกินกว่ายอมรับได้ นั้นหมายถึงเป็นเวลาอันเหมาะสมของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ต้องเข้ารับการซ่อมแซมหรือจัดหามาตรวัดใหม่มาทดแทน แต่หากในกรณีเจ้าของหรือผู้ครอบครองมาตรวัดไม่ยินยอมให้ Performance Curve หรือ Accuracy Curve หรือท่านไม่รู้ หรือจะด้วยเหตุใด เราก็ทำการเขียนกราฟบนความสัมพันธ์อัตราการไหลกับ Meter Factor หรือ Meter Error เอาเองเลย และเก็บประวัติไว้เพื่อใช้ตรวจทานในการสอบเทียบครั้งต่อไป

ระบบการวัดปริมาตรของเหลว

ระบบการวัดปริมาตรของเหลว หมายความว่า ระบบที่ประกอบด้วยมาตรวัดปริมาตรของเหลว อุปกรณ์ควบ และอุปกรณ์เสริมเพื่อให้มาตรวัดปริมาตรของเหลวในระบบการวัดปริมาตรของเหลวทำงานอยู่บนพื้นฐานเดียวกันและมีมาตรฐานการติดตั้งเดียวกัน

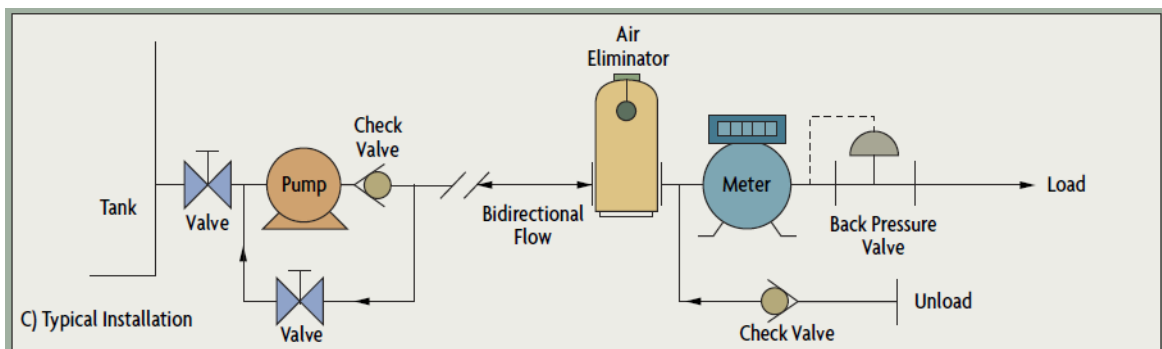
อุปกรณ์ควบ หมายความว่า อุปกรณ์ใช้งานพิเศษเฉพาะที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับผลของการวัด เช่น ส่วนตั้งศูนย์ ส่วนพิมพ์ค่า ส่วนแสดงราคา ส่วนแสดงผลรวม ส่วนแปลงค่า หรือ ส่วนตั้งปริมาณจ่ายล่วงหน้า

TYPICAL ACCURACY CURVES



รูปที่ 7-74 ตัวอย่างกราฟสมรรถนะของมาตรวัด (Performance Curve หรือ Accuracy Curve)

อุปกรณ์เสริม หมายความว่า ส่วนหรืออุปกรณ์ที่นอกเหนือจากอุปกรณ์ควบที่จำเป็นต้องใช้เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นในผลการวัดอย่างถูกต้อง หรือมุ่งใช้เพื่อช่วยให้การดำเนินการในการวัดสะดวกยิ่งขึ้น หรือเป็นอุปกรณ์ที่มีผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัด เช่น เครื่องกำจัดไอ ไล์กรอง ปัม วาล์ว หรือท่อ



รูปที่ 7-75 องค์ประกอบที่สำคัญของระบบการวัดปริมาตรของเหลว

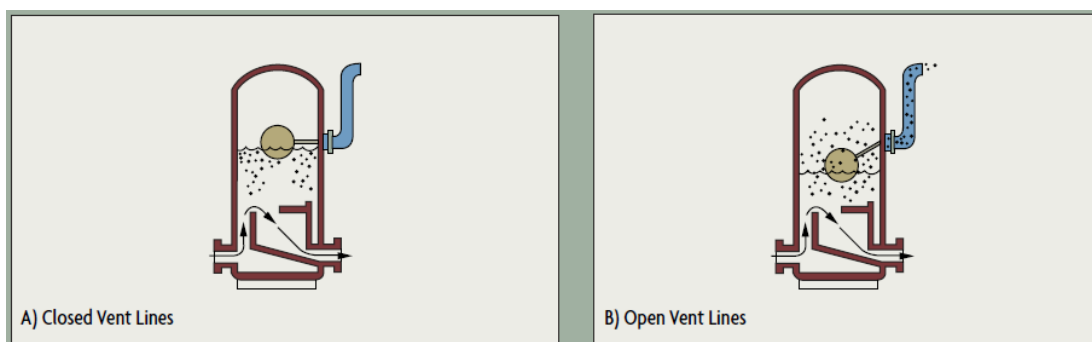
เราจำเป็นต้องกำหนดองค์ประกอบหลักในระบบการฯ ที่สำคัญและจำเป็นที่มีทำการติดตั้งไว้คือ

1. Air/Gas Eliminator เครื่องกำจัดไอน้ำหรืออากาศ หรือวิธีการอัตโนมัติอื่นที่ป้องกันไม่ให้ไอน้ำหรืออากาศผ่านเข้าไปในมาตรวัดขณะทำการวัด ตามที่เราได้กล่าวมาแล้วว่า เราต้องการวัดปริมาณของเหลวที่มีสถานะเดียว (single phase) คือสถานะของเหลวเท่านั้น หากมีไอน้ำหรืออากาศเล็ดลอดเข้าระบบจะส่งผลต่อขีดความสามารถมาตรวัดปริมาณของเหลวทันที

สาเหตุที่มีอากาศหรือฟองก๊าซเข้ามาในระบบท่อได้มีหลากหลายสาเหตุ เช่น ระดับของเหลวภายในถังเก็บของเหลวมีระดับต่ำเมื่อปั๊มดูดจนเกิดการไหลวน (Vortex) อากาศจึงถูกดูดเข้ามา, เกิดความดันตกคร่อมระหว่างตัววาล์วต่ำกว่าความดันไอของของเหลวจนทำให้ของเหลวกลายเป็นไอ, ปั๊มมีแรงดูดมากจนอากาศเล็ดลอดเข้าทางซีลเพล่าปั๊ม, การติดตั้งวาล์วกันกลับในตำแหน่งที่ผิดส่งผลให้มีของเหลวระบายออกไปทำให้มีช่องอากาศภายในระบบท่อ, ถึงจุดเก็บของเหลวโดนแสงแดดตลอดเวลาจนของเหลวมีอุณหภูมิสูงเกิดการระเหยการเป็นไอน้ำได้ง่ายเมื่อถูกปั๊มดูดออกไป เป็นต้น

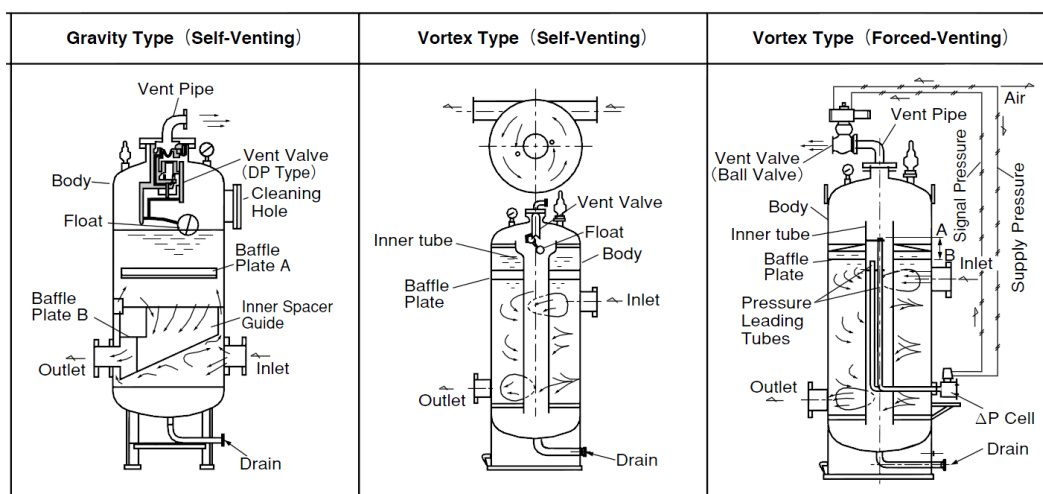
โดยทั่วไป Air/Gas Eliminator จะมีหลักการทำงานด้วยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Principle) ประกอบกับการหน่วงความเร็วการไหลของของเหลวที่ต้องการนำฟองอากาศหรือก๊าซออกไปจากระบบ โดยอัตราการปลดปล่อยฟองอากาศหรือก๊าซออกไปถูกควบคุมด้วยความดันย้อนกลับ (back pressure) เพื่อยังคงรักษาความดันย้อนกลับภายใน Air/Gas Eliminator ให้ยังคงอยู่ที่ประมาณ 8-10 psi ซึ่งสามารถรักษาสภาพความดันภายในให้สูงกว่าความดันไอของของเหลวเหล่านั้นๆ จึงพบว่าของเหลวยังมีความหนืดสูง Viscosity อากาศหรือฟองอากาศที่ปรากฏอยู่ภายในของเหลวยังลอยตัวขึ้นมาแยกตัวจากของเหลวยังช้าลง ดังนั้นอัตราการไหลและความหนืดของเหลวจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเลือกใช้ Air/Gas Eliminator ดังนั้นจึงมีข้อพิจารณาโดยภาพกว้างๆ ได้ว่า

- ของเหลวมีความหนืดต่ำ (low Viscosity) เช่น alcohols, gasoline & solvents
- ของเหลวมีความหนืดปานกลาง (Medium Viscosity) เช่น diesel fuel & fuel oils อากาศหรือฟองอากาศจะปลดปล่อยได้ดีที่ความเร็วของเหลวต่ำ ซึ่งจะมีส่วนสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับขนาดท่อ ($Q = VA$) แต่ไม่สามารถแยกตลอดตัวได้ดีเมื่อความเร็วของเหลวสูง ดังนั้นแก้ไขโดยต้องใช้ปริมาณถังของ Air/Gas Eliminator ใหญ่ขึ้น
- ของเหลวมีความหนืดสูง (High Viscosity) ซึ่งมีค่าความหนืดสูง > 150-170 cSt หรือ 700-800 SUU อากาศหรือฟองอากาศแทบจะมีโอกาสปลดปล่อยได้ยาก ต้องใช้ถังใหญ่มากเป็นพิเศษ

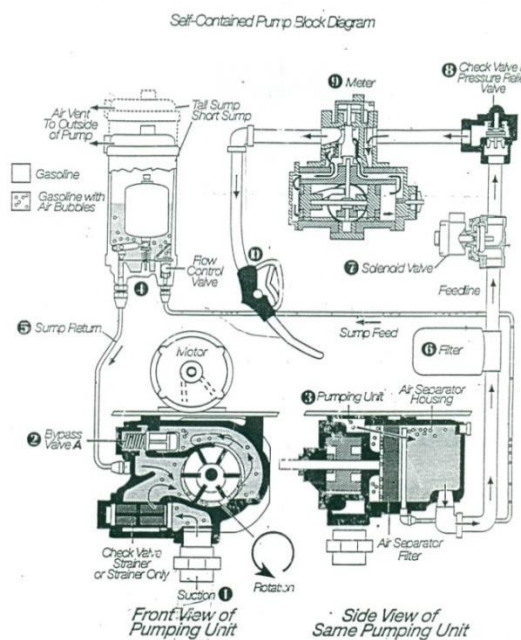


รูปที่ 7-76 Air/Gas Eliminator หลักการทำงาน Gravity Principle

ตัวอย่างลักษณะการทำงานของเครื่องกำจัดไอหรืออากาศ (รูปที่ 7-76) คือ ลดความเร็วของเหลวเพื่อให้ของเหลวอยู่ในถังเป็นเวลานานพอที่จะยอมให้อากาศและโอเลอยตัวขึ้นเหนือผิวหน้าของเหลวขึ้นไปยังส่วนบนของถังตัวแยกอากาศ/ไอ ส่งผลให้ระดับของเหลวภายในถังตัวแยกอากาศ/ไอ ลดลง วาล์วไล่อากาศ (Float-Activated Vent Valve) เปิดไล่อากาศ/ไ้ออกจากตัวแยกอากาศ/ไอ แต่ถ้าหากอากาศหรือโอเลผสมอยู่ในของเหลวซึ่งอยู่ในรูปของฟองเล็กๆตัวแยกอากาศจะไม่สามารถแยกอากาศ/ไอ เนื่องจากระยะเวลาที่ของเหลวอยู่ในตัวแยกอากาศ/ไอน้อยมาก ไม่เพียงพอที่จะทำให้ฟองอากาศ/ไอลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนได้ สำหรับการออกแบบกำหนดขีดความสามารถของ Air/Gas Eliminator ให้มีขนาดเพียงพอต่อการทำงานของระบบต้องได้รับการออกแบบทางด้านวิศวกรรมที่ถูกต้อง นอกจาก Air/Gas Eliminator มีหลักการทำงานด้วยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Principle) แล้วยังใช้หลักการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเป็นหลักการการทำงานที่เรียกว่า Vortex Principle ดังรูปที่ 7-77

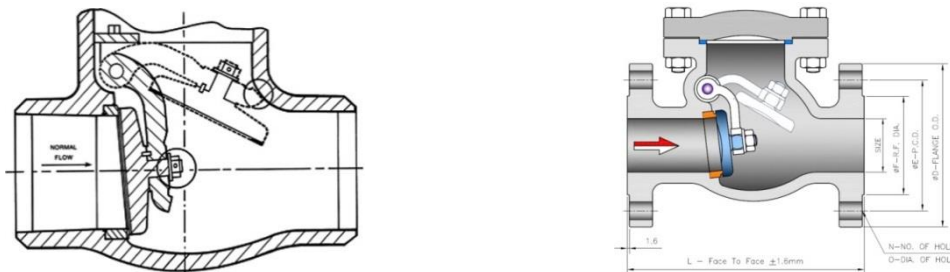


รูปที่ 7-77 Air/Gas Eliminator หลักการทำงาน Gravity Principle และ Vortex Principle



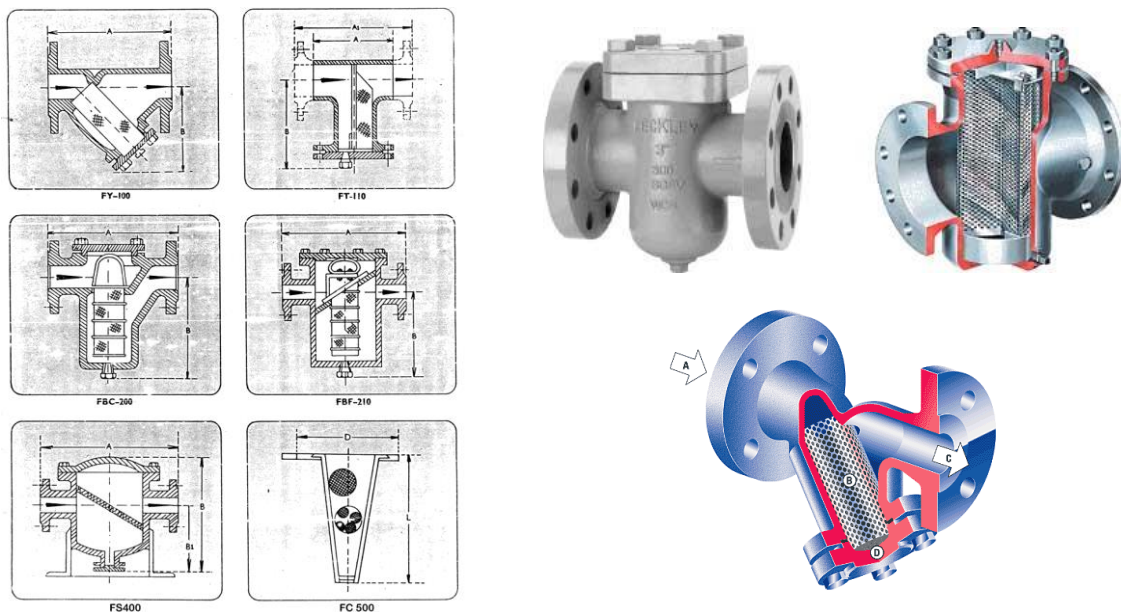
รูปที่ 7-78 Air/Gas Eliminator ในตู้จ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงตามสถานีบริการ

2. Check Valve หรือ วาล์วกันกลับ วาล์วป้องกันการไหลย้อนกลับหรือวิธีการป้องกันการไหลย้อนกลับใดๆ เพื่อไม่ให้ของเหลวไหลซึ่งผ่านมาตรวัดแล้วไหลย้อนกลับสู่มาตรวัดปริมาณของเหลวอีกทำให้เป็นการวัดปริมาณซ้ำๆ จนการแสดงผลการวัดคลาดเคลื่อนเกินความเป็นจริง หลักการทำงานอาจมีหลากหลาย ตัวอย่างดังในรูปที่ 7-79



รูปที่ 7-79 วาล์วกันกลับ

3. ตัวกรอง (Strainer or Filter) เพื่อให้มั่นใจว่าเราสามารถรักษามาตรวัดปริมาณของเหลวจากการที่มีสิ่งของหรืออนุภาคของแข็งหลุดรอดเข้าไปยังห้องวัดและส่วนวัดทำให้ชิ้นส่วนได้รับความเสียหาย โดยเฉพาะมาตรวัดชนิด PD ซึ่งจะมี clearance ระหว่างชิ้นส่วนที่อยู่กับที่และชิ้นส่วนเคลื่อนน้อยมากหากมีอนุภาคของแข็งหลุดเข้าไปอาจทำให้เกิดรอยขีดข่วนหรือเพิ่มระยะ clearance ดังกล่าวจนเกิดการไหลเล็ดลอดสูงขึ้น



รูปที่ 7-80 Strainer หรือตัวกรอง

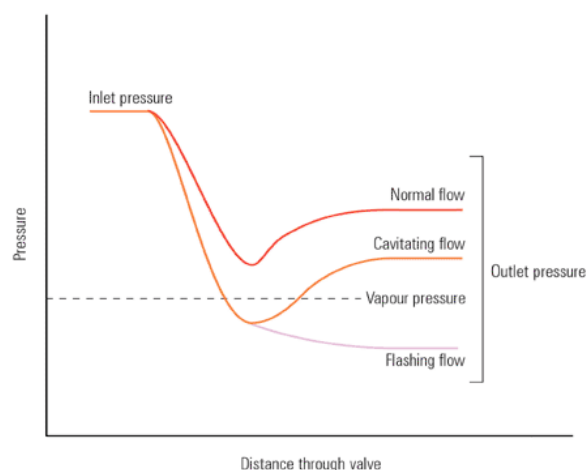
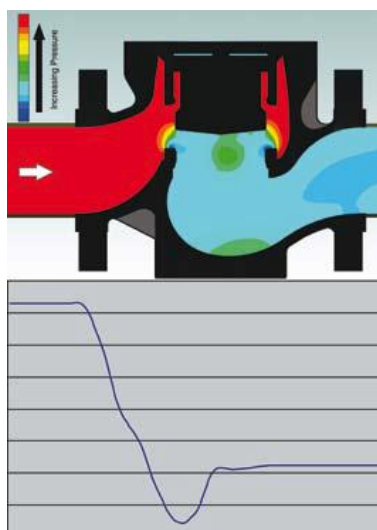
4. เครื่องวัดอุณหภูมิและความดัน (Temperature & Pressure Devices) จำเป็นต่อระบบการวัดด้วยมาตรวัดโดยเฉพาะการวัดปริมาณส่งจ่ายผลิตภัณฑ์ของเหลวปิโตรเลียม เครื่องวัดอุณหภูมิและเครื่องวัดนอกจากต้องมีความละเอียดในการอ่านค่าและมีความแม่นยำแล้วต้องได้รับการสอบเทียบจากห้องปฏิบัติการที่สามารถสอบย้อนกลับไปยังแบบมาตราแห่งชาติได้ ในระบบท่อหรือระบบการวัดปริมาณของเหลวซึ่งได้รับการ

ติดตั้ง Temperature sensor / Pressure sensor แล้วต่อ transmitter ไปยังส่วนประมวลผลการวัดและแสดงค่าผลการวัดแล้วควรจัดให้มี Thermowell สำหรับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบพกพาเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลการวัดกับเครื่องวัดอุณหภูมิซึ่งติดตั้งตายตัวอยู่ในระบบเท่านั้นๆ ด้วย

5. วาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow Control Valve) โดยปกติแล้วจะถูกติดตั้งภายในระบบการวัดปริมาณของเหลวด้วยมาตรวัดปริมาณของเหลวบริเวณด้านทางออกของมาตรวัดในระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อทำการควบคุมและรักษาอัตราการไหลผ่านมาตรวัดให้อยู่ภายในช่วงอัตราการไหลสูงสุดของมาตรวัดซึ่งยังคงสามารถทำงานได้ไม่เป็นอันตรายเสียหาย และที่ช่วงอัตราการไหลต่ำสุดโดยไม่เกิด Cavitation เป็นอันตรายเสียหายต่อตัวมาตรวัด (ดูรูปที่ 7-82) นอกจากนี้ยังรักษาความดันย้อนกลับ (Back Pressure) ภายในระบบการวัดปริมาณของเหลว (Meter Run) ให้ความดันด้านทางออกของมาตรวัดยังคงมีความดันสูงกว่าความดันไอของของเหลวเพื่อให้ของเหลวภายในมาตรวัดยังคงมีสถานะของเหลวตลอดเวลาทำการวัดปริมาณรวมทั้งป้องกันและไม่ให้เกิด Cavitation (ดูรูปที่ 7-84) ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายกับมาตรวัดได้ทันทีภายในช่วงระยะเวลาอันสั้น เช่นอาจจะเกิดหลุมเล็กๆ (pitting) บนผิวหน้าแผ่นเวน (vane) หรือภายในตัวเรือนมาตรวัดได้



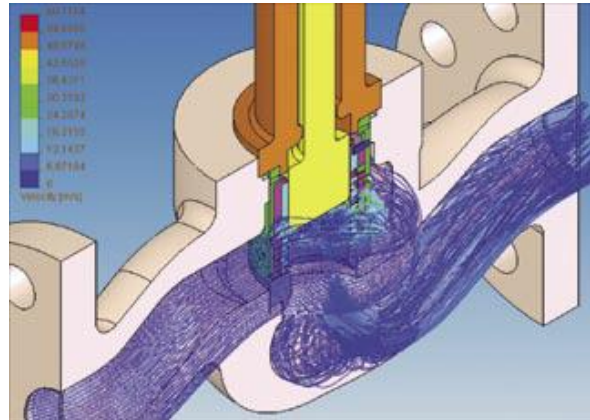
รูปที่ 7-81 วาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow Control Valve)



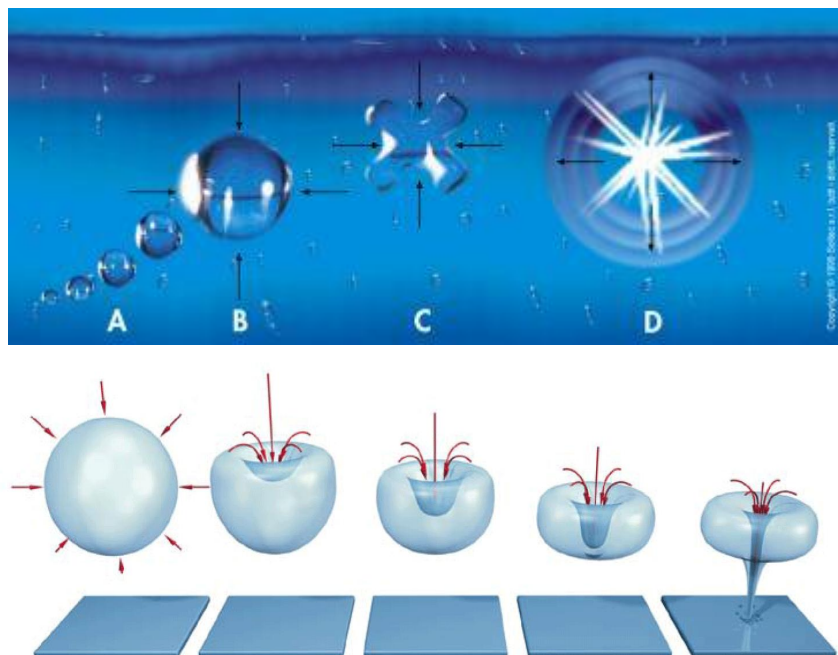
รูปที่ 7-82 ตัวอย่างรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความดันเมื่อผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล

ไม่ควรติดตั้งวาล์วควบคุมอัตราการไหลด้านทางเข้ามาตรวัดปริมาณของเหลว เพราะเมื่อวาล์วควบคุมอัตราการไหลทำงานจะไปรบกวนรูปแบบการไหล (flow pattern) ซึ่งจะมีผลอย่างมากหากมาตรวัดเป็น

ชนิดเทอร์ไบน์มิเตอร์ หรืออาจก่อนเกิดความดันด้านทางออกกว่าควบคุมอัตราการไหลต่ำกว่าความดันไอของของเหลวที่ต้องการวัดส่งผลให้ของเหลวกลายเป็นไอเกิดฟองอากาศในระบบท่อซึ่งจะมีผลต่อความถูกต้องของมาตรวัดปริมาตรของเหลว



รูปที่ 7-83 ตัวอย่างรูปแบบการไหลและความเร็วของเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านวาล์ว



รูปที่ 7-84 ตัวอย่างการเกิดและพัฒนากำเนิดของเหลวมีความดันต่ำกว่าความดันไอของเหลวนั้นๆ เป็นฟองอากาศแล้วระเบิดตัวทำความเสียหายต่อผิวมาตรวัดปริมาตรของเหลว ที่เรียกว่า “Cavitation”

6. ระบบท่อ ต้องมีท่อเพียงท่อเดียวที่ออกจากมาตรวัดปริมาตรและวิ่งตรงไปยังภาชนะจัดเก็บ หรือถังบรรจุน้ำมันของผู้ซื้อหรือผู้ขาย ต้องไม่มีระบบท่อใดๆ แยกเดินออกไปจากระบบท่อหลังจากของเหลวผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวไปแล้วอย่างเด็ดขาด

ชั้นความเที่ยงมาตรวัดปริมาตรของเหลว

มาตรวัดปริมาตรของเหลวที่อยู่ภายใต้พระราชบัญญัติมาตราซึ่งดวงวัด พ.ศ. 2542 นั้นกำหนดให้ใช้วัดของเหลว โดยนิยามคำว่า “ของเหลว” หมายความว่า น้ำมันเชื้อเพลิง น้ำมันหล่อลื่น ก๊าซปิโตรเลียมเหลว แต่ไม่รวมถึงน้ำ พร้อมจัดชั้นความเที่ยงของระบบการวัดปริมาตรของเหลว แบ่งเป็น 2 ชั้น คือ

(1) ชั้น 0.5

(2) ชั้น 1.0

อีกทั้งกำหนดหลักเกณฑ์การแบ่งชั้นความเที่ยงของระบบการวัดปริมาตรของเหลว (หมายความว่า ระบบที่ประกอบด้วยมาตรวัดปริมาตรของเหลว อุปกรณ์ควบ และอุปกรณ์เสริม) ให้เป็นไปตามตาราง ดังต่อไปนี้

ประเภทของระบบการวัดปริมาตรของเหลว	ชั้นความเที่ยง
ระบบการวัดปริมาตรก๊าซปิโตรเลียมเหลว	ชั้น 1.0
ระบบการวัดปริมาตรน้ำมันเชื้อเพลิงและปริมาตรน้ำมันหล่อลื่น มีอัตราการไหลสูงสุดไม่เกิน 20 ลิตร/ชั่วโมง	ชั้น 1.0
ระบบการวัดปริมาตรน้ำมันเชื้อเพลิงและปริมาตรน้ำมันหล่อลื่น มีความหนืดพลศาสตร์มากกว่า 1,000 mPa.s	ชั้น 1.0
ระบบการวัดปริมาตรน้ำมันเชื้อเพลิงและปริมาตรน้ำมันหล่อลื่น ที่มีอัตราการไหลสูงสุดมากกว่า 20 ลิตร/ชั่วโมง และมีความหนืดพลศาสตร์ไม่เกิน 1,000 mPa.s อาทิ ระบบการวัดปริมาตรผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่เป็นของเหลว ณ สภาวะอุณหภูมิและความดันปกติ	ชั้น 0.5

ตารางที่ 7-2 การจัดชั้นความเที่ยงระบบการวัดปริมาตรของเหลว

และกำหนดให้มีอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดสำหรับการให้คำรับรองชั้นแรกและการให้คำรับรองชั้นหลังของมาตรวัดปริมาตรของเหลวตามระบบการวัดปริมาตรของเหลว มีค่าเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทดสอบ เป็นไปตามที่กำหนดไว้ ดังต่อไปนี้

	อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาด		
	ชั้นความเที่ยง 0.3	ชั้นความเที่ยง 0.5	ชั้นความเที่ยง 1.0
A	0.3 %	0.5 %	1.0 %
B	0.2 %	0.3 %	0.6 %

ตารางที่ 7-3 อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดของชั้นความเที่ยงระบบการวัดปริมาตรของเหลว

อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาด (A) สำหรับมาตรวัดที่ได้ติดตั้งเข้าระบบการวัดปริมาตรของเหลวแล้ว ดังในรูปที่ 7-75 และ อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาด (B) สำหรับมาตรวัดที่ยังไม่ได้ติดตั้งเข้าระบบการวัดปริมาตรของเหลว

นอกจากนี้มาตรวัดปริมาตรของเหลวต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้อีกด้วย

(1) มาตรวัดที่ได้ติดตั้งเข้าระบบการวัดปริมาตรของเหลวแล้ว ให้อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดมีทั้งฝ่ายมากและฝ่ายน้อยตามตารางที่ 7-4 ดังต่อไปนี้

ปริมาณที่ทดสอบ (V) (ลิตร)	อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาด	
	ชั้นความเที่ยง ชั้น 0.5	ชั้นความเที่ยง ชั้น 1.0
0.02 ถึง 0.1	2 มิลลิลิตร	4 มิลลิลิตร
0.1 ถึง 0.2	0.02 V	0.04 V
0.2 ถึง 0.4	4 มิลลิลิตร	8 มิลลิลิตร
0.4 ถึง 1.0	0.01 V	0.02 V
1.0 ถึง 2.0	10 มิลลิลิตร	20 มิลลิลิตร
ตั้งแต่ 2 ขึ้นไป	0.005 V	0.01 V

ตารางที่ 7-4 อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดของชั้นความเที่ยงระบบการวัดปริมาตรของเหลวที่ปริมาตรต่ำกว่า 2 ลิตร

(2) มาตรวัดที่ยังไม่ได้ติดตั้งเข้าระบบการวัดปริมาตรของเหลว ให้อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดเป็นกึ่งหนึ่งของอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดตาม (1) แต่ต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 0.3 ของปริมาตรที่ทดสอบ

(3) มาตรวัดที่ได้ติดตั้งเข้าระบบการวัดปริมาตรของเหลวแล้ว ให้อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดสำหรับปริมาณน้อยที่สุดที่วัดได้ของระบบเป็นสองเท่าของอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดตาม (1)

(4) มาตรวัดที่ยังไม่ได้ติดตั้งเข้าระบบการวัดปริมาตรของเหลว ให้อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดสำหรับปริมาณน้อยที่สุดที่วัดได้ของระบบเป็นสองเท่าของอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดตาม (2)

(5) อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดของมาตรวัดไม่ว่ากรณีใด ๆ จะต้องกำหนดให้มีค่าไม่น้อยกว่าอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดสำหรับปริมาณน้อยที่สุดที่วัดได้ของระบบ

(6) ค่าความคลาดเคลื่อนของมาตรวัดทุกอัตราการไหลที่คลาดเคลื่อนในฝ่ายเดียวกัน อย่างน้อยต้องมีค่าใดค่าหนึ่งไม่เกินกึ่งหนึ่งของอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาด

(7) พิสัยความคลาดเคลื่อนของระบบการวัดปริมาตรของเหลว ต้องไม่เกินกึ่งหนึ่งของช่วงอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาด

(8) อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดอาจจะกำหนดให้น้อยกว่าหรือมากกว่านี้ได้ ถ้าการทดสอบความถูกต้องของมาตรวัดทดสอบด้วยของเหลวต่างชนิดกับของเหลวที่จะใช้กับมาตรวัดนี้ ทั้งนี้ ตามที่รัฐมนตรีประกาศกำหนด

(9) ผลการวัดปริมาตรของของเหลวที่มีปริมาตรไม่น้อยกว่าห้าเท่าของปริมาณน้อยที่สุดที่วัดได้ของระบบ มาตรวัดต้องมีความสามารถในการทำซ้ำได้ไม่เกิน 2 ใน 5 เท่าของค่าอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดตาม (1) หรือ (5) แล้วแต่กรณี

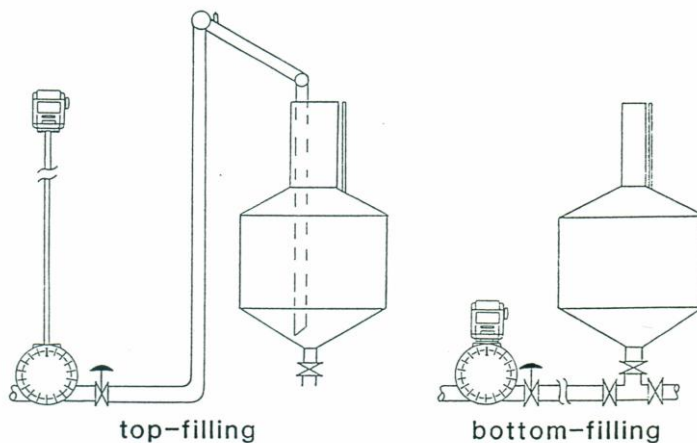
การสอบเทียบมาตรวัดของเหลวทั่วไป (Flowmeter) และมาตรวัดแบบมาตรา (Master Meter)

ในการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวกับมาตรวัดแบบมาตราด้วยท่อสอบเทียบ (pipe prover) หรือถังตวงแบบมาตรา (tank prover หรือ prover tank) เราเรียกวิธีการสอบเทียบดังกล่าวว่า “การสอบเทียบทางตรง (direct proving)” แต่ถ้าหากว่าทำการสอบเทียบมาตรวัดแบบมาตราด้วยมาตรวัดอีกตัวหนึ่งซึ่งได้รับการสอบเทียบตรงมาก่อนเราเรียกวิธีการสอบเทียบนั้นว่า “การสอบเทียบทางอ้อม (indirect proving)” ซึ่งโดยปกติแล้วจะกระทำการสอบเทียบด้วยวิธีตรงมากกว่า สำหรับการสอบเทียบอ้อมนั้นขึ้นอยู่กับความต้องการพิเศษของผู้ใช้งานและผู้ที่เกี่ยวข้อง

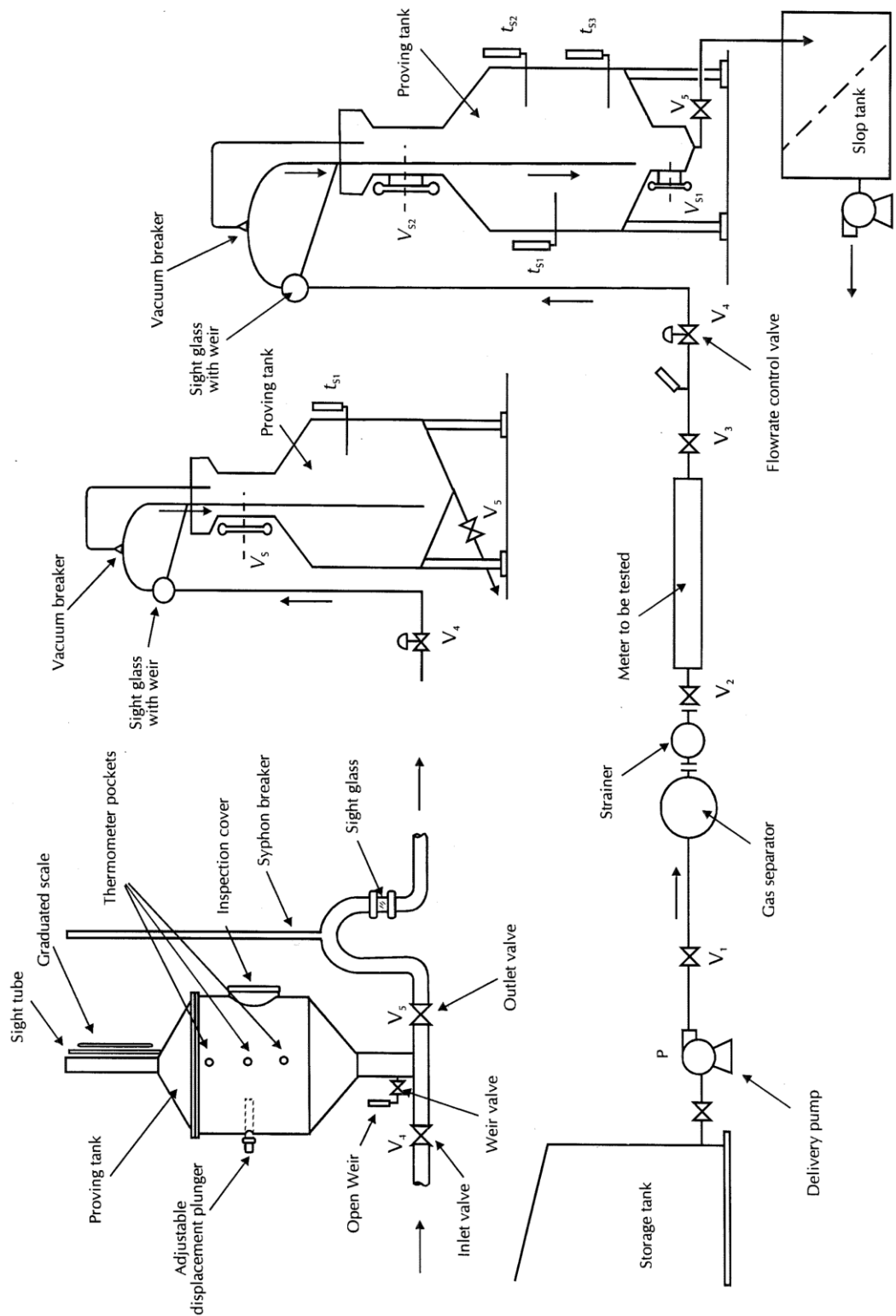
สำหรับการติดตั้งระบบสอบเทียบทางตรงด้วยถังตวงแบบมาตรา การจัดเรียงเครื่องซึ่งตวงวัดและแบบมาตราในทางปฏิบัติให้ยึดหลักที่ว่า ให้นึกถึงคำนิยามการหาผลผลิตหรืออัตราเมื่อเหลือเมื่อขาดของเครื่องซึ่งตวงวัดนั้นเป็นการตรวจสอบผลการวัดของเครื่องซึ่งตวงวัดเทียบกับผลการวัดของแบบมาตรา ด้วยเหตุนี้ในงานซึ่งตวงวัดในเชิงกฎหมายจึงกำหนดให้จัดวางเครื่องซึ่งตวงวัดทางด้านต้นน้ำ (Upstream) และแบบมาตรอยู่ด้านปลายน้ำ (Downstream) ในกรณีนี้จึงมีการจัดวางมาตรวัดกับถังตวงแบบมาตรา มี 2 ลักษณะ คือ

- **Top-Filling** มาตรวัดอยู่ทางด้าน Upstream และถังตวงแบบมาตราอยู่ทางด้าน Downstream โดยให้ของเหลวที่ผ่านการวัดด้วยมาตรวัดไหลเข้าสู่ถังตวงแบบมาตราทางปากถังตวงด้านบน โดยให้ปลาย Loading Arm (ดังรูปที่ 7-85) จุ่มอยู่บริเวณก้นถังตวงแบบมาตรา การจัดวางลักษณะนี้ง่ายต่อการทำงาน ถังตวงไม่ต้องมีความซับซ้อนมากนัก มีท่อทางออกท่อเดียว แต่หากใช้กับของเหลวปิโตรเลียมอาจก่อให้เกิดการฟุ้งหรือ Vapor loss สูง เนื่องจากในทางปฏิบัติอาจมีปัญหาการเอา Loading Arm เข้าไม่ได้ลึกเพียงพอ และเมื่อเสร็จสิ้นการวัดของมาตรวัดแต่ละครั้งต้องยก Loading Arm ออกจากถังตวงแบบมาตราเพื่ออ่านค่าปริมาตรที่ถังตวงแบบมาตราวัดได้ อีกทั้งต้องระมัดระวังปัญหาของเหลวค้างภายใน Loading Arm ในแต่ละครั้งไม่เท่ากัน ที่สำคัญคือจุดอ้างอิงของระดับของเหลวเริ่มต้นและสิ้นสุดรอบการสอบเทียบในแต่ละรอบนั้นตรวจสอบได้ยากเมื่อใช้ Loading Arm แต่ปัญหานี้จะถูกแก้ไขด้วย Sight glass with weir ดังรูปที่ 7-100

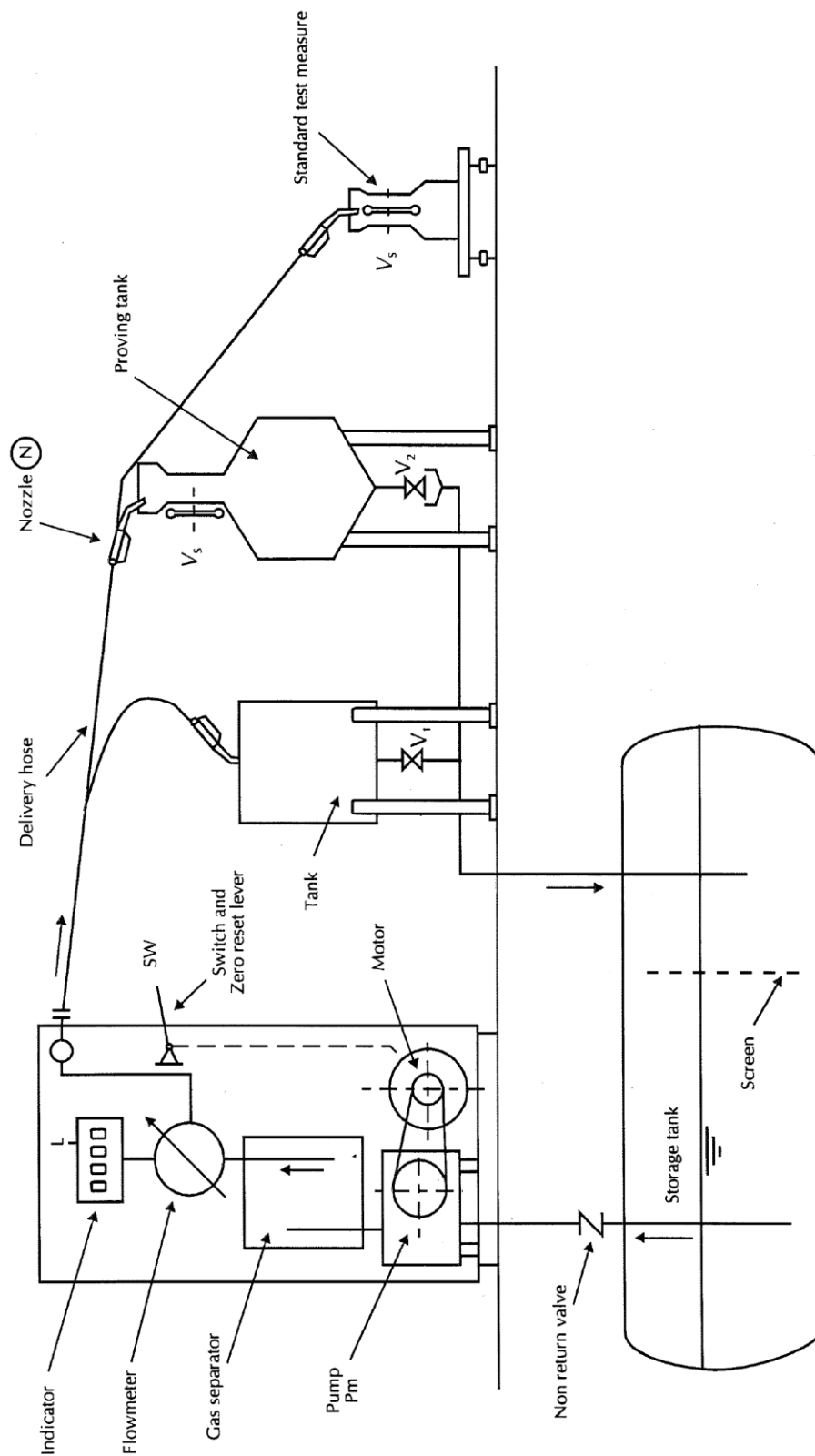
- **Bottom-Filling** มาตรวัดอยู่ทางด้าน Upstream และถังตวงแบบมาตราอยู่ทางด้าน Downstream โดยให้ของเหลวที่ผ่านการวัดด้วยมาตรวัดไหลเข้าสู่ถังตวงแบบมาตราด้านล่าง การจัดสร้างถังมีความยุ่งยากบ้างเพราะต้องจัดให้มีท่อทางออกและท่อทางเข้าแยกออกจากกัน และเมื่อระบายของเหลวออกจากถังต้องออกแบบท่อให้สามารถระบายให้หมดจด แต่ช่วยลดการสูญเสียหรือการระเหยของการเป็นไอได้ดี



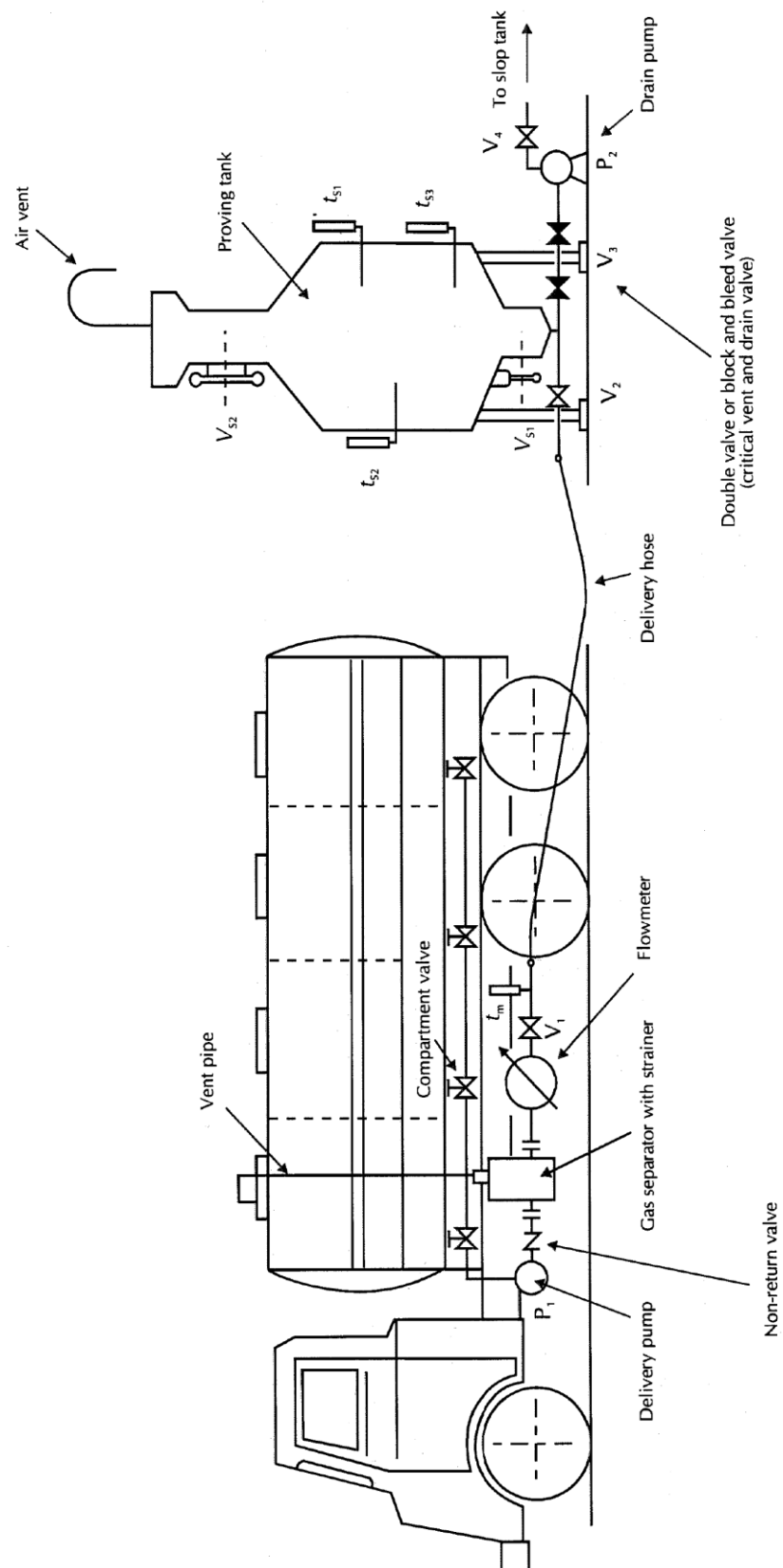
รูปที่ 7-85 รูปแบบการติดตั้งมาตรวัดกับถังตวงแบบมาตรา 2 รูปแบบ



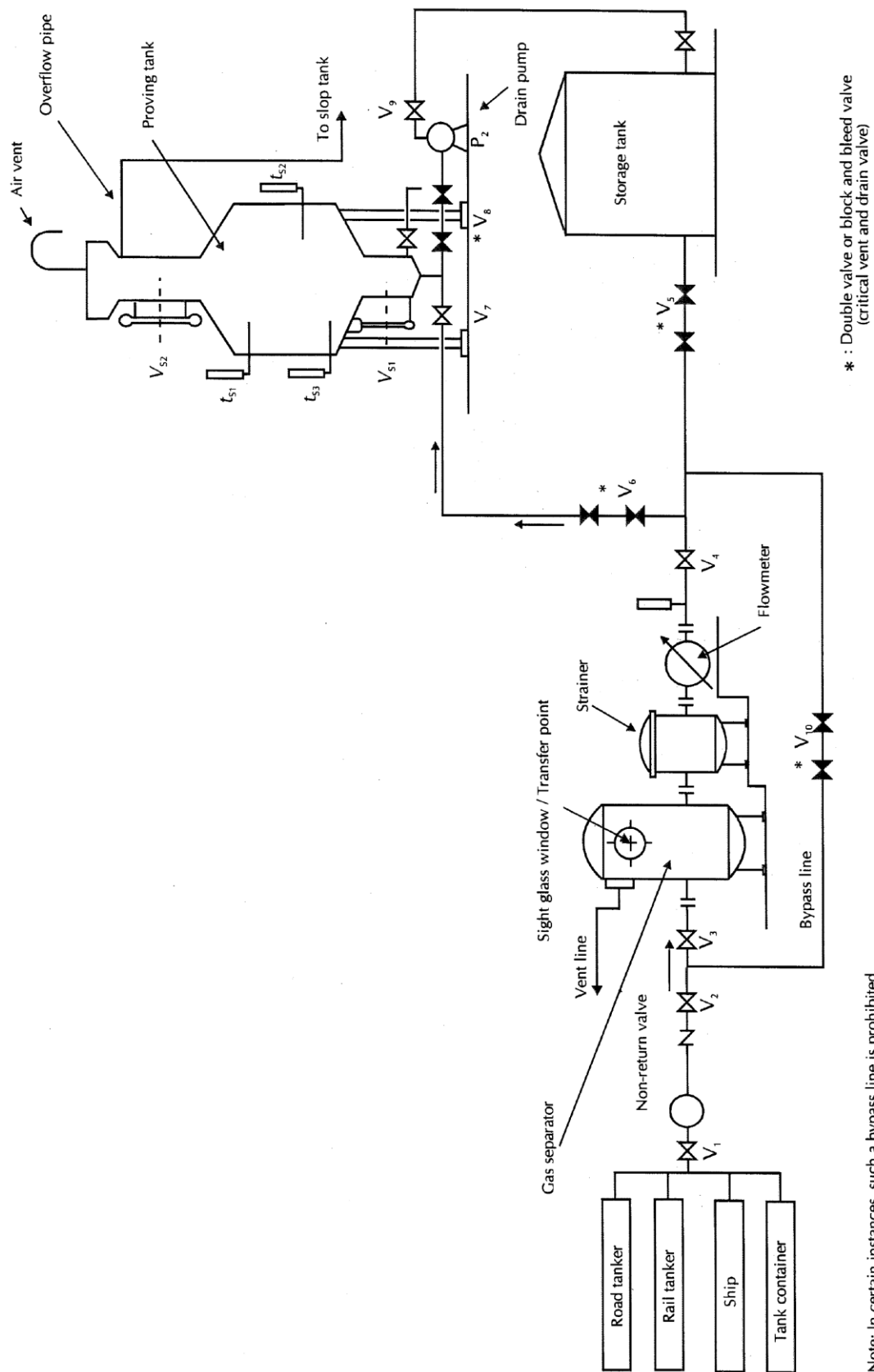
รูปที่ 7-86 รูปแบบการติดตั้งและเครื่องมืออุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับตรวจสอบมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ถูกติดตั้งในระบบทดสอบประจำที่ด้วยเครื่องตวงแบบมาตรา (OIML R 120)



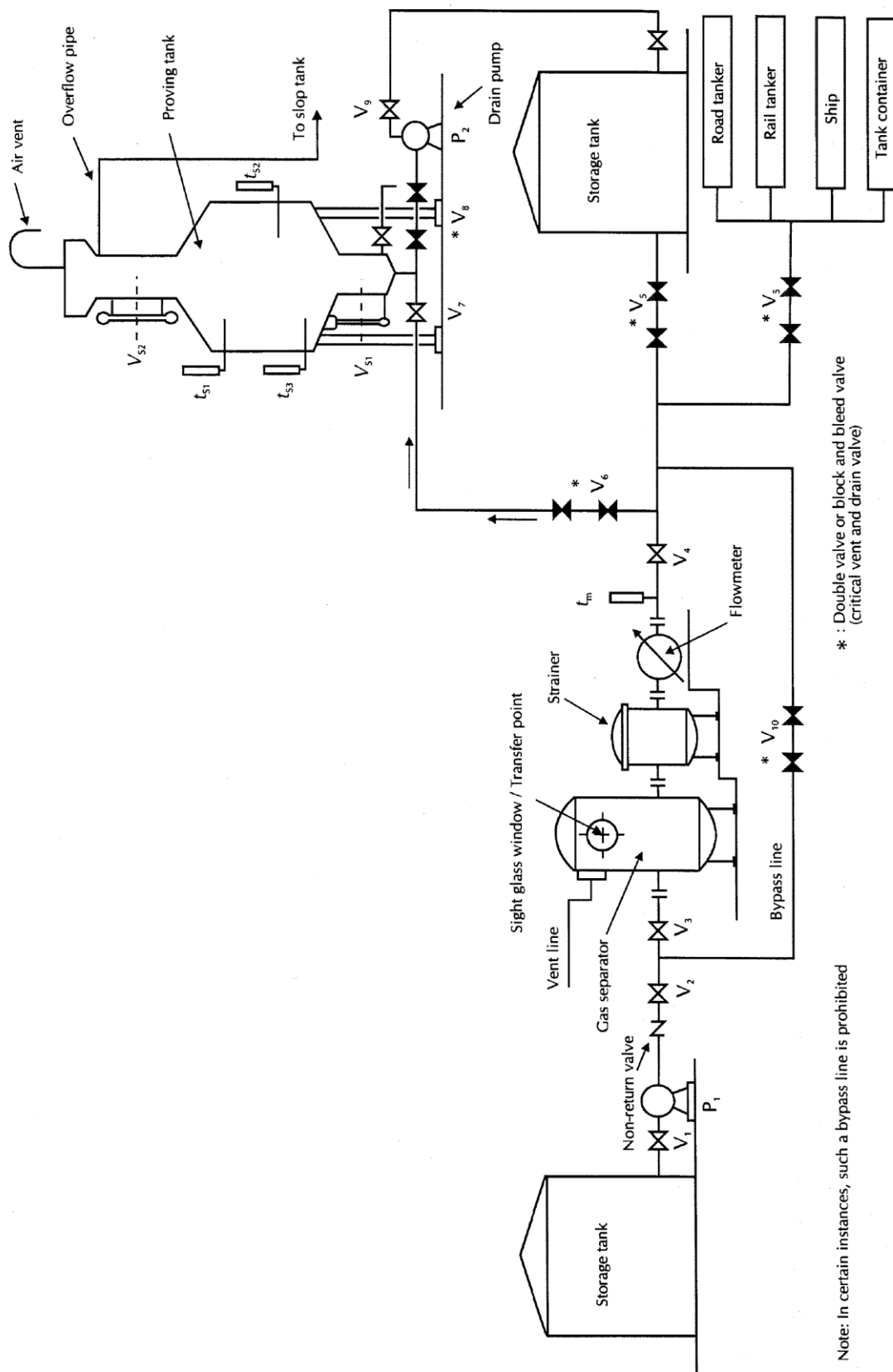
รูปที่ 7-87 รูปแบบการติดตั้งและเครื่องมืออุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับตรวจสอบมาตรวัดปริมาณของเหลวที่ถูกติดตั้งในตู้จ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงตามสถานบริการด้วยเครื่องตวงแบบมาตรา (OIML R 120)



รูปที่ 7-88 รูปแบบการติดตั้งและเครื่องมืออุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับตรวจสอบมาตรวัดปริมาณของเหลว
ประจำรถยนต์บรรทุกทุกของเหลวปิโตรเลียมส่งจ่ายด้วยปั๊มประจำรถด้วยเครื่องตวงแบบมาตรา
(OIML R 120)



รูปที่ 7-89 รูปแบบการติดตั้งและเครื่องมืออุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับตรวจสอบระบบการวัดปริมาณน้ำมันรับของเหลวปิโตรเลียมเข้าจัดเก็บในถังสำรองด้วยเครื่องตวงแบบมาตรา (OIML R 120)



รูปที่ 7-90 รูปแบบการติดตั้งและเครื่องมืออุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับตรวจสอบระบบการวัดปริมาตรสถานีส่งจ่ายของเหลวปิโตรเลียมทางรถยนต์ เรือ และรถไฟด้วยเครื่องตวงแบบมาตรา (OIML R 120)

การสอบเทียบทางตรง (Direct Proving)

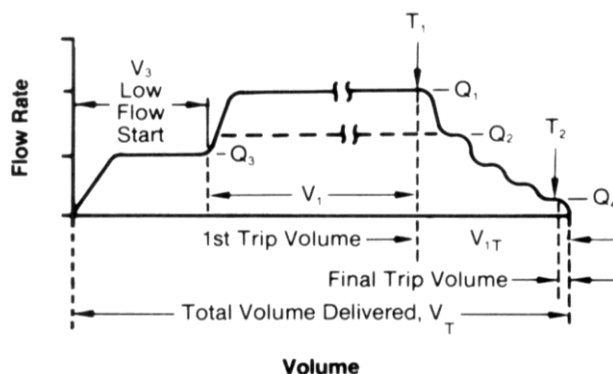
เนื่องจากบทนี้เราพูดถึงเฉพาะการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวและมาตรวัดแบบมาตรด้วยถังตวงแบบมาตราซึ่งเป็นการสอบเทียบทางตรง ดังนั้นเพื่อการสอบเทียบทางตรงนี้ได้ผลถูกต้องแม่นยำน่าเชื่อถือ จำเป็นอย่างยิ่งต้องทราบกำหนดเงื่อนไข ข้อจำกัดในการสอบเทียบตลอดจนข้อควรปฏิบัติและระมัดระวังในการปฏิบัติงาน โดยพิจารณา

(1) **พิกัดกำลังต่ำสุดของถังตวงแบบมาตราที่ใช้ในการสอบเทียบ** ควรมีขนาดเท่ากับปริมาตรการส่งจ่ายโดยมาตรวัดดังกล่าวภายใต้ระยะเวลาการสอบเทียบอย่างน้อยเป็นเวลา 1 นาที ที่อัตราการไหลทำงาน (normal full flow) หรือที่อัตราการไหลที่เราต้องการนำไปใช้งานจริง หรือ

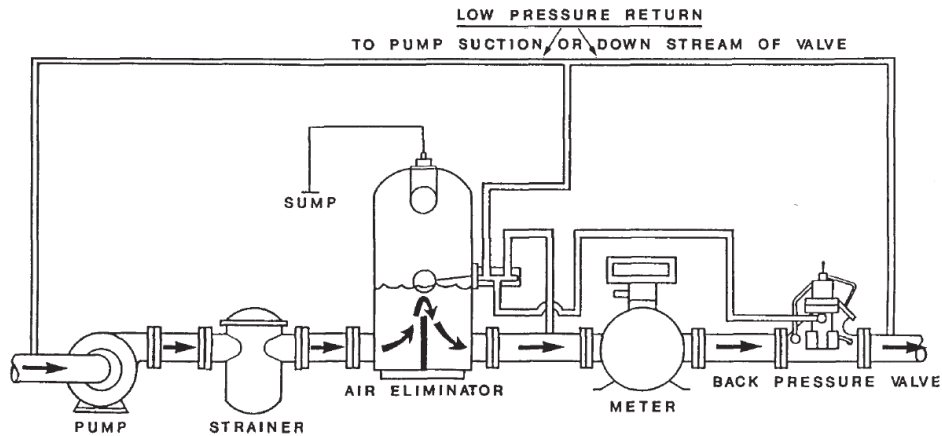
ตาม API Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 4- Proving Systems Section 4-Tank Provers, 1998 กล่าวว่าขนาดของเครื่องตวงแบบมาตรา (Capacity of Prover Tank) ต้องไม่น้อยกว่าปริมาณการส่งจ่ายด้วยเวลา 1 นาทีที่อัตราการไหลปกติ (normal operating flow rate) ของมาตรวัดของไหลที่ต้องการสอบเทียบหรือตรวจสอบให้คำรับรอง แต่เพื่อให้มั่นใจในการปฏิบัติงาน ขนาดของเครื่องตวงแบบมาตราจึงควรมีปริมาตรเท่ากับหรือมากกว่า 1 - 1.5 เท่าของปริมาตรที่ส่งจ่ายจริงผ่านมาตรวัดของไหลที่ต้องการสอบเทียบหรือตรวจสอบให้คำรับรองภายใน 1 นาที

เพียงประโยคเดียวข้างต้น แต่มีผลต่อความเข้าใจที่แตกต่างและนำผลที่แตกต่าง แม้แต่ตัวผู้เขียนก็เช่นเดียวกัน อีกทั้งยังเกี่ยวข้องกับลักษณะการทำงานนั้นคือ โหมดการทำงานต้อง ปิด-เปิด ระบบการวัดปริมาตรของเหลวในการสอบเทียบแต่ละครั้ง และในระบบปิด-เปิดก็ยังสามารถเลือกระบบปิด-เปิดด้วยมือ หรือปิด-เปิดด้วยวาล์วอัตโนมัติ ล้วนแล้วมีผลเกี่ยวข้องทั้งสิ้น เราจึงต้องมาพิจารณาเป็นรายกรณี

กรณีมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายทั่วไป การจัดทำระบบและควบคุมการจ่ายของเหลวผ่านมาตรวัดต้องเป็นระบบที่มีความถูกต้องแม่นยำและรัดกุม การส่งจ่ายดำเนินไปอย่างคงเส้นคงวาตลอดช่วงระยะเวลาการจ่ายของเหลวเพื่อการซื้อขาย โดยเฉพาะสถานที่จ่ายน้ำมันทางรถยนต์แบบขายส่ง หรือที่เรียกว่า “Truck Loading” หรือ “Loading Rack” (รูปที่ 7-94, รูปที่ 7-95) พบว่าระบบการวัดปริมาตรของเหลวประจำ Truck Loading เป็นระบบควบคุมอัตราการไหลในรูปแบบตายตัวในการจ่ายน้ำมันปิโตรเลียมเข้าสู่ Compartment ของรถยนต์บรรทุกแต่ละช่องๆ อีกทั้งใช้ระบบปิด-เปิดด้วยวาล์วควบคุมการไหล (Flow control valve) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการไหลไม่มีอัตราการไหลสูงหรือต่ำเกินไปในมาตรวัดปริมาตรของเหลวแต่ละตัวซึ่งใช้ป้อนร่วมกัน โดยมีรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับเวลาส่งจ่าย (Flowrate Pattern) ตัวอย่างเช่นดังรูปที่ 7-91 ทั้งนี้แต่ละระบบอาจมีรูปแบบ Flowrate Pattern ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวต่างจากนี้ได้

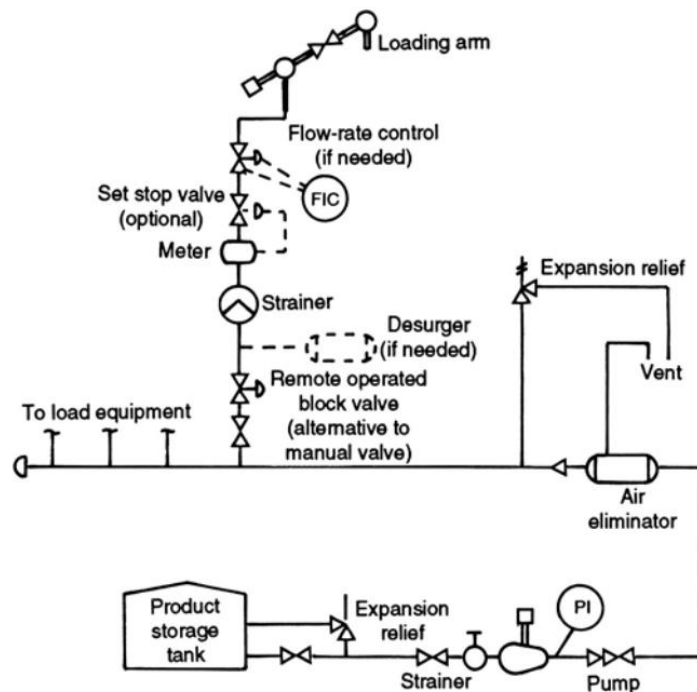


รูปที่ 7-91 ตัวอย่าง Flowrate Pattern ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ Truck Loading หรือ Loading Rack



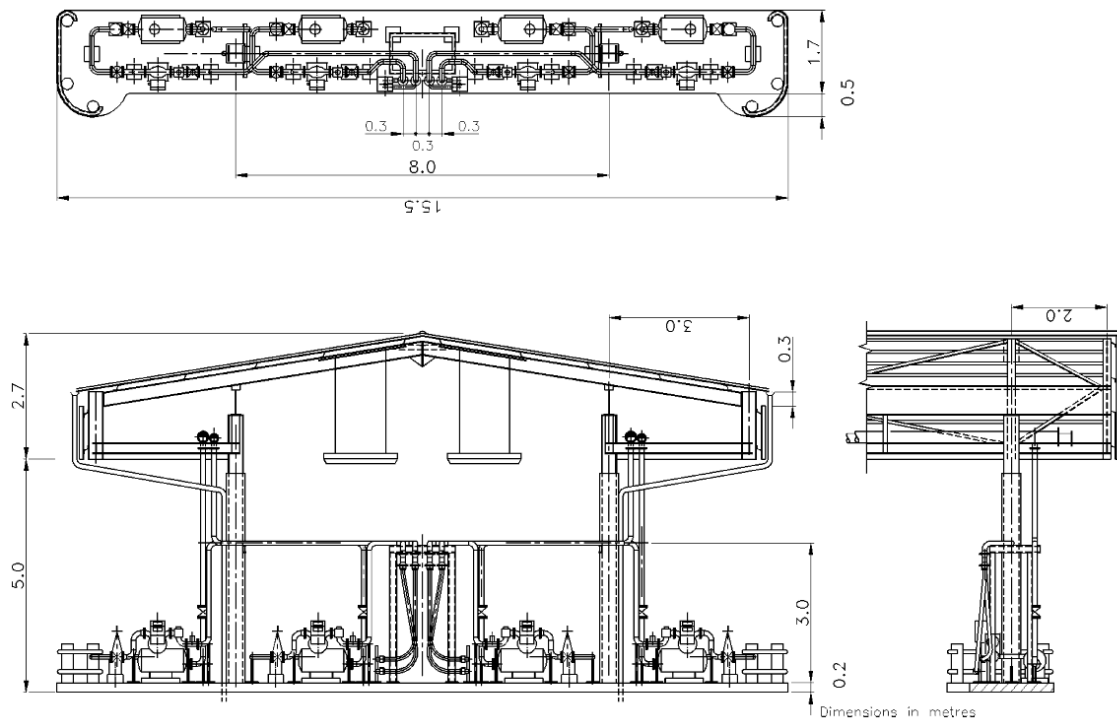
รูปที่ 7-92 อุปกรณ์หลักในระบบการจ่ายน้ำมันทางรถยนต์และทางรถไฟ ณ Loading Rack

จากในรูปที่ 7-91 นั้นในตอนเริ่มต้นการค่อยๆเปิดวาล์วให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นที่อัตราการไหลต่ำช่วงระยะเวลาหนึ่งก่อนเพื่อป้องกันการเกิดฟองภายใน compartment ของรถยนต์บรรทุกอีกทั้งสามารถตรวจสอบการรั่วไหลระบบส่งจ่ายหรือไม่ แต่เมื่อผ่านไปช่วงระยะเวลาหนึ่งวาล์วก็จะเปิดทำงานเต็มที่ ในขั้นตอนใกล้เคียงปริมาณส่งจ่ายวาล์วเริ่มค่อยๆ ปิดเพื่อป้องกันการปรากฏการณ์ water hammer เกิดแรงดันอัดย้อนกลับไปยังปั๊ม ซึ่งในระบบการวัดอาจทำการติดตั้งแก้มลิงหรือ “desurger” ด้านหลังมาตรวัดปริมาณของเหลว ดังในรูปที่ 7-93 เพื่อรองรับปริมาณของเหลวและลดแรงดันอัดย้อนกลับหากมีการปิด-เปิดวาล์วด้วยอัตราเร็ว

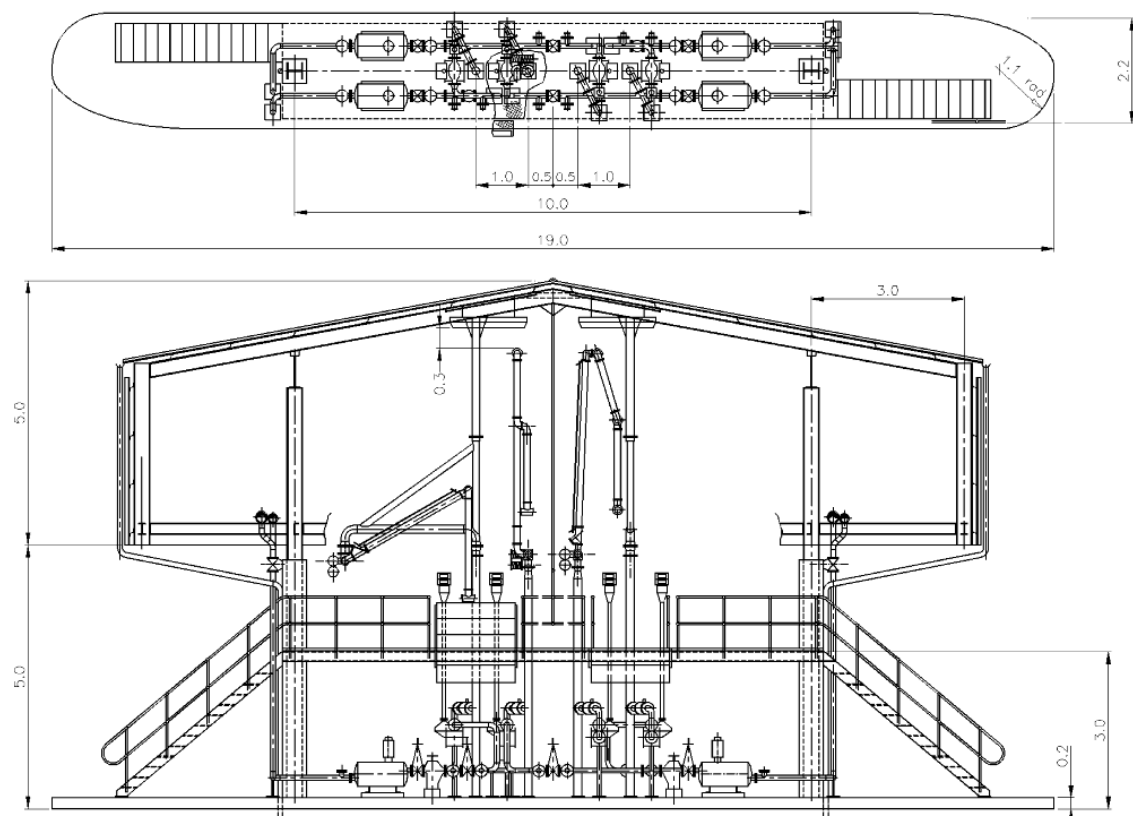


รูปที่ 7-93 ระบบการจ่ายน้ำมัน ณ Loading Rack

ดังนั้นคำถามเกิดขึ้นว่า “อัตราการไหลทำงาน (normal full flow)” หรือ “อัตราการไหลที่เราต้องการนำไปใช้งานจริง” เป็นอัตราการไหลค่าใดเพราะอัตราการไหลไม่คงที่ ดังนั้นการสอบเทียบมาตรวัดประจำ Truck



รูปที่ 7-94 รูปแบบโดยทั่วไปของ Loading Rack แบบ Bottom Load (Shell, DEP 31.06.11.11-Gen.)



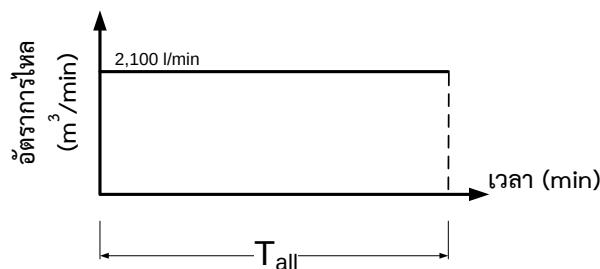
รูปที่ 7-95 รูปแบบโดยทั่วไปของ Loading Rack แบบ Top Load (Shell, DEP 31.06.11.11-Gen.)

Loading ก็ควรใช้พิกัดกำลังถึงดวงแบบมาตราเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของรูปแบบอัตราการไหลเทียบกับเวลาส่งจ่าย ดังในตัวอย่างในรูปที่ 7-91 และจะได้มีเตอร์แฟคเตอร์ (Meter Factor; MF) ประจำรูปแบบอัตราการไหลเทียบกับ

เวลาส่งจ่ายนี้หรือเป็นมิเตอร์แฟคเตอร์ประจำอัตราการไหลเฉลี่ยของ Flowrate Pattern นี้ แต่ไม่ใช่มิเตอร์แฟคเตอร์ประจำอัตราการไหลใดเลย และหาก Flowrate Pattern เปลี่ยนไปมิเตอร์แฟคเตอร์ก็ยังใช้ได้อยู่หรือเปล่า หากไม่แน่ใจก็ต้องตรวจสอบใหม่ หรือเราจะหามิเตอร์แฟคเตอร์ประจำอัตราการไหลคงที่แต่ละค่า ที่หลายอัตราการไหลโดยมิเตอร์แฟคเตอร์ประจำแต่ละอัตราการไหลให้ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดจากนั้นให้นำมาใช้วัดปริมาตรซึ่งไม่ว่าที่อัตราการไหลใดก็ให้ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินกฎหมายกำหนดไว้

ในกรณีมาตรวัดแบบมาตรา เราต้องรายงานผลการสอบเทียบถึงค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ประจำอัตราการไหลคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อนำมิเตอร์แฟคเตอร์ประจำอัตราการไหลคงที่แต่ละค่าหลายค่ามาเขียนเป็นกราฟให้ได้ Performance Curve หรือ Accuracy Curve ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 7-74 แล้วทำการ Fitted Curve เพื่อให้ได้สมการหนึ่งจากนั้น เราสามารถนำสมการดังกล่าวไปใช้หาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ที่อัตราการไหลใดๆได้ต่อไป ก็เป็นวิธีหนึ่งถ้าหากยอมรับและพิสูจน์ได้ว่าผลจากการสมการที่ได้จากการ Fitted Curve น่าเชื่อถือ การต้องการทราบค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ประจำอัตราการไหลคงที่ค่าหนึ่งๆ ของมาตรวัดแบบมาตราก็เพื่อเมื่อนำมาตรวัดแบบมาตรไปตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ในการซื้อขายนั่นเอง โดยเราสามารถปรับผลผลิตของมาตรวัดแบบมาตรา (Meter Error) ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ด้วยการคูณมิเตอร์แฟคเตอร์ (Meter Factor) ที่ได้จากการสอบเทียบ ดังนั้นเมื่อเทียบค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้วัดซื้อขายเทียบกับค่าที่อ่านได้ของมาตรวัดแบบมาตรา (ซึ่งมี Meter Error เท่ากับ 0) เราก็จะทราบค่าความคลาดเคลื่อนของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้วัดซื้อขายโดยต้องไม่เกิน 0.5% ของปริมาตรทดสอบในกรณีมาตรวัดอยู่ในชั้นความเที่ยง 0.5 นั่นเอง

ด้วยเหตุนี้พิกัดกำลังของถังตวงแบบมาตราในการสอบเทียบมาตรวัดแบบมาตราจึงต้องรองรับปริมาตรของเหลวโดยมี Flowrate Pattern ในทางทฤษฎีดังรูปที่ 7-96 ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถกระทำได้ เพราะไม่สามารถออกแบบระบบการวัดให้มีการตอบสนองต่อการเปิด-ปิดวาล์วและให้มีอัตราการไหลดังรูปที่ 7-96

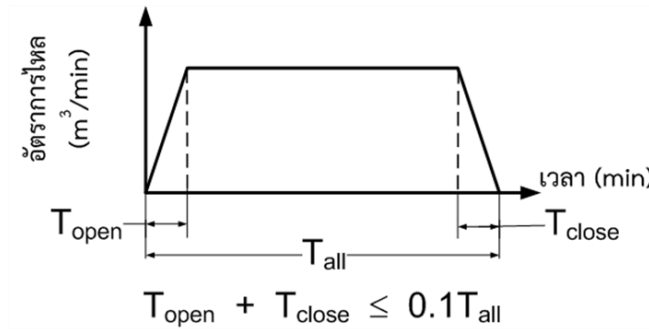


รูปที่ 7-96 Flowrate Pattern ของมาตรวัดในทางทฤษฎีเพื่อหา MF ที่อัตราการไหลคงที่ค่าหนึ่ง

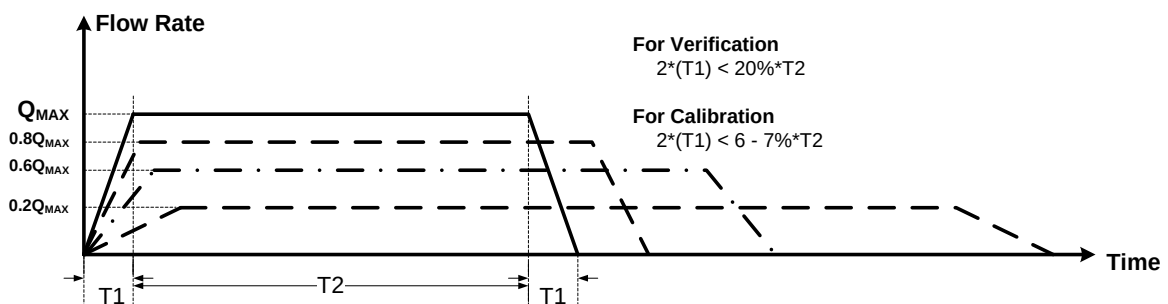
แต่สามารถทำให้ใกล้เคียงทางทฤษฎีคือมี Flowrate Pattern ดังรูปที่ 7-97 โดยเมื่อหาพื้นที่ใต้กราฟในรูปแล้วมีระดับความมั่นใจเกิน 95 % ว่าได้พื้นที่ใกล้เคียงทฤษฎีมากที่สุด ดังนั้นการเตรียมระบบสอบเทียบเพื่อให้ได้ Flowrate Pattern ดังกล่าวจึงเป็นการลงทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการด้วยเหตุนี้การสอบเทียบมาตรวัดแบบมาตราจึงไม่ใช่เตรียมระบบเอาแบบง่ายๆ จนไม่มีกลิ่นอายของความถูกต้องเสียทีเดียว

สรุปว่า หากทำการสอบเทียบหรือตรวจสอบเพื่อหามิเตอร์แฟคเตอร์ (Meter Factor; MF) ประจำ Flowrate Pattern และชนิดผลิตภัณฑ์ของเหลวชนิดนั้นๆ ก็จะได้มิเตอร์แฟคเตอร์ 1 ค่า แต่ถ้าหากต้องการหามิเตอร์แฟคเตอร์ของแต่ละอัตราการไหลคงที่ที่ต้องเตรียมการให้มีเครื่องมืออุปกรณ์และขีดความสามารถเพียงพอเพื่อให้ Flowrate Pattern ดังรูปที่ 7-97 หรือดีกว่า โดยพื้นที่ใต้กราฟของ Flowrate Pattern ก็คือคำตอบที่ว่า

พิกัดกำลังต่ำสุดของถังตวงแบบมาตราที่ใช้ในการสอบเทียบควรมีขนาดเท่าไรนั่นเอง ดังนั้นหากต้องการใช้ถังตวงแบบมาตราเพียง 1 ถังตวงมีพิกัดกำลังครอบคลุมทุกค่าอัตราการไหลทดสอบจึงสามารถกระทำได้ แต่ก็มีข้อดีและข้อเสียเช่นกัน ในข้อดีคือไม่ต้องจัดหาถังตวงแบบมาตราหลายถังตวงและการใช้แบบมาตราเดียวปัจจัยในการคำนวณผลการสอบเทียบ/ตรวจสอบให้คำรับรองแต่ละอัตราการไหลคงที่จะลดน้อยลงไป แต่ต้องใช้ระยะเวลาในการสอบเทียบ/ตรวจสอบให้คำรับรองนานเพิ่มขึ้นในกรณีที่อัตราการไหลต่ำลง ดังรูปที่ 7-98



รูปที่ 7-97 Flowrate Pattern ของมาตรวัดในทางปฏิบัติเพื่อหา MF ที่อัตราการไหลคงที่ค่าหนึ่ง



รูปที่ 7-98 Flowrate Pattern ของมาตรวัดในทางปฏิบัติเพื่อหา MF ที่อัตราการไหลคงที่ค่าหนึ่ง



รูปที่ 7-99 ระบบทดสอบมาตรวัดปริมาตรของเหลวชนิด P.D. ประจําที่ด้วยถังตวงแบบมาตราหลายพิกัดกำลังภายในถังตวงเดียวกัน (Isoil Impianti)

(2) ขีดชั้นหมายมาตรละเอียดต่ำสุด (discrimination) ของถังตวงแบบมาตรา พิจารณาอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดของเครื่องตวงแบบมาตราจึงกำหนดไว้ว่า “ขนาดของถังตวงแบบมาตราที่ใช้สำหรับตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่พิกัดความจุของถังตวงแบบมาตราต้องมีอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดมีค่าไม่เกิน $\pm 1/3 - \pm 1/5$ เท่าของอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ปริมาตรทดสอบหรือปริมาตรของถังตวงที่ต้องการทดสอบนั้น” แต่ทั้งนี้ปริมาตรที่ทดสอบนั้นต้องมีค่ามากกว่าปริมาตรน้อยที่สุดที่วัดได้ (Minimum Measured Quantity of Measuring System) ของมาตรวัดนั้นๆ แต่อย่างไรก็ตามเราอาจเลือกให้ถังตวงแบบมาตรามีค่าอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดน้อยกว่า $\pm 1/5$ เท่า เช่น มีค่าเท่ากับ $\pm 1/10$ เท่าของอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ปริมาตรทดสอบหรือปริมาตรของถังตวงที่ต้องการทดสอบก็สามารถทำได้แต่ต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นอีกทั้งต้องระลึกว่าเป็นการกระทำเกินความจำเป็นหรือไม่

จาก OIML R 120, Edition 2010(E) : Standard capacity measures for testing measuring systems for liquids other than water กำหนดให้ อัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดของเครื่องตวงแบบมาตราทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่มีค่าเท่ากับ $\pm 1/2000$ ของพิกัดกำลังของเครื่องตวงแบบมาตรา หรือดีกว่า ผลตามมานั้นก็คือขีดชั้นหมายมาตรละเอียดต่ำสุดก็ควรมีค่าอ่านละเอียดได้เพียงพอในการแยกแยะอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดของถังตวงแบบมาตราเอง ซึ่งควรมีค่าละเอียดอ่านได้ละเอียดกว่าหรือเท่ากับ $1/3$ เท่าของอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดของเครื่องตวงแบบมาตรา หรือ $1/6000$ ของพิกัดกำลังของเครื่องตวงแบบมาตรานั้นเอง

(3) เส้นผ่านศูนย์กลางคอถังตวงแบบมาตรา (The neck diameter of prover tank) เส้นผ่านศูนย์กลางคอถังตวงแบบมาตราต้องกว้างเพียงพอ ไม่ก่อให้เกิดปัญหาของการล็อกของของเหลวหรืออากาศ (Vapor Lock) ขณะใส่ของเหลวลงไปหรือถ่ายของเหลวออกอีกทั้งต้องมีขนาดเพียงพอสำหรับการทำความสะอาดและตรวจสอบภายในถังตวงแบบมาตราได้ แต่ขณะเดียวกันขนาดของคอถังตวงแบบมาตราก็ต้องมีขนาดเล็กเพียงพอต่อการวัดปริมาตรด้วยความเที่ยงตรงตามอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดที่กำหนด อีกทั้งมีความไวและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของเหลวภายในถังตวงแบบมาตราได้รวดเร็วและง่ายต่อการอ่านค่าปริมาตรภายในถังตวงแบบมาตรา ในแง่ของการติดตั้งถังตวงแบบมาตราให้ได้ระดับก็จำเป็นต้องให้ความสนใจเช่นกันเนื่องจากหากคอถังใหญ่เกินไปผลผิดของการอ่านค่าเนื่องจากอิทธิพลของความลาดเอียงของการติดตั้งถังตวงแบบมาตราก็มีผลมากกว่าถังตวงแบบมาตราที่มีคอถังขนาดเล็กกว่า ดังนั้นอาจพอกำหนดได้ว่า “ความแตกต่างของระดับของเหลวภายในคอเครื่องตวงแบบมาตรารายอย่างน้อยที่สุด 3 มม. จะต้องมียุทธศาสตร์ค่าเท่ากับค่าสมบูรณของอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดของถังตวงแบบมาตราที่พิกัดนั้นๆ” ก็สามารถกระทำได้

แต่เนื่องจากการกำหนดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางคอถังตวงแบบมาตราเป็นเรื่องที่มีความยืดหยุ่นเพื่อความเหมาะสมกับการใช้งานในภาคสนาม ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางคอถังตวงแบบมาตราพอกำหนดให้มีขนาดได้ในช่วงกว้างช่วงหนึ่งดังนี้คือ

$$\frac{5\text{mm.}}{\text{MPE.}} \leq \frac{\Delta h}{\text{MPE.}} \leq \frac{30\text{mm.}}{\text{MPE.}} \quad (\text{Eq.7-15})$$

เมื่อ

Δh = ความแตกต่างของระดับของเหลวภายในคอเครื่องตวงแบบมาตรา (mm.)

MPE. = อัตราเพื่อเหลือเพื่อขาด (Maximum Permissible Error); ΔV (mm.³)

โดย

$$\frac{5\text{mm.}}{\text{MPE.}} \leq \frac{\Delta h}{\Delta V} \leq \frac{30\text{mm.}}{\text{MPE.}} \quad (\text{Eq.7-16})$$

$$\Delta V = \frac{\pi D^2}{4} \times \Delta h$$

(4) **แผ่นแสดงชั้นหมายเลขมาตรา (Scale Plate)** แผ่นแสดงชั้นหมายเลขมาตราสำหรับคอถังตวงแบบมาตราชนิดอยู่ด้านบน (top neck) ของถังตวงแบบมาตราควรแสดงพิกัดกำลังของถังตวงแบบมาตราและแสดงปริมาตรอย่างน้อยประมาณ $\pm 0.5 - \pm 1.0 \%$ ของพิกัดความจุของถังตวงแบบมาตราบนแผ่นแสดงชั้นหมายเลขมาตรา สำหรับคอถังตวงแบบมาตราชนิดอยู่ด้านล่าง (bottom neck) ของถังตวงแบบมาตราขนาดใหญ่ควรแสดงพิกัดความจุของถังตวงแบบมาตราและแสดงปริมาตรอย่างน้อยประมาณ $\pm 0.5\%$ ของพิกัดกำลังของถังตวงแบบมาตราบนแผ่นแสดงชั้นหมายเลขมาตรา

หรืออาจจะพิจารณาให้แผ่นแสดงชั้นหมายเลขมาตราสำหรับคอถังตวงแบบมาตราชนิดอยู่ด้านบน (top neck) ต้องแสดงพิกัดความจุของถังตวงแบบมาตราและแสดงปริมาตรอย่างน้อยจาก 5 ถึง 30 เท่าของอัตราเพื่อเหลือเผื่อขาดของพิกัดความจุของถังตวงแบบมาตราบนแผ่นแสดงชั้นหมายเลขมาตราก็สามารถทำได้

ตัวอย่าง ระบบการวัดปริมาตรของเหลวที่อัตราการไหล 1,800 l/min มี MPE 0.5% ตรวจสอบด้วยถังตวงแบบมาตราพิกัดกำลัง 3,000 ลิตร เครื่องตวงควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอ เท่าไร

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาที่มาตรวัดทำงาน} &= 3,000/1,800 = 1 \text{ นาที } 40 \text{ วินาที} \\ \text{ถังตวงแบบมาตรามี MPE} &= (\pm 1/2000) \times 3,000 \text{ ลิตร} \\ &= \pm 1.5 \text{ ลิตร} = \pm 1,500 \text{ cm}^3 \text{ (cc หรือ ml)} \\ &= \pm 1,500 \times 10^3 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ขีดชั้นหมายเลขมาตราละเอียดต่ำสุด (d) ก็ควรมีค่าอ่านละเอียดเท่ากับหรือน้อยกว่า} \\ \leq (\pm 1/3) \times \text{MPE} = (\pm 1/3) \times 1,500 \text{ CC} = \pm 500 \text{ CC} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรคอถังตวงแบบมาตรา} &\geq (\pm 0.5 \%) \times \text{Prover Tank Capacity} \\ &= (\pm 0.5\%) \times 3,000 \text{ ลิตร} \\ &= \pm 15 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

$$\text{โดย} \quad \frac{5\text{mm.}}{\text{MPE.}} \leq \frac{\Delta h}{\Delta V} \leq \frac{30\text{mm.}}{\text{MPE.}}$$

$$\text{เพราะคอถังตวงมีรูปทรงกระบอก} \quad \Delta V = \frac{\pi D^2}{4} \times \Delta h$$

$$\text{พิจารณาเงื่อนไขที่ } \frac{5\text{mm.}}{\text{MPE.}}$$

$$\Delta V = \frac{\pi D^2}{4} \times \Delta h$$

$$D^2 = \frac{\Delta V}{\Delta h} \times \frac{4}{\pi}$$

$$D^2 = \frac{1,500 \times 10^3}{5} \times \frac{4}{\pi} = 381,971.86$$

$$D = 618.04 \text{ mm.}$$

$$\text{พิจารณาเงื่อนไขที่ } \frac{30\text{mm.}}{\text{MPE.}}$$

$$\Delta V = \frac{\pi D^2}{4} \times \Delta h$$

$$D^2 = \frac{\Delta V}{\Delta h} \times \frac{4}{\pi}$$

$$D^2 = \frac{1,500 \times 10^3}{30} \times \frac{4}{\pi} = 63,661.97$$

$$D = 252.31 \text{ mm.}$$

สรุปได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอเครื่องตวงแบบมาตรา สามารถเป็นได้ตั้งแต่ 252.31 ถึง 618.04 มิลลิเมตร

เมื่อเลือกค่า D เพื่อทำเลือกวัสดุทำคองตวงได้แล้วให้ทำการหาอัตราส่วนคองตวง ตามในบทที่ 6 สมมติให้ขีดขึ้นหมายมาตรละเอียดต่ำสุด (d) ก็ควรมีค่าอ่านละเอียดเท่ากับหรือน้อยกว่า 500 CC นั้นหมายถึงค่า d สามารถเป็น 500, 200 และ 100 CC จากนั้นทำการตรวจสอบเงื่อนไขว่า รัศมีน้อยที่สุดระหว่างขีดขึ้นหมายมาตราที่อยู่ติดกันต้องมีระยะมากกว่าความหนาของขีดขึ้นหมายมาตราหรือเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร และขีดขึ้นหมายมาตราต้องมีระยะห่างที่สม่ำเสมอ

$$\Delta h = \frac{4}{\pi D^2} \times \Delta V = \frac{4}{\pi (266.25^2)} \times 500 \times 10^3 = 8.9 \text{ mm.} > 1.6 \text{ mm.}$$

$$\Delta h = \frac{4}{\pi D^2} \times \Delta V = \frac{4}{\pi (266.25^2)} \times 200 \times 10^3 = 3.59 \text{ mm.} > 1.6 \text{ mm.}$$

$$\Delta h = \frac{4}{\pi D^2} \times \Delta V = \frac{4}{\pi (266.25^2)} \times 100 \times 10^3 = 1.8 \text{ mm.} > 1.6 \text{ mm.}$$

สรุปได้ว่าขีดขึ้นหมายมาตรละเอียดต่ำสุด (d) สามารถเป็นได้ทั้ง 500, 200 และ 100 CC **ANS**

(5) ความหนืด (Viscosity) โดยปกติแล้วการใช้ถังตวงแบบมาตราในการสอบเทียบเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดในช่วงระหว่าง 0-5 cSt แต่ถ้าหากสูงกว่า 5 cSt แล้วของเหลวนั้นมีความคงรูปในตัวเองสูง จึงมักตกค้างอยู่ภายในถังตวงแบบมาตราส่งผลให้การระบายของเหลวดังกล่าวออกให้หมดจากถังตวงแบบมาตรากระทำได้อย่างยาก เมื่อถังตวงแบบมาตราที่มีของเหลวตกค้างสะสมอยู่ยังทำให้เกิดผลผิดในการตรวจสอบให้ค่ารับรองเพิ่มสูงมากขึ้น ตัวอย่างค่าความหนืดของเหลวผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมดูได้ดังในตารางที่ 7-5 ดังนั้นในกรณีนี้ของเหลวมีความหนืดสูงกว่า 5 cSt ควรใช้มาตรวัดแบบมาตรา (master meter) หรือแบบมาตราอื่นๆที่เหมาะสมกว่าและได้รับการสอบเทียบมาแล้วก่อนหน้านี้กับ ท่อสอบเทียบ (pipe prover) หรือถังตวงแบบมาตราชั้นความเที่ยงสูงกว่า working standard ทั้งนี้เพราะมาตรวัดแบบมาตรา (master meter) ส่วนใหญ่ได้รับผลกระทบต่อผลของความหนืดของเหลวน้อยมาก เมื่อ

$$\text{ความหนืดจลน์ (Kinematics Viscosity) } \nu \text{ (mm}^2\text{/sec; cSt.)} = \frac{\text{Centipoise(cP)}}{\text{Specific Gravity(S.G.)}} \quad (\text{Eq.7-17})$$

(6) อุณหภูมิ (Temperature) สำหรับถังตวงแบบมาตราซึ่งไม่มีฉนวนหุ้มภายนอกถังตวงแบบมาตรา จะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการใช้งานระหว่าง 0 - 50 °C แต่ทั้งนี้และทั้งนี้ต้องคำนึงถึงอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมด้วยเช่นกัน ดังนั้นหากพบว่าในการใช้ถังตวงแบบมาตราซึ่งไม่มีฉนวนหุ้มเพื่อทำการสอบเทียบมาตรวัดซึ่งวัดผลิตภัณฑ์ของเหลวโดยเฉพาะของเหลวปิโตรเลียมที่มีอุณหภูมิต่างกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเกินกว่า 3-5 °C ก็ให้หยุดดำเนินการสอบเทียบทันทีเพื่อความถูกต้องในการสอบเทียบและความปลอดภัยเนื่องด้วยโดยทั่วไประบบท่อเหล็กคาร์บอนที่ใช้กับของเหลวน้ำมันเชื้อเพลิงถูกออกแบบให้ใช้กับระบบของเหลวที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 50 °C ดังนั้นในทางปฏิบัติวิธีที่ดีที่สุดก็คือในขณะที่ทำการสอบเทียบมาตรวัดต้องรักษาให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลต่างระหว่างอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมกับของเหลวที่ใช้เป็นตัวกลางทดสอบให้น้อยมากที่สุดเท่าที่กระทำได้ ดังในรูปที่ 7-100

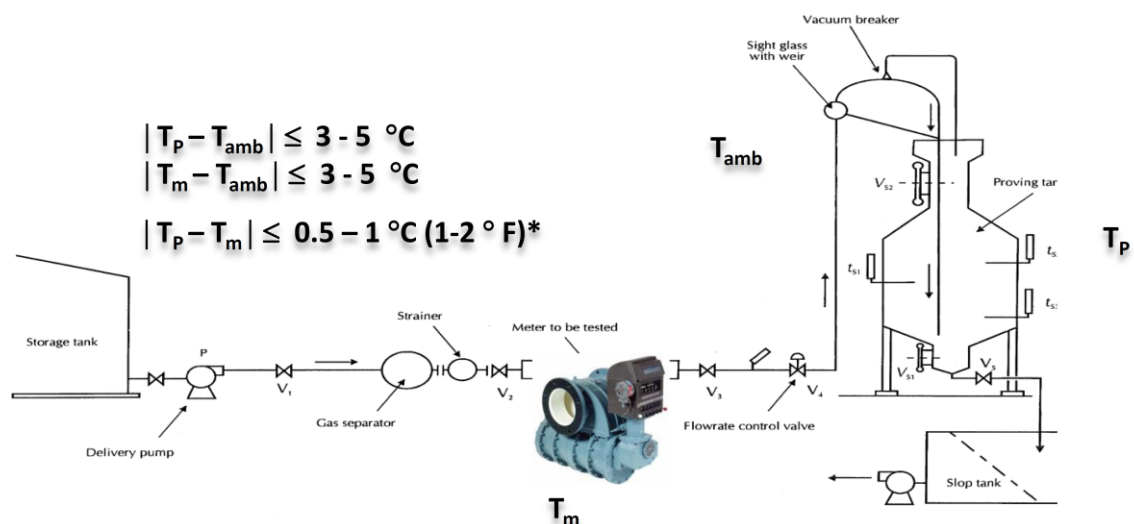
Typical Viscosity and Specific Gravity of Petroleum Products*

Product	Typical Viscosity In cP** @ Degrees F (Degrees C)						S.G. @ Degrees F (Degrees C)	
	30 (-1)	60 (15)	100 (38)	150 (66)	300 (150)	400 (205)	60 (15)	150 (66)
Ethane -LPG	0.07	0.05	0.03				0.38	0
Propane -LPG	0.14	0.12	0.09	0.07			0.51	0.41
Butane - LPG	0.20	0.18	0.15	0.13			0.56	0.49
Gasoline	0.83	0.63	0.49	0.38			0.75	0.70
Water	1.8	1.2	0.7	0.4	0.2	0.1	1.00	0.95
Kerosene	3.5	2.2	1.7	0.9	0.4	0.2	0.82	0.77
Jet Fuel	3.5	2.2	1.7	0.9	0.4	0.2	0.82	0.77
48 API Crude	3.5	2.7	1.7	1.1			0.79	0.74
40 API Crude	10	7	4	2			0.82	0.77
35.6 API Crude	25	16	6	3			0.85	0.80
32.6 API Crude	42	21	9	5			0.86	0.81
Fuel 3 (Max.)		10	5	3	1	0.5	0.90	0.85
Fuel 5 (Min.)		16	7	4	1	0.6	0.97	0.92
Fuel 6 (Min.)		820	150	43	5	2	0.99	0.94
SAE 10 Lub		68	29	11	2	1	0.88	0.83
SAE 30 Lub		450	105	31	4	2	0.90	0.85
SAE 70 Lub			460	95	8	3	0.92	0.87
Bunker C			1500	290	16	5	1.01	0.96
Asphalt				>3000	80	19	0	0

*Data made available from the Crane Co.

**Centipoise (cP) = Specific Gravity (S.G.) x Centistokes (cSt).

ตารางที่ 7-5 ตารางค่าความหนืดของเหลวผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม



รูปที่ 7-100 สภาวะอุณหภูมิแนะนำในการสอบเทียบมาตรวัดปริมาณของเหลวด้วยถังตวงแบบมาตรา

(7) **ความดัน (Pressure)** ปกติโดยทั่วไปถังตวงแบบมาตราส่วนใหญ่จะเป็นระบบเปิดนั่นคือถังตวงแบบมาตรจะเปิดให้ของเหลวภายในถังสัมผัสโดยตรงกับความดันบรรยากาศ แต่ถ้าหากจะมีฝาปิดก็เป็นเพียงฝาปิดป้องกันสิ่งสกปรกตกลงในถังตวงแบบมาตราหรือเพื่อความปลอดภัยในการปฏิบัติงาน หรือต้องการบริหารจัดการไอระเหยของของเหลว เช่นเดินระบบที่ออกจากฝาปิดสำหรับ Vapor Recovery เท่านั้น ถังตวงแบบ

มาตราจึงเป็นการวัดปริมาตรที่ความดันบรรยากาศ ดังนั้นไม่ว่าภายในมาตรวัดจะมีความดันเท่าไรหลังจากผ่านมาตรวัดดังกล่าว ของเหลวก็จะถูกวัดที่ความดันบรรยากาศ ด้วยเหตุนี้การใช้ตัวแปรแก้ไขค่าปริมาณเพื่อใช้แก้ไขความดันจึงต้องกระทำด้วยความเหมาะสม

(8) **อัตราการไหล (Flowrate)** ในทางทฤษฎีไม่มีขีดจำกัดเกี่ยวกับอัตราการไหล แต่ในทางปฏิบัติมีข้อจำกัดไว้ที่อัตราการไหลประมาณ $300 \text{ ม}^3/\text{ชม.}$ ($5 \text{ ม}^3/\text{นาท}$) หรือประมาณ 2,000 บาร์เรลต่อชั่วโมง ดังนั้นถังตวงแบบมาตราที่เป็นไปตามข้อกำหนด API/IP จะถูกกำหนดให้มีปริมาตรของถังตวงแบบมาตราสำหรับการสอบเทียบมาตรวัดขนาดไม่น้อยกว่าปริมาณการส่งจ่ายของมาตรวัดจ่ายผ่านมาตรวัดในเวลาหนึ่งนาท เพราะฉะนั้นสำหรับอัตราการไหล $300 \text{ ม}^3/\text{ชม.}$ ขนาดเล็กสุดของถังตวงแบบมาตราจะเท่ากับ 5 ม^3 (30 อเมริกาบาร์เรล) ซึ่งมีปัญหาในทางปฏิบัติที่ต้องเคลื่อนย้ายถังตวงแบบมาตราซึ่งมีขนาดใหญ่ๆ รวมถึงการติดตั้งและการดูแลรักษาถังตวงแบบมาตราดังกล่าว การเลือกใช้มาตรวัดแบบมาตรา (master meter) ที่มีชั้นความเที่ยงสูงกว่ามาสอบเทียบมาตรวัดด้วยกัน ที่อัตราการไหลมากกว่า $300 \text{ ม}^3/\text{ชม.}$ จึงเป็นตัวเลือกที่น่าพิจารณาทางหนึ่ง



รูปที่ 7-101 ถังตวงแบบมาตราพิกัดกำลังสูงบนรถโมบาย

(9) **ชนิดผลิตภัณฑ์** โดยปกติถังตวงแบบมาตราถูกจำกัดให้ใช้กับผลิตภัณฑ์น้ำมันตามเงื่อนไขของความหนืดดังที่ได้กล่าวมาแล้วอีกทั้งยังสามารถใช้กับน้ำได้ด้วย เมื่อพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้ไม่เหมาะสม เช่นเป็นของเหลวที่ใช้ในการทดสอบทำปฏิกิริยากับตัวถังตวงแบบมาตรา เป็นต้น การเลือกใช้แบบมาตราชนิดอื่นๆ ที่เหมาะสมควรได้รับการพิจารณาใช้แทนถังตวงแบบมาตราต่อไป

(10) **อากาศและไอน้ำ** มาตรวัดซึ่งทำการวัดของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดเป็นค่าปริมาตรแต่ค่าปริมาตรดังกล่าวไม่สามารถบอกได้ว่าเป็นปริมาตรของของเหลว หรือปริมาตรของอากาศหรือไอน้ำ ดังนั้นจำเป็นต้องมีระบบสำหรับทำหน้าที่แยกอากาศหรือไอน้ำออกจากของเหลวภายในระบบการวัดปริมาตรของเหลวให้หมดเสียก่อนที่จะของเหลวไหลผ่านมาตรวัด หรือหากพูดอีกนัยหนึ่งว่า โดยปกติแล้วมาตรวัดปริมาตรของเหลวทั่วไปรวมทั้งมาตรวัดแบบมาตราจะใช้วัดของเหลวซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวสถานะเดียว (single phase) หากของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดดังกล่าวเป็นของไหลที่มี 2 สถานะ (two phases) คือเป็นสถานะของเหลวและสถานะไอ หรือ 3 สถานะ (ไอ, ของเหลว และของแข็ง) ก็จะส่งผลถึงความแม่นยำและความถูกต้องของมาตรวัด ดังนั้นจึงต้องมีวิธีการที่จะกำจัดไอหรือก๊าซที่ผสมอยู่กับของเหลวก่อนเข้าและไหลผ่านมาตรวัดให้อยู่ในสถานะของเหลวเพียงสถานะเดียวเท่านั้น

ตัวอย่าง มาตรวัดแบบมาตรา Class 0.5, OIML R117 ชนิด Oval gear meter มีอัตราการไหลสูงสุด 250 l/min และอัตราการไหลต่ำสุด 50 l/min หากต้องการช่วงความแม่นยำ (accuracy span) สำหรับมาตรวัดแบบมาตรา Class 0.5, OIML R117 ซึ่งติดตั้งเข้ากับระบบแล้ว จึงกำหนดขนาดแบบมาตราเพื่อทำการสอบเทียบมาตรวัดแบบมาตรา

ก) ขนาดต่ำสุดของถังตวงแบบมาตราที่ใช้ในการสอบเทียบ

ควรมีค่าอย่างน้อยเท่ากับ $250 \text{ l/min} \times 1 \text{ min} = 250 \text{ l}$ แต่เพื่อความมั่นใจเราอาจเลือกถังตวงแบบมาตราที่มีพิกัดความจุเท่ากับ 500 ลิตร หรือ 1,000 ลิตร ซึ่งอาจเหมาะสมกว่าในทางปฏิบัติ สำหรับในที่นี้เราเลือก ถังตวงแบบมาตรา 1,000 ลิตร

ข) อัตราเพื่อเหลือเผื่อขนาดของถังตวงแบบมาตรา

ขนาดของถังตวงแบบมาตราที่ใช้สำหรับตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่พิกัดความจุของถังตวงแบบมาตราต้องมีอัตราเพื่อเหลือเผื่อขนาดมีค่าไม่เกิน $\pm 1/5$ เท่าของอัตราเพื่อเหลือเผื่อขนาดของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ปริมาตรทดสอบหรือปริมาตรของถังตวงที่ต้องการทดสอบนั้น แต่ทั้งนี้ปริมาตรที่ทดสอบนั้นต้องมีค่ามากกว่าปริมาตรน้อยที่สุดที่วัดได้ (Minimum Measured Quantity of Measuring System) ของระบบการวัดปริมาตรของเหลว แต่อย่างไรก็ตามเราอาจเลือกให้ถังตวงแบบมาตราที่มีค่าอัตราเพื่อเหลือเผื่อขนาดน้อยกว่า $\pm 1/5$ เท่า เช่น มีค่าเท่ากับ $\pm 1/10$ เท่าของอัตราเพื่อเหลือเผื่อขนาดของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ปริมาตรทดสอบหรือปริมาตรของถังตวงที่ต้องการทดสอบก็สามารถทำได้แต่อย่างไรก็ตามก็ต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นอีกทั้งต้องระลึกว่าเป็นการกระทำเกินความจำเป็นหรือไม่ สำหรับในภาคสนาม การเลือกถังตวงแบบมาตราที่มีค่าอัตราเพื่อเหลือเผื่อขนาดอยู่ระหว่าง $\pm 1/3$ ถึง $\pm 1/5$ เท่าของอัตราเพื่อเหลือเผื่อขนาดของมาตรวัดถือว่าเพียงพออยู่ในระดับที่น่าเชื่อถือระดับหนึ่งแล้ว

ในขณะเดียวกันถังตวงแบบมาตราชั้นสูงกว่า (secondary standard) ซึ่งใช้เพื่อทำการสอบเทียบถังตวงแบบมาตราต่ำลงมา (working standard) ต้องมีอัตราเพื่อเหลือเผื่อขนาดไม่เกินกว่า $\pm 1/5$ ของอัตราเพื่อเหลือเผื่อขนาดของถังตวงแบบมาตรา (working standard)

มาตรวัดแบบมาตรา Class 0.5, OIML R117 นั้นหมายถึงมาตรวัดมีอัตราเพื่อเหลือเผื่อขนาดเท่ากับ $\pm 0.5\%$ (เมื่อติดตั้งเข้ากับระบบแล้ว) ดังนั้นหากเลือกถังตวงแบบมาตราควรมีผลผลิตหรืออัตราเพื่อเหลือเผื่อขนาดอย่างน้อยสุดเท่ากับ $1/3$ (ภาคสนาม) ของ $\pm 0.5\%$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pm 0.166\%$ เมื่อคิด $\pm 0.166\%$ ของปริมาตรสอบเทียบ 1,000 ลิตร นั้นหมายความว่าถังตวงแบบมาตราควรมีขีดชั้นหมายมาตรละเอียดต่ำสุด (discrimination) ไม่เกิน 1.66 ลิตร ($1,000 \text{ ลิตร} \times 0.166\%$) จึงจะสามารถตรวจสอบว่าถังตวงแบบมาตราที่มีผลผลิตเท่ากับ $\pm 0.166\%$ หรือไม่ แต่เนื่องจากงานทางด้านชั่งตวงวัดตามข้อกำหนดของกฎหมาย (Legal Metrology) นั้นได้กำหนดให้เครื่องชั่งตวงวัดทั้งหมดต้องแสดงค่าชั้นหมายมาตรา (scale interval) ในหน่วยเมตริกและแสดงค่าในรูปของ 1×10^k , 2×10^k หรือ 5×10^k โดย k เป็นเลขจำนวนเต็มบวก หรือจำนวนเต็มลบ หรือศูนย์ แต่ถ้าหากเป็นไปได้หรือเรามีถังตวงแบบมาตราซึ่งสามารถมีผลผลิตหรืออัตราเพื่อเหลือเผื่อขนาดเท่ากับ $1/10$ ของ $\pm 0.5\%$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.05% นั้นหมายความว่าถังตวงแบบมาตราควรมีขีดชั้นหมายมาตรละเอียดต่ำสุด (discrimination) ไม่เกิน 0.5 ลิตร ($1,000 \text{ ลิตร} \times 0.05\%$) ก็สามารถเลือกใช้งานได้เช่นเดียวกัน

ค) เส้นผ่านศูนย์กลางคอถังแบบมาตรา (The neck diameter of Prover Tank)

จากขนาดของถังแบบมาตราที่ใช้สำหรับตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่กักความจุของถังแบบมาตราต้องมีอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดมีค่าไม่เกิน $\pm 1/5$ เท่าของอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ปริมาตรทดสอบหรือปริมาตรของถังแบบมาตราที่ต้องการทดสอบนั้นในที่นี้เราเลือก $\pm 1/5$ เท่า

ดังนั้นอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดของถังแบบมาตราขนาดพิกัดความจุ 1,000 ลิตรมีค่าเท่ากับ

$$0.5\% \times (1/10) = 0.05 \%$$

หรือ
$$\text{MPE.} = 0.05\% \times 1,000 \text{ ลิตร} = 0.5 \text{ l.}$$

จากสูตรปริมาตรคอถังแบบมาตรา

$$\text{ปริมาตร } \Delta V = \text{พื้นที่หน้าตัดคอถังแบบมาตรา} \times \text{ความสูงของคอถังแบบมาตรา } (\Delta h)$$

และใช้ความสัมพันธ์

$$\frac{5\text{mm.}}{\text{MPE.}} \leq \frac{\Delta h}{\text{MPE.}} \leq \frac{30\text{mm.}}{\text{MPE.}}$$

โดยในที่นี้เราเลือกเงื่อนไขที่ Δh เท่ากับ 5 mm.

$$\frac{\Delta h}{\Delta V} = \frac{5 \text{ mm.}}{\text{MPE.}} = \frac{5 \text{ mm.}}{500 \text{ ml.}}$$

เมื่อ $1 \text{ ml.} = 1 \text{ cm}^3 = 1,000 \text{ mm}^3$

ดังนั้น $500 \text{ ml.} = 500 \times 10^3 \text{ mm}^3$

ดังนั้นเป็นการพิจารณาเงื่อนไขที่ $\frac{5\text{mm.}}{\text{MPE.}}$

$$\Delta V = \frac{\pi D^2}{4} \times \Delta h$$

$$D^2 = \frac{\Delta V}{\Delta h} \times \frac{4}{\pi}$$

$$D^2 = \frac{500 \times 10^3}{5} \times \frac{4}{\pi} = 127,323.96 \text{ mm.}$$

$$D = 356.83 \text{ mm.}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคอถังแบบมาตราขนาดพิกัดความจุเท่ากับ 1,000 ลิตรมีขนาดเท่ากับ 356.83 มิลลิเมตร หรือมี Sensitivity เท่ากับ 5 ม.ม./0.5 ลิตร

หากเราเลือกอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดของถังแบบมาตราขนาดพิกัดความจุ 1,000 ลิตรมีค่าเท่ากับ $\pm 1/5$ เท่าของอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดของมาตรวัดปริมาตรของเหลว นั่นคือ $0.5\% \times (1/5) = 0.1\%$ หรือ $\text{MPE.} = 0.1\% \times 1,000 \text{ ลิตร} = 10 \text{ l.}$

โดยในที่นี้เราเลือกเงื่อนไขที่ Δh เท่ากับ 5 mm.

$$\frac{\Delta h}{\Delta V} = \frac{5 \text{ mm.}}{\text{MPE.}} = \frac{5 \text{ mm.}}{10,000 \text{ ml.}}$$

$$\Delta V = \frac{\pi D^2}{4} \times \Delta h$$

$$D^2 = \frac{\Delta V}{\Delta h} \times \frac{4}{\pi}$$

$$D^2 = \frac{10,000 \times 10^3}{5} \times \frac{4}{\pi} = 2,546,479.09 \text{ mm.}$$

$$D = 1,595.77 \text{ mm.}$$

มี Sensitivity เท่ากับ 5 ม.ม./10 ลิตร หรือประมาณ 2 ม.ม./4 ลิตร

สรุป เลือกถังตวงแบบมาตราพิกัดความจุ 1,000 ลิตรและเมื่อเลือกอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดของถังตวงแบบมาตรขนาดพิกัดความจุ 1,000 ลิตรมีค่าเท่ากับ $0.5\% \times (1/10) = 0.05\%$ ดังนั้นขีดขึ้นหมายมาตรละเอียดต่ำสุด (discrimination) ไม่เกิน 0.5 ลิตร, มี Sensitivity เท่ากับ 5 ม.ม./0.5 ลิตรหรือประมาณ 2 ม.ม./0.2 ลิตร แต่ถ้าหากเราเลือกอัตราเพื่อเหลือเพื่อขาดของถังตวงแบบมาตรา $0.5\% \times (1/5) = 0.1\%$ ก็จะได้ว่าคอถังตวงแบบมาตรามี Sensitivity เท่ากับ 5 ม.ม./10 ลิตร หรือประมาณ 2 ม.ม./4 ลิตร

ดังนั้นเลือกขนาดคอถังตวงแบบมาตราที่มี Sensitivity ที่มีค่าตั้งแต่ 5 ม.ม./0.5 ลิตรจนถึง 2 ม.ม./4 ลิตร แต่สำหรับถังตวงแบบมาตราซึ่งได้รับการออกแบบพิเศษดังแสดงในรูปที่ 6-17 สามารถมี Sensitivity เท่ากับ 2 ม.ม./1 ลิตร ก็ถือว่าเพียงพอแล้วและมี Sensitivity อยู่ในช่วง 5 ม.ม./0.5 ลิตรจนถึง 2 ม.ม./4 ลิตร ครบตามเงื่อนไข

ANS

เตรียมการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวทั่วไป (Flowmeter) กับมาตรวัดแบบมาตรา (Master Meter)

ก่อนที่จะเริ่มทำการสอบเทียบมาตรวัดอาจมีประเด็นปลีกย่อยมากมายแล้วแต่พื้นที่นั้นๆ เพื่อเป็นการเตรียมการให้มีมุมมองในเบื้องต้นจึงยกประเด็นที่เราอาจต้องเจอในภาคสนาม และควรตรวจสอบ

1. เตรียมระบบท่อและระบบการวัดปริมาตรของเหลว (รูปที่ 7-75) ต้องมีขั้นตอนปฏิบัติงานในการเตรียมระบบท่อให้สมบูรณ์

1.1. โดยเติมของเหลวเข้าระบบ (Fill Line) ให้สมบูรณ์ด้วยการเดินปั๊มเพื่อทำการอัดของเหลวเข้าระบบท่อพร้อมระบายไอและอากาศออกจากระบบ (Vent) ในตำแหน่งจุดสูงของระบบท่อแต่ละช่วงจนมีแต่ของเหลวไหลออกมาแล้วทำการปิดท่อ vent และระบายของเหลวออกจากระบบท่อในแต่ละตำแหน่งจุดต่ำสุดของระบบท่อแต่ละช่วง (drain) จนแน่ใจว่ามีแต่ของเหลวอย่างเดียวออกจากท่อแล้วทำการปิดวาล์ว

1.2. ระบบการวัดปริมาตรของเหลวต้องมีเครื่องกำจัดไอน้ำหรืออากาศ (Air/Gas Eliminator) เพื่อป้องกันไม่ให้ไอน้ำหรืออากาศผ่านเข้าไปในมาตรวัดขณะทำการวัดเพราะเราต้องการวัดอัตราการไหลของเหลวสถานะเดียวเท่านั้น และวาล์วป้องกันการไหลย้อนกลับ (Check Valve) เพื่อป้องกันไม่ให้ของเหลวไหลย้อนกลับสู่มาตรวัดอีก

1.3. ติดตั้งตัวกรอง (Strainer or Filters) ก่อนทางเข้ามาตรวัดเพื่อป้องกันเศษวัสดุหลุดรอดไปทำความเสียหายแก่มาตรวัด ต้องทำการตรวจสอบสภาพตัวกรองให้สะอาดเพียงพอและไม่ขัดขวางการไหลของเหลว อีกทั้งยังควรรักษาอัตราการไหลใช้งานปกติอยู่ ด้วยการตรวจสอบค่าความดันตกคร่อม (pressure drop) ไม่ควรมีค่าสูงกว่าผู้ผลิตกำหนด

1.4. จากนั้นทำการปล่อยให้ของเหลวไหลผ่านมาตรวัดเสียก่อนเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้ระบบท่อและตัวมาตรวัดมีความดันและอุณหภูมิเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุดทั้งระบบ ไม่ควรเริ่มทำการสอบ

เทียบโดยไม่ได้ทำการอัดความดันระบบท่อและระบบการวัดปริมาตรของเหลวให้มีค่าเท่ากันเสียก่อนเพราะจะทำให้บางส่วนของระบบท่อที่มีความดันต่ำอยู่เกิดการอัดตัวด้วยความดันมากเกินไปเมื่อเริ่มทำการเดินปั๊ม จนไปเร่งให้มาตรวัดมีการหมุนมากเกินไปจนความเป็นจริง

1.5. รักษาอัตราการไหลผ่านมาตรวัดที่ทำการสอบเทียบให้คงที่ ยิ่งอัตราการไหลยิ่งคงที่ ยิ่งได้ผลการสอบเทียบแม่นยำขึ้น

1.6. ตรวจสอบระบบท่อภายหลังที่ออกจากมาตรวัดแล้วต้องไม่มีท่อแยกย่อยออกไป ต้องมีเพียงท่อทางเดียววิ่งตรงไปยังถังตวงแบบมาตราหรือไปยังจุดที่มีการซื้อขายเท่านั้น

1.7. ตรวจสอบสภาพโดยทั่วไปของระบบท่อของระบบการวัดปริมาตรของเหลวต้องไม่รอยรั่วซึม โดยเฉพาะตำแหน่งหน้าแปลนหรือข้อต่อต่างๆ

2. ตรวจสอบวาล์วควบคุมการไหล (Flow control valves) ทุกตัวว่ายังคงอยู่ในสภาพการทำงานปกติ เพื่อสามารถควบคุมการไหลได้ปกติตลอดช่วงเวลาการสอบเทียบ การควบคุมอัตราการไหลกระทำได้ด้วยวาล์วทางออกของมาตรวัดแบบมาตรา ไม่ใช่วาล์วทางเข้าเนื่องจากหากใช้วาล์วทางเข้าเป็นตัวปิด-เปิด มาตรวัดจะอ่านค่าเกินความเป็นจริงเพราะของเหลวไหลผ่านมาตรวัดด้วยแรงเฉื่อย

3. ให้ทำการถอดวาล์วควบคุมการไหล (Flow control valves) ออกชั่วคราว ในกรณีทำการสอบเทียบมาตรวัดแบบมาตรา หรือจัดให้วาล์วทำงานในรูปแบบดังรูปที่ 7-97

4. ตรวจสอบและจับเวลารูปแบบอัตราการไหลเป็นอย่างไร

5. หากพบว่ามาตรวัดได้ผ่านการซ่อมแซมควรทำการทดสอบมาตรวัดดังกล่าวเสียก่อน ด้วยการทดสอบ static and dynamic slip tests เพื่อตรวจสอบการรั่วไหลของเหลวผ่านมาตรวัดโดยปราศจากการวัดปริมาตร และตรวจสอบตามรายการระบุโดยผู้ผลิตกำหนด

6. มาตรวัดที่ถูกเลือกให้เป็นมาตรวัดแบบมาตรานั้นต้องมีประวัติการใช้งานและประวัติการซ่อมบำรุงรักษา รวมทั้งประวัติผลการวัดที่น่าเชื่อถือโดยให้ผลการวัดอย่างถูกต้องแม่นยำอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ต้องมีข้อมูลการสอบเทียบครั้งล่าสุดเพื่อดูแนวโน้มผลการวัดของมาตรวัดแบบมาตรา

7. เทอร์โมมิเตอร์และเครื่องวัดความดันต้องได้รับการตรวจสอบและสอบเทียบจากหน่วยงานของรัฐหรือสถาบันที่เชื่อถือได้ และติดตั้งใกล้ทางเข้ามากที่สุด โดยปกติมาตรวัดแบบมาตราจะออกแบบให้สามารถติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์และเครื่องวัดความดันบนตัวเรือนมาตรวัดโดยตรง

8. ถังตวงแบบมาตรา สิ่งที่ต้องให้ความสนใจและควรทำการตรวจสอบให้แน่ใจได้แก่ ตรวจสอบว่าถังตวงดังกล่าวที่ตั้งได้ระดับหรือไม่ ถ้าไม่สามารถกระทำได้ให้หยุดการสอบเทียบจนกว่าสามารถดำเนินแก้ไขปัญหาดังกล่าวแล้วเสร็จ

9. ในขณะที่ทำการสอบเทียบมาตรวัดอยู่นั้นไม่ควรเคลื่อนย้ายหรือทำให้ถังตวงแบบมาตราเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอย่างเด็ดขาด ทั้งนี้ก็เพื่อที่รักษาปัจจัยตัวแปรที่อาจจะมีผลกระทบต่อความแม่นยำในการสอบเทียบ แต่ในกรณีที่ไม่สามารถทำการระบายของเหลวออกจากถังตวงแบบมาตราได้โดยไม่ต้องเคลื่อนย้ายถังนั้น ก็สามารถทำการเคลื่อนย้ายถังตวงแบบมาตราเพื่อนำของเหลวไประบายอีกสถานที่หนึ่งได้แต่ต้องกระทำด้วยความระมัดระวังเพื่อรักษาปัจจัยการสอบเทียบให้อยู่ในสภาวะใกล้เคียงกันให้มากที่สุดเท่าที่จะกระทำได้ โดย

9.1. เมื่อจัดให้ถังตวงแบบมาตรายูในตำแหน่งที่ถูกต้องแน่นอนแล้วและได้ทำการปรับระดับเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ให้ทำเครื่องหมายบนพื้นตำแหน่งที่ตั้งอยู่ เพื่อหลังจากเคลื่อนย้ายถังไประบายของเหลวออกแล้วสามารถเคลื่อนกลับมาอยู่ตำแหน่งที่แน่นอนกับตำแหน่งก่อนที่มีการเคลื่อนออกไป

9.2. เมื่อกลับมาอยู่ในตำแหน่งเดิมเป็นที่เรียบร้อยแล้วให้ทำการตรวจเช็คและปรับระดับถังตวงแบบมาตราใหม่ทุกครั้ง

10. รักษาระยะเวลารอบการสอบเทียบ (proving run) ให้คงที่ ระยะเวลารอบการสอบเทียบรวมถึงระยะเวลาการระบายของเหลว (drainage time) ออกจากถังตวงแบบมาตราโดยจะต้องมีระยะเวลาตามที่ระบุ Drain time ของถังตวงแบบมาตราในแต่ละรอบการสอบเทียบ

11. รอบการสอบเทียบ

11.1. จำนวนรอบการสอบเทียบโดยปกติแล้ว ควรกระทำอย่างน้อย 4 รอบการสอบเทียบที่อัตราการไหลคงที่ค่าหนึ่งๆ และรวมการทำ wet run อีก 1 รอบซึ่งกระทำก่อนการเริ่มทำการสอบเทียบจริง ดังนั้นจึงรอบการสอบเทียบทั้งหมดรวมไม่น้อยกว่า 5 รอบ แต่ในการคิดคำนวณปริมาตรจะนำค่าที่อ่านได้จาก 4 รอบหลังมาใช้เท่านั้น จะไม่นำค่ารอบที่ทำ wet run มาใช้ในการคำนวณเด็ดขาด

11.2. ต้องรักษาเวลาระหว่างรอบการสอบเทียบ (proving run) และระยะเวลาการทำ wet run ให้เท่ากันหรือใกล้เคียงกันให้มากที่สุด ไม่เช่นนั้นการทำ wet run ก็ถือว่าสูญเปล่าไปไม่มีประโยชน์อันใด

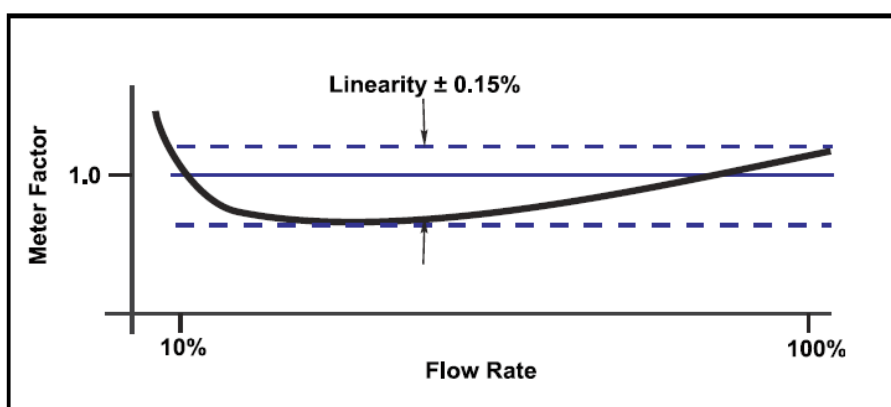
11.3. ด้วยอัตราการไหลที่แตกต่างกัน เพื่อสามารถใช้ประเมินสมรรถนะมาตรวัดครอบคลุมช่วงอัตราการไหล Q_{max} ถึง Q_{min} ของมาตรวัด เช่น อัตราการไหลที่ Q_{max} , $0.8Q_{max}$, $0.6Q_{max}$, $0.4Q_{max}$, $0.2Q_{max}$ และ Q_{min} โดยมีสถานะอุณหภูมิและความดันใกล้เคียงกับสถานะอุณหภูมิและความดันใช้งานจริงของมาตรวัด

11.4. ต้องใช้ของเหลวตัวกลางสำหรับการสอบเทียบเช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานจริงๆ

11.5. ในการสอบเทียบ 5 ครั้งติดต่อกันให้ได้ค่าความสามารถทำซ้ำได้ (repeatability) ไม่มากกว่า 0.02 % ที่อัตราการไหลคงที่ค่าหนึ่งๆ

11.6. ในการสอบเทียบแต่ละครั้งที่อัตราการไหลคงที่ค่าหนึ่งๆ เราสามารถหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ได้ ค่าหนึ่งดังนั้นค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดจึงควรมีค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของแต่ละรอบการสอบเทียบมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดเพียงค่าเดียวที่อัตราการไหลคงที่ค่าหนึ่งๆ

11.7. ในกรณีมาตรวัดแบบมาตราควรมีค่า Linearity ตลอดช่วงการวัดได้ ($Q_{min} - Q_{max}$) ไม่เกิน 0.15%



รูปที่ 7-102 Linearity ของมาตรวัด

12. ในการปิด-เปิดวาล์วขณะทำการสอบเทียบก็เป็นอีกเรื่องหนึ่งที่ต้องให้ความสนใจเช่นกัน

12.1. ในกรณีที่ใช้ระบบ manual สำหรับควบคุมการปิด-เปิดวาล์วด้วยมือ อัตราการหมุนวาล์วเพื่อปิด-เปิดวาล์วและอัตราการลดอัตราการไหลของเหลวในแต่ละครั้งต้องกระทำให้มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้หากมีการปิด-เปิดวาล์วด้วยอัตราที่ไม่เท่าหรือใกล้เคียงกัน หากการไหลของเหลวเกิด hydraulic shock เช่น water hammer จะส่งผลกระทบต่อระบบการวัดและอาจเกิดการไหลเล็ดลอดผ่านตัวมาตรวัด ส่งผลให้ความแม่นยำในการสอบเทียบมีค่าต่ำและค่าความสามารถทำซ้ำได้มีค่าสูง จนผลการสอบเทียบไม่ผ่านก็อาจเป็นไปได้ ในกรณีที่ใช้ระบบการควบคุมการปิด-เปิดอัตโนมัติ (automatic pre-set control) ก็ควรทำการบันทึกค่าอัตราการปิด-เปิดไว้ด้วยในรายงานผลการบันทึก

12.2. ควรติดตั้งวาล์วปิด-เปิดด้านทางออกของมาตรวัดที่ทำการสอบเทียบ เพื่อป้องกันการไหลออกจากมาตรวัดของของเหลวด้วยแรงเฉื่อยของมวลของเหลว

การคำนวณผลการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวทั่วไป (Flowmeter) กับมาตรวัดแบบมาตรา (Master Meter)

เพราะการคำนวณผลการสอบเทียบของมาตรวัดปริมาตรของเหลวทั่วไปซึ่งใช้ในวัดซื้อขาย หรือมาตรวัดแบบมาตราด้วยถังตวงแบบมาตรามีวิธีการคิดเช่นเดียวกันจึงขอรวมเป็นเรื่องเดียวกันไปเสียเลย แต่หากมีการใช้สมการเพื่อไม่ให้สับสน เราให้ “m” แทนมาตรวัด และเราให้ “MM” แทนมาตรวัดแบบมาตรา แต่ในที่นี้เราใช้ “m”

เนื่องจากการซื้อขายผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมจะคิดปริมาตรที่ความดันบรรยากาศ (P_{atm}) และอุณหภูมิอ้างอิง (T_0) จึงต้องทำการแก้ไขปริมาตรที่อ่านจากมาตรวัดและปริมาตรที่ได้จากถังตวงแบบมาตรา (Prover Tank) ไปยังสภาวะอ้างอิง (อุณหภูมิอ้างอิงและความดันอ้างอิง) โดยทั่วไปคืออุณหภูมิอ้างอิง (T_0) เช่น $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ และความดันบรรยากาศ (P_{atm}) เราจึงพิจารณา

1. พิจารณาตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{tw} , C_{ts} , C_{ps} , C_{cl} และ C_{pl}

1.1. ในเทอมอุณหภูมิของเหลวตัวกลางสอบเทียบเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวปิโตรเลียม เมื่ออุณหภูมิที่ถังตวงแบบมาตราไม่เท่ากับอุณหภูมิมาตรวัดที่ทำการสอบเทียบ $T_p \neq T_m$

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{ts}

- C_{tsP} นำมาพิจารณา
- C_{tsm} สามารถตัดทิ้งได้ เพราะถือว่าตัวมาตรวัด (meter) มีการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิน้อยมาก

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{cl}

- C_{clP} นำมาพิจารณา
- C_{clm} นำมาพิจารณา

เนื่องจากเราใช้สารตัวกลางทดสอบที่เป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวปิโตรเลียมซึ่งเปลี่ยนแปลงปริมาตรตามอุณหภูมิ แต่ถ้าหากเป็นน้ำสะอาด C_{clP} และ C_{clm} สามารถตัดทิ้งได้ ไม่ต้องนำมาพิจารณา แต่จะพิจารณาค่า C_{tw} แทน

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{tw}

- C_{tw} สามารถตัดทิ้งได้ เพราะใช้น้ำสะอาดหรือน้ำบริสุทธิ์เป็นตัวกลาง

1.2. ในทอมความดันของเหลวตัวกลางสอบเทียบเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวปิโตรเลียม เมื่อความดันที่ถึงดวงแบบมาตราไม่เท่ากับความดันที่มาตรวัดที่ทำการสอบเทียบ โดยความดันภายในถึงดวงแบบมาตราเท่ากับความดันบรรยากาศ ($P_p = P_{atm}$) (ถึงดวงเป็นถึงเปิด) แต่ความดันภายในมาตรวัดไม่เท่ากับความดันบรรยากาศ ($P_m \neq P_{atm}$)

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{ps}

- $C_{psP} = 1$ เนื่องจากความดันภายในถึงดวงแบบมาตรามีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ หรือความดันอ้างอิง ความดันที่กระทำต่อตัวเรือนถึงดวงแบบมาตราจึงถือว่ามีความน้อยมาก
- C_{psm} สามารถตัดทิ้งได้ เพราะถือว่าตัวเรือนมาตรวัด (meter) มีการขยายตัวเนื่องจากความดันน้อยมากถึงแม้มีความดันภายในมาตรวัด แต่เกิดสภาวะความสมดุลของแรงดันภายในกับภายนอกของห้องวัด (Calibrated Chamber) ดังนั้นภายในห้องวัดจึงไม่ได้รับรองรับความดันสุทธิที่กระทำต่อผนังห้องวัด

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{pl}

- $C_{plP} = 1$ เนื่องจากความดันภายในถึงดวงแบบมาตรามีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ หรือความดันอ้างอิง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากความดันกระทำต่อของเหลวจึงมีค่าน้อยมาก
- C_{plm} นำมาพิจารณา เพราะผลิตภัณฑ์ของเหลวปิโตรเลียมมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรตามความดันที่ถูกกระทำ

สรุปว่าค่าที่ต้องนำมาคิดทั้งหมดคือ

C_{plm}	C_{tlm}
C_{tlP}	C_{tsP}

2. การคำนวณหาค่าปริมาตรของถึงดวงแบบมาตราและมาตรวัดปริมาตรของเหลว

เมื่อทราบถึงตัวแปรแก้ไขปริมาณที่มีผลต่อปริมาตรของเหลว ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงค่าปริมาตรที่อ่านได้จากถึงดวงแบบมาตรา V_{Pr} ตามสเกลของถึงดวงแบบมาตราซึ่งเป็นค่าปริมาตรถึงดวงแบบมาตราที่ถูกปรับค่าปริมาตรไปยังสภาวะอ้างอิงหรือสภาวะมาตรฐานแล้ว (อุณหภูมิอ้างอิงและความดันบรรยากาศประจำแต่ละถึง) และปรับค่าปริมาตรซึ่งอ่านได้จากมาตรวัด V_{mr} (indicated volume) ไปเป็นค่าปริมาตรที่ค่าสภาวะอ้างอิง (T_o , P_{atm}) เพื่อสามารถทำการเทียบปริมาตรที่สภาวะเดียวกัน

• สำหรับถึงดวงแบบมาตรา (Prover Tank)

มีสภาวะขณะทำการสอบเทียบ ณ อุณหภูมิ (T_p) และความดันบรรยากาศ ($P_p = P_{atm} = P_o$) และอ่านปริมาตรได้ก็คือถึงดวงแบบมาตราเท่ากับ V_{Pr} ตามสเกลของถึงดวงแบบมาตราซึ่งเป็นสเกลที่อุณหภูมิอ้างอิงของ

ถึงดวงแบบมาตรา ดังนั้นจึงต้องทำการปรับค่าปริมาตรที่อ่านได้จากถึงดวงแบบมาตรา อันเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อผนังถึงดวงแบบมาตราด้วย

$$V_{TOP} = V_{Pr} \times C_{tsP} \quad (\text{Eq.7-18})$$

เราจะได้ค่าปริมาตรจริงที่อุณหภูมิขณะสอบเทียบ จากนั้นทำการปรับค่าปริมาตรของเหลวที่สภาวะอุณหภูมิขณะสอบเทียบ T_p ไปเป็นอุณหภูมิอ้างอิง T_0 ขณะมีความดัน $P_p = P_{atm}$ อันเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อของเหลว

$$V_{OP} = V_{TOP} \times C_{tlP} \quad (\text{Eq.7-19})$$

ดังนั้น
$$V_{OP} = V_{Pr} \times C_{tsP} \times C_{tlP} \quad (\text{Eq.7-20})$$

● **สำหรับมาตรวัด (meter)** (ไม่มีตัวชดเชยค่าอุณหภูมิอัตโนมัติ)

สภาวะขณะทำการสอบเทียบมาตรวัดอ่านค่าปริมาตรส่งจ่ายได้ V_{mr} จากตัวมาตรวัดโดยมาตรวัดมีอุณหภูมิ T_m และความดันภายในมาตรวัด (P_m)

ทำการปรับค่าปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดจากสภาวะอุณหภูมิ T_m ไปเป็นอุณหภูมิ T_0 ขณะที่มีความดัน P_m อันเนื่องมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อของเหลว

$$V_{OPm} = V_{mr} \times C_{tlm} \quad (\text{Eq.7-21})$$

ในขณะเดียวกันก็ทำการปรับค่าปริมาตรของเหลวที่สภาวะความดัน P_m ไปยังปริมาตรที่ความดันบรรยากาศหรือความดันอ้างอิง P_{atm} ขณะที่อุณหภูมิ T_0 อันเนื่องจากอิทธิพลของความดันมีผลต่อของเหลวภายในตัวเรือนมาตรวัด

$$V_{Om} = V_{OPm} \times C_{plm} \quad (\text{Eq.7-22})$$

ดังนั้นแทนค่า สมการ (Eq.7-21) ลงใน สมการ (Eq.7-22)

$$V_{Om} = V_{mr} \times C_{plm} \times C_{tlm} \quad (\text{Eq.7-23})$$

ค่าปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัด V_{mr} ถูกปรับไปที่ปริมาตรที่สภาวะมาตรฐานหรือสภาวะอ้างอิง ดังในสมการ (Eq.7-23) รูปที่ 7-103

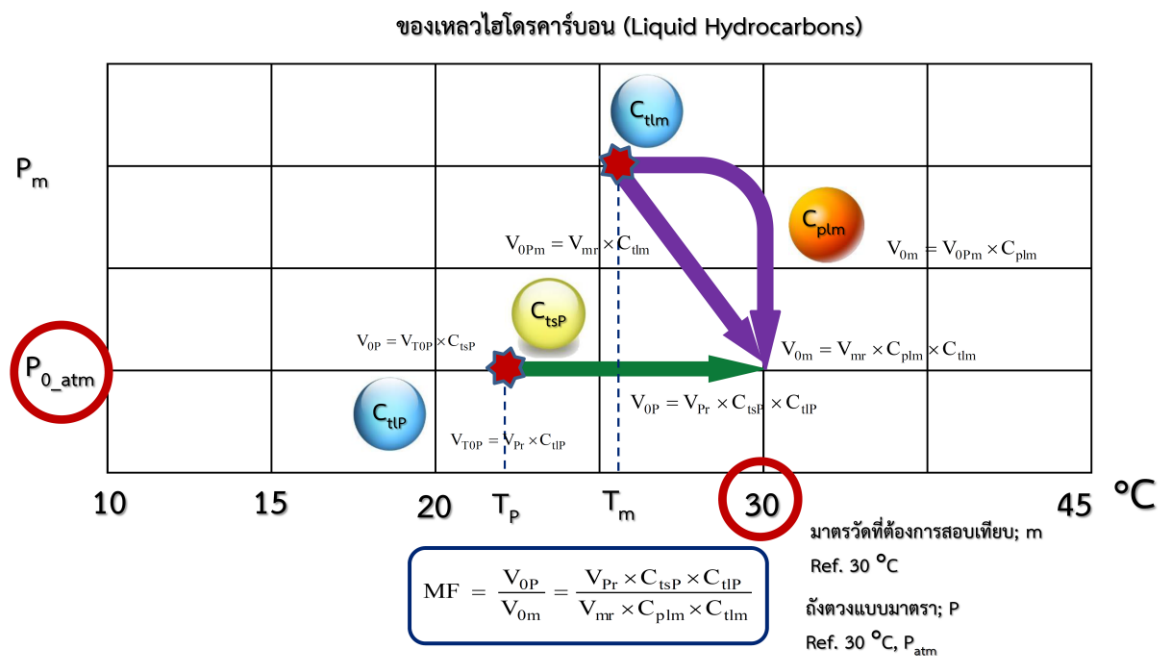
3. การหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (Meter Factor; MF)

จากความหมายของมิเตอร์แฟคเตอร์ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 1 เพราะฉะนั้นเราจะได้ว่า

$$\begin{aligned} MF &= \frac{V_{OP}}{V_{Om}} \\ &= \frac{V_{Pr} \times C_{tsP} \times C_{tlP}}{V_{mr} \times C_{plm} \times C_{tlm}} \end{aligned} \quad (\text{Eq.7-24})$$

เนื่องจากปกติแล้วในการสอบเทียบมาตรวัดมาตรฐานจะกระทำการสอบเทียบจำนวน 5 ครั้งติดต่อกัน โดยในแต่ละครั้งของรอบการสอบเทียบสามารถหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ได้ค่าหนึ่ง ดังนั้นค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดมาตรฐานจึงควรนำค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของแต่ละรอบการสอบเทียบมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อเป็นค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดมาตรฐานเพียงค่าเดียวและหากพบว่าระหว่างการสอบเทียบ 5 ครั้งนั้น เกิดมีครั้งหนึ่งครั้งใดได้

ทำการสอบเทียบผิดพลาดไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนใดหรือระยะเวลาที่ไม่เท่ากับรอบการสอบเทียบเดิมก่อนหน้านี้
จำเป็นต้องดำเนินการสอบเทียบใหม่ทันที โดยให้ถือว่ารอบการสอบเทียบครั้งต่อไปเป็นรอบการสอบเทียบครั้งที่
หนึ่งเพื่อให้มีการสอบเทียบ 5 ครั้งที่ติดต่อกันอีกครั้งใหม่



รูปที่ 7-103 การปรับสภาวะขณะวัดไปยังสภาวะอ้างอิง แล้วเทียบปริมาตรที่วัดได้ที่สภาวะอ้างอิงเดียวกัน

ในกรณีของเหลวตัวกลางสอบเทียบเป็น “น้ำสะอาด” เราจะไม่มีเทอม C_{plm} C_{tlm} แต่มีเทอม C_{tw} ซึ่ง
จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 MF &= \frac{V_{0P}}{V_{0m}} \\
 &= \frac{V_{Pr} \times C_{tsP} \times C_{twP}}{V_{mr} \times C_{twm}} \\
 &= \frac{V_{Pr} \times C_{tsP} \times \frac{\rho_{tP}}{\rho_{t0P}}}{V_{mr} \times \frac{\rho_{tm}}{\rho_{t0m}}}
 \end{aligned} \tag{Eq.7-25}$$

เมื่อทำการสอบเทียบที่อัตราการไหลคงที่หลายอัตราการไหลก็นำมาเขียนเป็นกราฟสมรรถนะของมาตร
วัดปริมาตรของเหลวดังรูปที่ 7-74 ส่วนจะมีลักษณะโค้งคว่ำลงหรือโค้งหงายขึ้น หรือรูปร่างประหลาดๆ ก็ขึ้นอยู่กับ
กับชนิดและหลักการทำงานของมาตรวัดปริมาตรของเหลวนั้นๆ

4. ค่าผลผลิตของมาตรวัด (Meter Error)

จากนิยามจะได้ว่า

$$Error(@T_0, P_{atm}) = V_{0m} - V_{0P} \tag{Eq.7-26}$$

ซึ่งโดยปกติแล้วมักนิยมบอกค่าผลผิดของมาตรวัด (meter error) เป็นเปอร์เซ็นต์ โดยเทียบจากค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) ดังนี้คือ

$$\begin{aligned}\%Error(@T_0, P_{atm}) &= \frac{V_{0m} - V_{0p}}{V_{0p}} \times 100\% \\ &= \left(\frac{V_{0m}}{V_{0p}} - 1 \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{1}{MF} - 1 \right) \times 100\% \quad \% \quad (Eq.7-27)\end{aligned}$$

ในการตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดในระบบการวัดปริมาตรของเหลวให้ค่าผลผิดของมาตรวัดในไม่เกินชั้นความเที่ยงตามที่กำหนดไว้ เช่น ชั้น 0.5 มี MPE เท่ากับ $\pm 0.5\%$ แต่สำหรับมาตรวัดแบบมาตราซึ่งได้รับการสอบเทียบแบบ stand alone (ไม่ใช่ “ระบบการวัดปริมาตรของเหลว”) หากเราต้องนำไปใช้สอบเทียบหรือตรวจสอบมาตรวัดชั้น 0.5 แล้วผลผิดหรืออัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ $1/3$ ของอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดของมาตรวัดนั้น นั่นคือ $1/3 \times (0.5\%) = 0.166\%$ แต่ผู้ผลิตมาตรวัดแบบมาตราส่วนใหญ่จะมีอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดประมาณ 0.1%

5. ค่าความสามารถทำซ้ำได้ (Repeatability)

เกณฑ์การตัดสินว่ามาตรวัดมีความแม่นยำถูกต้องเพียงพอที่จะนำไปใช้งานได้ จะพิจารณาได้จากเมื่อทำการสอบเทียบมาตรวัดด้วยถังตวงแบบมาตรา แล้วหาค่าความสามารถทำซ้ำได้จาก

$$\text{Re peatability} = \frac{MF_{\max} - MF_{\min}}{\left(\frac{MF_{\max} + MF_{\min}}{2} \right)} \times 100\% \quad (Eq.7-28)$$

หรือในบางครั้งก็ใช้ค่า

$$\text{Re peatability} = \left(\frac{MF_{\max}}{MF_{\min}} - 1 \right) \times 100\% \quad (Eq.7-29)$$

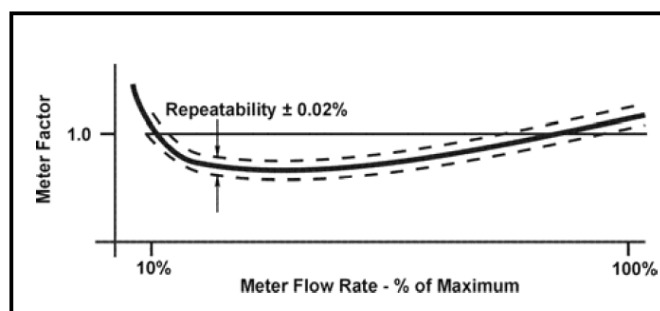
แต่ในที่นี้แนะนำให้ใช้ค่าในสมการ (Eq.7-28)

โดยมาตรวัดที่มีความแม่นยำน่าเชื่อถือได้จะต้องให้ค่าความสามารถทำซ้ำได้

$$\text{Re peatability} \leq 0.05\% \quad (Eq.7-30)$$

แต่มาตรวัดแบบมาตราควรมีค่าความสามารถทำซ้ำได้

$$\text{Re peatability} \leq 0.02\% \quad (Eq.7-31)$$



รูปที่ 7-104 ตัวอย่าง กราฟ Repeatability ที่แต่ละค่าอัตราการไหล

6. กรณีอุณหภูมิอ้างอิงของถังตวงแบบมาตรวัด (Prover Tank) ต่างจากอุณหภูมิอ้างอิงของมาตรวัด (Meter)

สามารถคำนวณค่ามิเตอร์แฟคเตอร์มาตรวัด ได้ดังนี้

กรณี 1 อุณหภูมิอ้างอิงประจำถังตวงแบบมาตรวัด $T_{op} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} อุณหภูมิอ้างอิงประจำมาตรวัด $T_{om} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm}

ดังนั้นเราจำเป็นต้องทำการปรับปริมาตรของถังตวงแบบมาตรวัดจากอุณหภูมิอ้างอิงประจำถังตวงแบบมาตรวัด $T_{op} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} ไปยังค่าปริมาตรที่ $T_0 = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} เพื่อที่จะสามารถทำการเปรียบเทียบปริมาตรที่สถานะเดียวกันระหว่างปริมาตรของถังตวงแบบมาตรวัดกับมาตรวัดได้

$$\begin{aligned} MF_{30C} &= \frac{V_{Pr} \times C_{tsP} \times C_{tlP}}{V_{mr} \times C_{plm} \times C_{tlm}} \\ &= \frac{V_{Pr} \times (1 + \gamma(T_p - 15)) \times \frac{e^{[-\alpha T \times (T_p - 15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (T_p - 15))]}{e^{[-\alpha T \times (15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (15))]}}}{V_{mr} \times \left[\frac{1}{(1 - P_m) \times F} \right] \times \frac{e^{[-\alpha T \times (T_m - 15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (T_m - 15))]}{e^{[-\alpha T \times (15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (15))]}}} \end{aligned} \quad (\text{Eq.7-32})$$

กรณี 2 อุณหภูมิอ้างอิงประจำถังตวงแบบมาตรวัด $T_{op} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} อุณหภูมิอ้างอิงประจำมาตรวัด $T_{om} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm}

ดังนั้นเราจำเป็นต้องทำการปรับปริมาตรของถังตวงแบบมาตรวัดจากอุณหภูมิอ้างอิงประจำถังตวงแบบมาตรวัด $T_{op} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} ไปยังค่าปริมาตรที่ $T_0 = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} เพื่อที่จะสามารถทำการเปรียบเทียบปริมาตรที่สถานะเดียวกันระหว่างปริมาตรของถังตวงแบบมาตรวัดกับมาตรวัดได้

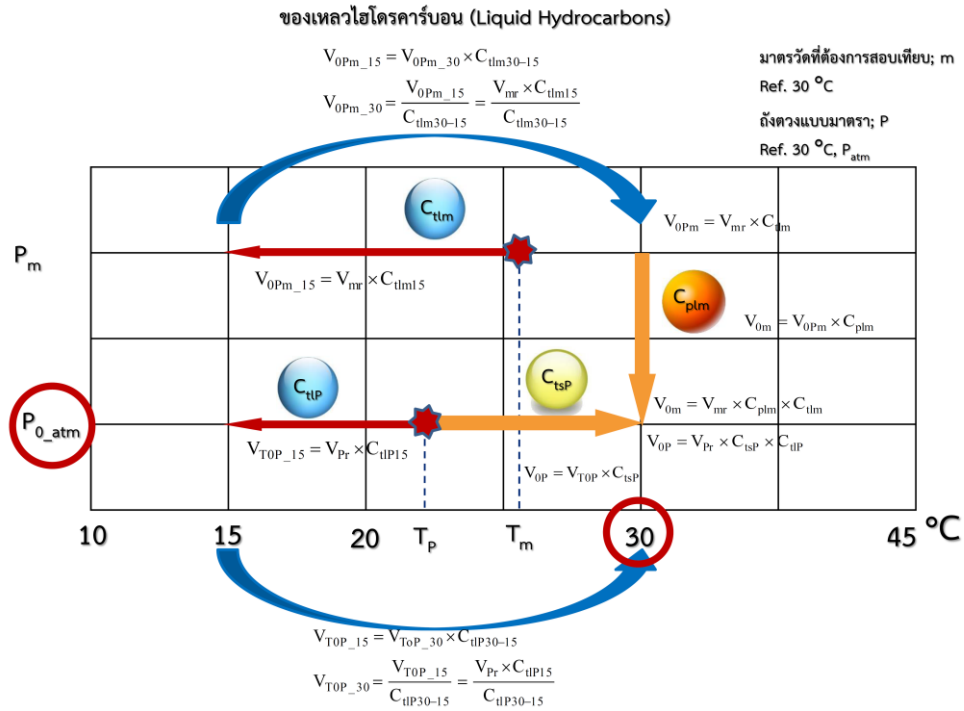
$$\begin{aligned} MF_{15C} &= \frac{V_{Pr} \times C_{tsP} \times C_{tlP}}{V_{mr} \times C_{plm} \times C_{tlm}} \\ &= \frac{V_{Pr} \times (1 + \gamma(T_p - 30)) \times \frac{e^{[-\alpha T \times (T_p - 15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (T_p - 15))]}{e^{[-\alpha T \times (T_m - 15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (T_m - 15))]}}}{V_{mr} \times \left[\frac{1}{(1 - P_m) \times F} \right] \times \frac{e^{[-\alpha T \times (T_m - 15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (T_m - 15))]}{e^{[-\alpha T \times (15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (15))]}}} \end{aligned} \quad (\text{Eq.7-33})$$

กรณี 3 อุณหภูมิอ้างอิงประจำถังตวงแบบมาตรวัด $T_{op} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} อุณหภูมิอ้างอิงประจำมาตรวัด $T_{om} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm}

ในกรณีเนื่องจากทั้งถังตวงแบบมาตรวัดและมาตรวัดมีสถานะอ้างอิงที่สถานะเดียวกัน ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำการปรับค่าปริมาตรแต่อย่างใด

$$\begin{aligned} MF_{15C} &= \frac{V_{Pr} \times C_{tsP} \times C_{tlP}}{V_{mr} \times C_{plm} \times C_{tlm}} \\ &= \frac{V_{Pr} \times (1 + \gamma(T_p - 15)) \times \frac{e^{[-\alpha T \times (T_p - 15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (T_p - 15))]}{e^{[-\alpha T \times (T_m - 15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (T_m - 15))]}}}{V_{mr} \times \left[\frac{1}{(1 - P_m) \times F} \right] \times \frac{e^{[-\alpha T \times (T_m - 15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (T_m - 15))]}{e^{[-\alpha T \times (15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (15))]}}} \end{aligned} \quad (\text{Eq.7-34})$$

กรณี 4 อุณหภูมิอ้างอิงประจำถังตวงแบบมาตรา $T_{OP} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} อุณหภูมิอ้างอิงประจำมาตรวัด $T_{Om} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm}



รูปที่ 7-105 ปรับสถานะขณะวัดไปยังสถานะอ้างอิง C_{tl} ที่ต้องปรับย้อนกลับไป 15 °C ก่อนปรับมายัง 30 °C

ในกรณีเนื่องจากทั้งถังตวงแบบมาตราและมาตรวัดมีสถานะอ้างอิงที่สถานะเดียวกัน ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำการปรับค่าปริมาตรแต่อย่างใด

$$MF_{30C} = \frac{V_{Pr} \times C_{tsP} \times C_{tlP}}{V_{mr} \times C_{plm} \times C_{tlm}}$$

$$= \frac{V_{Pr} \times (1 + \gamma(T_p - 30)) \times \frac{e^{[-\alpha T \times (T_p - 15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (T_p - 15))]}{e^{[-\alpha T \times (15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (15))]}}}{V_{mr} \times \left[\frac{1}{(1 - P_m) \times F} \right] \times \frac{e^{[-\alpha T \times (T_m - 15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (T_m - 15))]}{e^{[-\alpha T \times (15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (15))]}}}$$

(Eq.7-35)

ตัวอย่างการสอบเทียบมาตรวัดมาตรฐานด้วยถังตวงแบบมาตรา

ข้อมูลถังตวง	ใช้ถังตวงแบบมาตราหมายเลข	8-31
	ขนาด	3000 ลิตร
	อุณหภูมิอ้างอิง	30 °C
	สัมประสิทธิ์การขยายของถัง	0.0000477 /°C
	วัสดุที่ใช้ทำถังตวงแบบมาตรา	Stainless steel

ข้อมูลมาตรวัดมาตรฐาน

หมายเลข	6-37
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง	4 นิ้ว
อัตราการไหล	2200 ลิตร/นาที่

สารตัวกลางที่ใช้

เบนซินธรรมดาไร้สาร(GPA)	
ความหนาแน่น	0.778 g/cm ³

วิธีคำนวณ

<u>รอบที่3</u>	ที่ถังตวง		
	อ่านค่าปริมาตร	2994.4	ลิตร
	อุณหภูมิ	34.2	°C
	ที่มาตรวัดมาตรฐาน		
	อ่านค่าปริมาตรได้	2993.0	ลิตร
	อุณหภูมิ	34.2	°C
	ความดัน	117.21	Kpa

คำนวณหาปริมาตรน้ำมันที่ถังตวงแบบมาตราที่สภาวะอ้างอิง

อ่านปริมาตรที่ถังตวงแบบมาตราแล้วแก้ไขด้วยค่าการขยายตัวของถังตวงแบบมาตรา

$$V_p = V_{Pr} \times C_{tsP}$$

จะได้เป็นปริมาตรที่ T_p, P₀ ต่อไปให้ปรับค่าปริมาตรที่อ่านได้ไปเป็นค่าปริมาตรที่สภาวะอ้างอิง (T₀,P₀)

ดังนั้น

$$V_{0P}=V_{Pr} \times C_{tsP} \times C_{tP}$$

เมื่อ

$$V_{Pr} = 2999.4 \text{ ลิตร}$$

$$C_{tsP} = 1 + \gamma(t - t_0)$$

$$t_0 = 30 \text{ °C}$$

$$\gamma = 0.0000477 \text{ /°C}$$

ดังนั้น

$$C_{tsP} = 1 + 0.0000477(34.2 - 30) \\ = 1.000200$$

หาค่า C_{tP} เพื่อปรับค่าปริมาตรไปที่สภาวะอ้างอิง 30 °C เปิดตาราง API 54B หาค่า C_{tP} ความหนาแน่น 778 กรัม/ลิตร ที่อุณหภูมิ 34.2 °C จะได้

$$C_{tP} = 0.995407$$

แทนค่า C_{tsP} C_{tP} ในสมการ (1)

$$V_{0P} = 2999.4 \times (1.000200 \times 0.995407)$$

คูณค่าแก้ไขแล้วปัดให้เหลือทศนิยม 6 ตำแหน่งก่อนแล้วจึงคูณกับค่าปริมาตร

$$V_{0P} = 2999.4 \times 0.995606 \\ = 2986.2 \quad \text{ลิตร}$$

ดังนั้นค่าปริมาตรน้ำมันที่ถึงตวงแบบมาตราเมื่อแก้ไขไปที่สภาวะอ้างอิง (T_0 , P_0) แล้วเท่ากับ **2986.2**

ลิตร

คำนวณหาปริมาตรน้ำมันที่สภาวะอ้างอิงที่ไหลผ่านมาตรวัดมาตรฐาน

ความดันของมาตรวัดมาตรฐานไม่เป็นความดันบรรยากาศ $P_{MM} \neq P_{atm}$ ปรับค่าปริมาตรที่อ่านจากมาตรวัดมาตรฐานให้เป็นค่าปริมาตรที่สภาวะอ้างอิง (T_0, P_0)

$$V_{0MM} = V_{MM} \times C_{pIMM} \times C_{tIMM}$$

เมื่อ

$$V_{MM} = 2993.0 \text{ ลิตร}$$

$$T_{MM} = 34.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_{MM} = 117.21 \text{ Kpa}$$

หาค่า C_{pIMM}

$$C_{pIMM} = \frac{1}{1 - (P - P_e)F}$$

เมื่อ

$$P = 117.21 \text{ Kpa}$$

$P_e = 0$ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม (เบนซิน) มีความดันไอสมบูรณ์เท่ากับความดันบรรยากาศ

$$F = e^{\left(\frac{-1.60280 + 0.0002159T + \frac{0.87096}{\rho_{15}^2} + \frac{0.0042092T}{\rho_{15}^2}} \right)} \times 10^{-6}$$

เมื่อ

$$T = 34.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{15} = 778.0 \text{ กรัม/ลิตร}$$

ดังนั้น

$$F = e^{\left(\frac{-1.60280 + (0.0002159 \times 34.2) + \frac{0.87096}{0.778^2} + \frac{0.0042092 \times 34.2}{0.778^2}} \right)} \times 10^{-6}$$

$$= 1.068 \times 10^{-6}$$

แทนค่า F ในสมการ

$$C_{plMM} = \frac{1}{1 - (117.21 \times 1.068 \times 10^{-6})}$$

$$= 1.000125$$

เปิดตารางหาค่า C_{dMM} ความหนาแน่น 0.778 กรัม/ลิตร ที่อุณหภูมิ 34.2 °C จะได้

$$C_{dMM} = 0.995407$$

แทนค่า C_{plMM} , C_{dMM} เพื่อหาปริมาตรที่ผ่านมาตรวัดมาตรฐานที่สภาวะอ้างอิง

$$V_{0MM} = 2993.0 \times 1.000125 \times 0.995407$$

$$= 2993.0 \times 0.995531$$

$$= 2976.6 \quad \text{ลิตร}$$

หาค่า

$$MF = \frac{V_{0p}}{V_{0MM}}$$

$$= \frac{2986.2}{2979.6}$$

$$= 1.002215$$

หาค่า Repeatability

จะหาได้จากค่า Meter Factor ที่ได้จากการทดสอบในแต่ละครั้ง (ดูจากรายงานในหน้าถัดไป)

ครั้งที่ 3 ค่า Meter Factor = 1.002215

ครั้งที่ 4 ค่า Meter Factor = 1.002148

ครั้งที่ 5 ค่า Meter Factor = 1.002181

$$\text{Repeatability} = \left(\frac{MF_{\max}}{MF_{\min}} - 1 \right) \times 100\%$$

$$= \left(\frac{1.002281}{1.002148} - 1 \right) \times 100\%$$

$$= 0.007 \%$$

เมื่อทำการสอบเทียบมาตรวัดมาตรฐานด้วยถังตวง ค่า Repeatability ไม่ควรมากกว่า 0.02 % **ดังนั้นค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดมาตรฐานจะได้เป็น 1.002181 (เป็นค่าเฉลี่ยจากรอบที่ 3-5)**

ANS

ตัวอย่าง จงแสดงผลการสอบเทียบมาตรวัดแบบมาตรา Class 0.5, OIML R117 ชนิด Oval gear meter มีอัตราการไหลสูงสุด 250 l/min และอัตราการไหลต่ำสุด 50 l/min ด้วยถังตวงแบบมาตราในรูปของการเขียนกราฟแสดง Performance ของมาตรวัด และแสดงอยู่ในรูปของสมการ

ผลการสอบเทียบมาตรวัดที่อัตราการไหลแตกต่างกัน ได้ผลดังในตาราง

เจ้าหน้าที่นายตรวจ: Satit C.		วันที่ 01/01/2001		Certificate No. : 001/2545			
มาตรวัด : Oval gear meter		Serial No. 4569-698					
Flow Rate	Indication of meter	Indication of Prover Tank	Temp. in Prover Tank	Correction Volume	Measured deviation after correction $\%Error(@T_0, P_{am}) = \frac{V_{0m} - V_{0p}}{V_{0p}} \times 100\%$		
(l/min)	V _m	V _p	(^o C)	V _{0p}	(l)	(%)	Mean Value (%)
250	1000.0	1001.5	9.8	1001.3	-1.3	-0.13	-0.13
	1000.0	1001.5	10.1	1001.3	-1.3	-0.13	
200	1000.0	1000.7	9.9	1000.5	-0.5	-0.05	-0.04
	1000.0	1000.5	10.1	1000.3	-0.3	-0.03	
150	1000.0	999.3	10.0	999.1	0.9	0.09	0.09
	1000.0	999.3	10.2	999.1	0.9	0.09	
100	1000.0	996.8	10.0	996.6	3.4	0.34	0.34
	1000.0	996.8	10.2	996.6	3.4	0.34	
50	1000.0	996.1	10.1	995.9	4.1	0.41	0.40
	1000.0	996.3	10.2	996.1	3.9	0.39	
Accumulation Number		End	4423614 ลิตร				PASS (< ±0.5%)
		Start	4413022 ลิตร	10,592 ลิตร			

Flow rate (l/min) ; x	50	100	150	200	250
Meter Error (%) ; y	+0.40	+0.34	+0.09	-0.04	-0.13

Meter Factor Linearization โดยปกติแล้วสมรรถนะของมาตรวัดจะอยู่ในรูปสมการ Polynomial function ซึ่งหากต้องการความละเอียดมากๆ แล้วจำเป็นต้องเพิ่มเทอม x^n จำนวนมากขึ้นและค่า n มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน และต้องตรวจสอบด้วยค่า R ซึ่งยังมีค่าเข้าใกล้ 1.0000 มากเท่าไรแสดงว่าสมการที่หาได้นั้นมีลักษณะเข้าใกล้กราฟที่ได้จากการสอบเทียบจริงเท่านั้น

แต่ในกรณีนี้เราใช้ x^2 ดังนั้นสมการ Polynomial function ซึ่งแสดงสมรรถนะของมาตรวัดจึงอยู่ในรูป

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (\text{Eq.7-36})$$

เมื่อ y = measured deviation calculated

x = selected flow rate

โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ a_0 , a_1 และ a_2 หาได้จากการแก้สมการ 3 สมการดังข้างล่าง

$$\begin{aligned}\sum y_i &= a_0 n + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_i^2 \\ \sum (x_i y_i) &= a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i^3 \\ \sum (x_i^2 y_i) &= a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i^3 + a_2 \sum x_i^4\end{aligned}\quad (\text{Eq.7-37})$$

i=	1	2	3	4	5	
$\sum y_i$	+0.4	+0.34	+0.09	-0.04	-0.13	0.66
$\sum x_i$	50	100	150	200	250	750
$\sum x_i^2$	2500	10000	22500	40000	62500	137500
$\sum x_i^3$	125000	1000000	3375000	8000000	15625000	28125000
$\sum x_i^4$	6250000	100000000	506250000	1600000000	3906250000	6118750000
$\sum (x_i^2 y_i)$	1000	3400	2025	-1600	-8125	-3300
$\sum (x_i y_i)$	20	34	13.5	-8	-32.5	27

แทนค่าลงในสมการ

$$\begin{aligned}0.66 &= a_0 \times 5 + a_1 \times 75 + a_2 \times 137,500 \\ 27 &= a_0 \times 750 + a_1 \times 137,500 + a_2 \times 28,125,000 \\ -3300 &= a_0 \times 137,500 + a_1 \times 28,125,000 + a_2 \times 6,118,750,000\end{aligned}$$

ทำการหา Determination (DET)

$$D_0 = \begin{vmatrix} 5 & 750 & 137,500 \\ 750 & 137,500 & 28,125,000 \\ 137,500 & 28,125,000 & 6,118,750,000 \end{vmatrix} = 1.0938 \times 10^{13}$$

$$a_0 = \frac{\begin{vmatrix} 0.66 & 75 & 137,500 \\ 27 & 137,500 & 28,125,000 \\ -3300 & 28,125,000 & 6,118,750,000 \end{vmatrix}}{D_0} = \frac{6.496 \times 10^{12}}{1.0938 \times 10^{13}} = 0.5940$$

$$a_1 = \frac{\begin{vmatrix} 5 & 0.66 & 137,500 \\ 750 & 27 & 28,125,000 \\ 137,500 & -3300 & 6,118,750,000 \end{vmatrix}}{D_0} = \frac{3.7125 \times 10^{10}}{1.0938 \times 10^{13}} = -0.0034$$

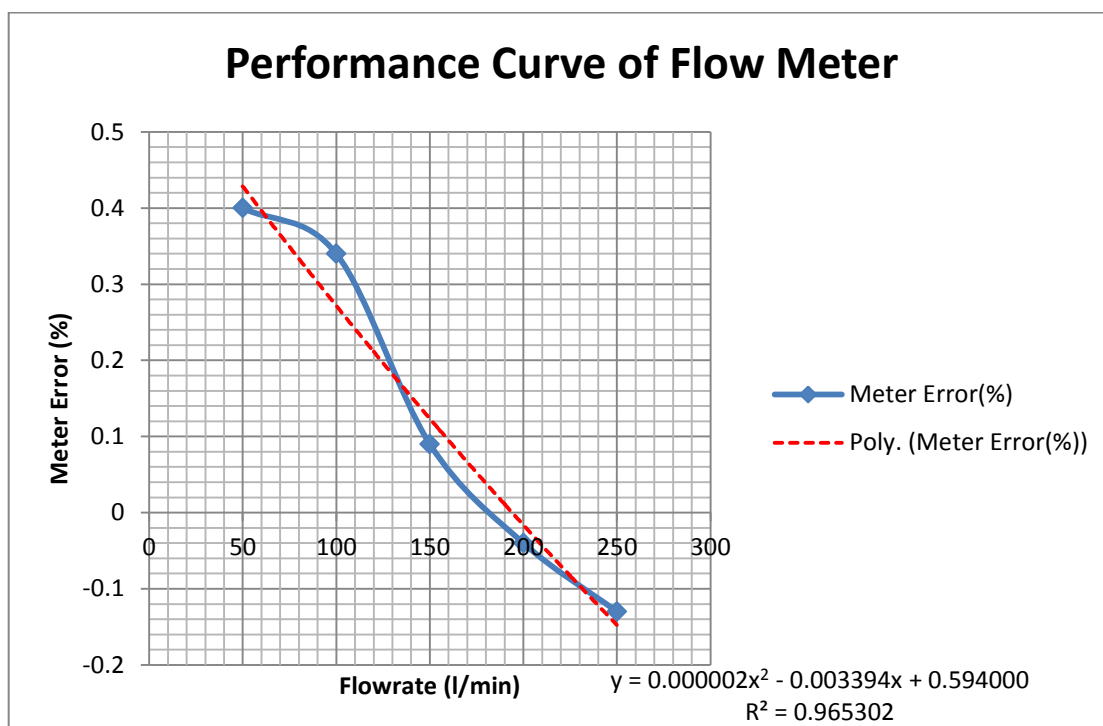
$$a_2 = \frac{\begin{vmatrix} 5 & 75 & 0.66 \\ 750 & 137,500 & 27 \\ 137,500 & 28,125,000 & -3300 \end{vmatrix}}{D_0} = \frac{1.8750 \times 10^7}{1.0938 \times 10^{13}} = 1.7143 \times 10^{-6}$$

$$y = 0.5940 - 0.0034x + 1.7143 \times 10^{-6}x^2$$

และมีค่า $R = 0.965302$

สมการข้างบนเป็นตัวแทนของคุณลักษณะของมาตรวัดซึ่งเราสามารถหาค่าความผิดพลาดของมาตรวัด (Meter Error or Deviation) ได้ที่ทุกๆ ค่าอัตราการไหล เช่น ที่อัตราการไหล เท่ากับ 130 l/min มาตรวัดมีความผิดพลาดของมาตร (Meter Error or Deviation) เท่ากับ

$$y = 0.5940 - 0.0034 \times (130) + 1.7143 \times 10^{-6} \times (130)^2 = +0.18\%$$



รูปที่ 7-107 การหาสมการ Polynomial function (x^2) แทนชุดข้อมูลจริง (Curve Fitting)

หากเราเพิ่ม Degree เป็น x^3 ดังนั้นสมการ Polynomial function ซึ่งแสดงสมรรถนะของมาตรวัดจึงอยู่ในรูป

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (\text{Eq.7-38})$$

เมื่อ y = measured deviation calculated

x = selected flow rate

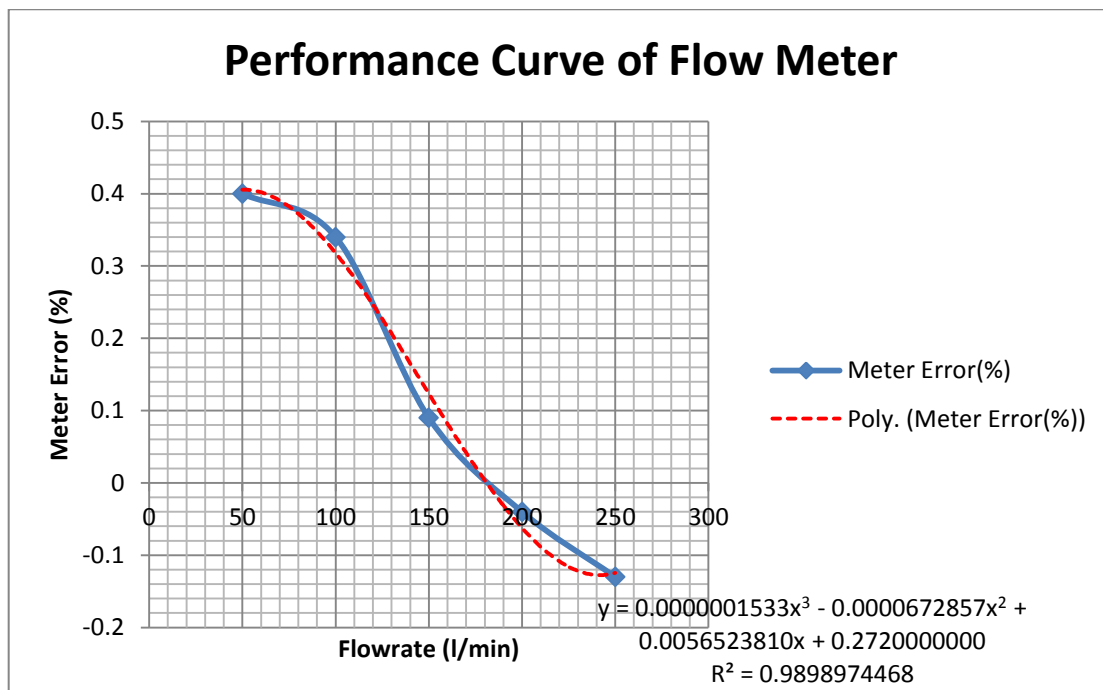
โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ a_0 , a_1 , a_2 และ a_3 ได้จากการแก้สมการ 4 สมการลักษณะเช่นเดียวกับข้างต้น

$$\begin{aligned}
\sum y_i &= a_0 n + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_i^2 + a_3 \sum x_i^3 \\
\sum (x_i y_i) &= a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i^3 + a_3 \sum x_i^4 \\
\sum (x_i^2 y_i) &= a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i^3 + a_2 \sum x_i^4 + a_3 \sum x_i^5 \\
\sum (x_i^3 y_i) &= a_0 \sum x_i^3 + a_1 \sum x_i^4 + a_2 \sum x_i^5 + a_3 \sum x_i^6
\end{aligned}
\tag{Eq.7-39}$$

ได้สมการ

$$y = 0.272 + 0.005652 x - 0.000067 x^2 + 0.00000015 x^3$$

และมีค่า $R = 0.98989744$ ซึ่งมีค่า R เข้าใกล้ 1.000 มากกว่าเมื่อเทียบกับสมการ Polynomial function ที่มี x^2 นั้นแสดงว่าการ Fitted Curve ด้วย สมการ Polynomial function ที่มี x^3 ได้ผลดีกว่า



รูปที่ 7-108 การหาสมการ Polynomial function (x^3) แทนชุดข้อมูลจริง (Curve Fitting)

จากตัวอย่างที่ยกมา อาจมองเห็นได้ว่าในทางปฏิบัติต้องผ่านการพิสูจน์และความตกลงร่วมกันจากทุกฝ่ายที่มีส่วนได้เสีย ว่าเกณฑ์ระดับใดในการกำหนดค่า R และ x^n ในการเลือกใช้สมการ Polynomial function แทน Performance Curve ของมาตรวัด เพราะเดิมพันมูลค่าของค่าดำและผลิตภัณฑ์จากทองคำดำสูงเหลือเกิน

ANS

บทที่ 8

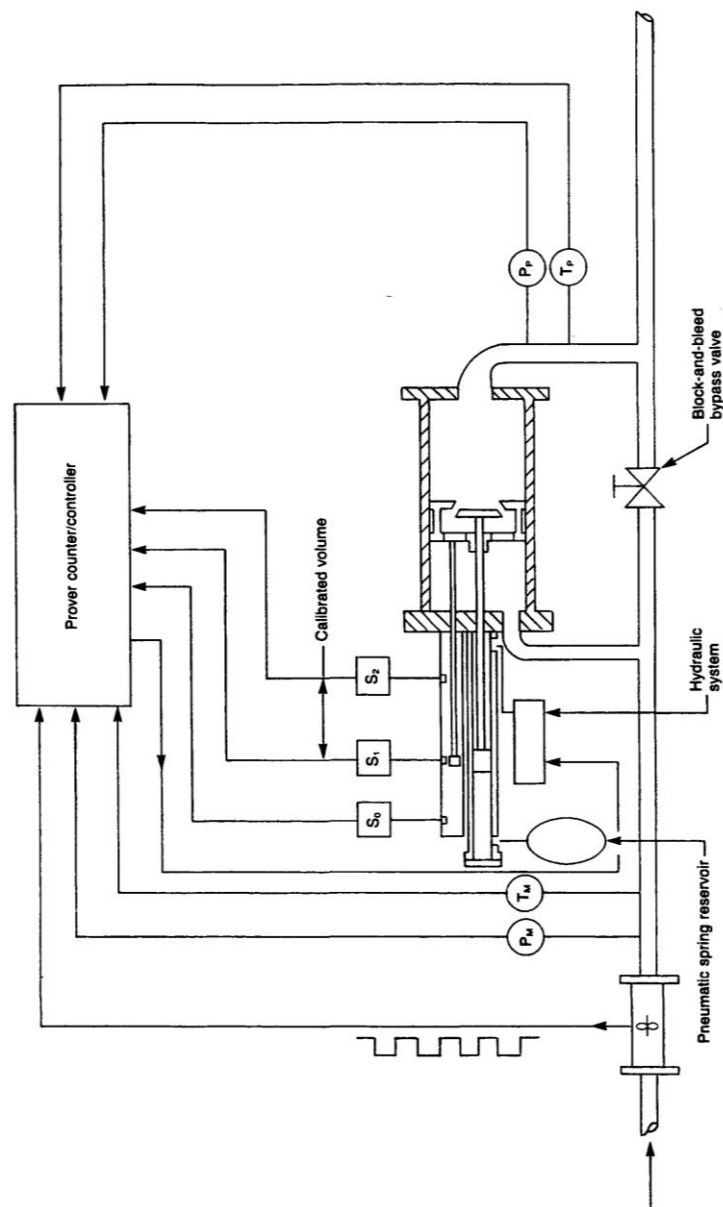
การสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

ด้วยถังตวงแบบมาตรา

(Base Volume Determination by Waterdraw Method)

ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Compact Prover; CPP) จัดเป็นเครื่องวัด ตามกฎกระทรวงกำหนด เครื่องวัดที่อยู่ในบังคับแห่งพระราชบัญญัติมาตราชั่งตวงวัด พ.ศ. 2542 ชนิด ลักษณะ รายละเอียดของวัสดุที่ใช้ ผลิต อัตราเผื่อเหลือเผื่อขาด และคำรับรองของเครื่องชั่งตวงวัด และหลักเกณฑ์และวิธีการจดทะเบียนเครื่องหมาย เฉพาะตัว พ.ศ. 2546 **ลักษณะ 3** ลักษณะ รายละเอียดวัสดุที่ใช้ผลิต และอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาด **หมวด 1** บท ทัวไป **ข้อ 14** เครื่องชั่งตวงวัดต้องมีส่วนแสดงค่าปริมาณที่ชั่ง ตวง หรือวัดที่เหมาะสมและมีจำนวนเพียงพอกับ การใช้งาน ประกอบกับกฎกระทรวง ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2544) **ข้อ 16** ค่าธรรมเนียมการตรวจสอบความเที่ยงของ เครื่องชั่งตวงวัด และค่าธรรมเนียมการออกหนังสือรายงานผลการตรวจสอบความเที่ยงของเครื่องชั่งตวงวัด (**4 เครื่องวัด** 5) สำหรับคอมพิวเตอร์โปรฟเวอร์ (Compact Prover) ด้วยเหตุนี้ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กจึงต้องมี ส่วนแสดงค่า (Display) หรือ Controller หรือ Flow computer ครบถ้วนประจำท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก เพื่อให้มั่นใจว่าการป้อนค่าข้อมูลประจำท่อทดสอบความจุขนาดเล็กรวมทั้งตัวแปรที่ใช้ในการสอบเทียบถูกถ่ายทอด ไปยังการคำนวณผลที่ถูกต้องไม่ว่าจากส่วนแสดงค่า (Display) หรือ Controller หรือ Flow computer อีกทั้งยัง สอดคล้องกับ Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter **API Charter 4** Proving Systems **Section 3- Small Volume Provers** (รูปที่ 8-1) มี Prover Counter/Controller ประจำท่อทดสอบ ความจุขนาดเล็กเพื่อใช้ในการประมวลผลสัญญาณทั้งหมดทั้งจากท่อทดสอบความจุขนาดเล็กและจากมาตรวัด ปริมาตรของเหลวที่ต้องการสอบเทียบ/ตรวจสอบให้คำรับรอง จากนั้นทำการคำนวณและแสดงผลข้อมูลทั้งหมด

ในการทำงานที่ผ่านมาเราเพียงทำการสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กเพื่อหาค่า “Base Volume” ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กเท่านั้นโดยไม่ได้ทำการตรวจสอบส่วนแสดงค่า (Display) หรือ Prover Counter/Controller หรือ Flow computer ผลที่ตามมาพบว่าการ Configuration หรือการป้อนค่าสัมประสิทธิ์ ขยายตัว หรือข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก เช่น ขนาดท่อ ความหนาท่อ เป็นต้น หรือความ สอดคล้องระหว่างหน่วยวัดความดันและอุณหภูมิกับค่าสัมประสิทธิ์^๓ในกรณีที่ใช้ Temperature/Pressure Transmitters เข้าไปเก็บไว้ที่ส่วนแสดงค่า (Display) หรือ Prover Counter/Controller หรือ Flow computer ผิดหรือไม่สอดคล้องจากค่าที่ใช้ในการสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก เมื่อนำท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก ไปใช้งานในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลว จะแน่ใจได้อย่างไรว่ายังคง มีความถูกต้องและน่าเชื่อถืออยู่อีกหรือไม่? ผู้ครอบครองหรือเป็นเจ้าของเครื่องวัดชนิดนี้ หรือพนักงานเจ้าหน้าที่ ชั่งตวงวัด ตลอดจนผู้มีส่วนได้เสียต้องทำการตรวจทานข้อมูลที่ทำการบันทึกไว้ในส่วนแสดงค่า หรือ Prover Counter/Controller หรือ Flow computer เองเนื่องจากผู้ผลิตคงไม่รับผิดชอบการ configuration ในการทำ pre-commissioning หรือ commissioning ซึ่งชั่งตวงวัดประสบพบเจอมาแล้วในประเทศไทย



รูปที่ 8-1 ระบบโดยภาพรวมของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Compact Prover)

การใช้ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กในการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวต่างๆ สามารถกระทำได้ หากสามารถใช้ตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ของตัวกวาดที่มีความแม่นยำสูง (high-precision displacer-position detectors) ทำงานร่วมกับเทคนิค pulse interpolation พบว่าขนาดของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กจะมีขนาดเล็กหรือมีค่าปริมาตรมาตรฐาน (Base Volume) น้อยกว่าท่อสอบเทียบ (Conventional Pipe Prover) ทั่วๆ ไป นอกจากนี้การที่ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กมีค่าปริมาตรมาตรฐานระหว่างตัวตรวจจับตัวกวาด (detector switch) ทำให้ในการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวจึงไม่สามารถทำให้มีการสะสมของสัญญาณพัลส์ซึ่งถูกส่งมาจากมาตรวัดปริมาตรของเหลวจนถึง 10,000 พัลส์ขึ้นไป เช่นเดียวกับการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวด้วยท่อสอบเทียบทั่วไป ด้วยเหตุนี้ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กจึงต้องมีเทคนิคที่จะเพิ่มความละเอียดต่ำสุดของสัญญาณพัลส์ (resolution) ที่ส่งมาจากมาตรวัดปริมาตรของเหลวเข้าช่วย ดังนั้นหากต้องการการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวด้วยท่อทดสอบความจุขนาดเล็กให้มีค่าความแม่นยำสูงและได้ค่าความสามารถทำซ้ำได้ดีจึง

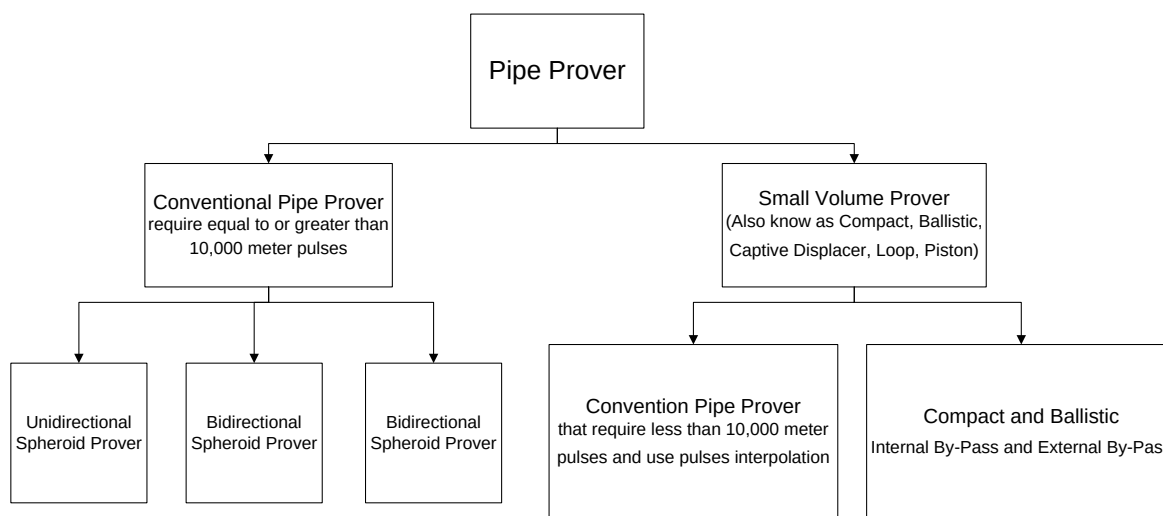
ขึ้นอยู่กับปัจจัยร่วมต่างๆ ระหว่างความสามารถของการทำงานส่วน pulse-interpolation (pulse-interpolation electronics), ตัวตรวจจับตัวกวาด (detectors), ความเรียบของสัญญาณจากมาตรวัดปริมาตรของเหลว (uniform meter pluses), อัตราการไหล, ความดัน, อุณหภูมิ และลักษณะและหลักการทำงานของมาตรวัดนั้นๆ



รูปที่ 8-2 ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Compact Prover) บนแท่นสามารถขนย้ายได้

ลักษณะและรูปแบบโดยทั่วไปของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

เมื่อพูดถึงท่อทดสอบความจุ หรือ Pipe Prover ซึ่งเป็นชื่อเรียกในภาพกว้างและครอบคลุมทั้ง Conventional Pipe Prover และ Small Volume Prover อีกทั้งใช้มาอย่างยาวนาน เดิมทีนั้นมีการใช้ Pipe prover กันในช่วงต้นทศวรรษที่ 1950s โดยโรงกลั่นน้ำมัน 2 แห่งซึ่งไม่สามารถหาข้อยุติตกลงกันได้ในการหาค่าความแม่นยำของมาตรวัดปริมาตรของเหลวซึ่งใช้ร่วมกัน จึงตัดสินใจร่วมกันใช้ท่อซึ่งยาวประมาณ 1 ไมล์แล้วปล่อยให้ตัวกวาด (pig) วิ่งภายในท่อจากต้นทางไปยังปลายทางจากนั้นนำค่าปริมาตรที่วัดได้ระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของระยะวิ่งของตัวกวาดไปเทียบกับค่าปริมาตรที่วัดได้โดยมาตรวัดเจ้าปัญหานั้น พอถึงในช่วงปลายทศวรรษที่ 1960s ได้พัฒนาให้มีท่อทดสอบความจุอีกรูปแบบคือ Small Volume Prover ด้วยการนำเอาเทคนิคการนับจำนวนพัลส์ ที่เรียกว่า “Double chronometry” มาใช้ พอเวลาผ่านไปก็มีการปรับปรุงโดยนำ Optical switch มาแทน Reed switch ซึ่งใช้ในระยะเริ่มแรก ในระหว่างช่วงปลายทศวรรษที่ 1970s ถึงช่วงต้นทศวรรษที่ 1980s Small Volume Prover จึงได้ถูกผลิตขึ้นมาในเชิงพาณิชย์ต่อมา



รูปที่ 8-3 โครงสร้างการจำแนก Pipe Prover และ Small Volume Prover

หน่วยงานรัฐของประเทศพัฒนาแล้วและองค์กรระหว่างประเทศเริ่มให้การยอมรับ Small Volume Prover มากขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1996 เป็นต้นมา และท่อดสอบความจุได้แตกแขนงออกไปตามความต้องการใช้งาน ด้วยเงื่อนไขข้อจำกัดที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 8-3 สำหรับการเรียกชื่อต้องระวังความสับสนระหว่าง Small Volume Prover (SVP) กับ Compact Prover (CPP) เพราะเป็นการพูดถึงในสิ่งเดียวกัน แต่เราอาจจะคุ้น Compact Prover หรือ CPP เสียมากกว่า



รูปที่ 8-4 Conventional Pipe Prover (DANIEL)

ด้วยการออกแบบท่อดสอบความจุขนาดเล็ก ได้รวมเอาท่อทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง (measuring cylinder) ประกอบด้วยตัวกวาด (Displacer) กับวิธีการระบุตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของตัวกวาดที่แม่นยำด้วยตัวตรวจจับตัวกวาด (displacer detector) โดยตัวกวาดจะเคลื่อนที่กวาดปริมาตรของเหลวไปพร้อมกับของไหลที่ไหลผ่านในท่อจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งที่อยู่ที่ศตรงข้ามด้วยระยะทางสั้นคงที่อย่างต่อเนื่อง โดยภายในท่อได้รับการเคลือบ stainless plate เพื่อความราบเรียบอีกทั้งป้องกันการกัดกร่อนทั้งเชิงกลและเชิงเคมีไว้อย่างดี อีกทั้งจัดให้มีระบบซีลป้องกันการรั่วไหลระหว่างผนังรูปทรงกระบอกกับตัวกวาด การประมวลผลการวัดด้วยการทำงานร่วมกันระหว่างตัวตรวจจับตัวกวาด, เครื่องมือนับสัญญาณพัลส์ (pulse counter), ตัวจับเวลา (timer) และเทคนิค pulse interpolation ตลอดจนจัดให้มีการวัดอุณหภูมิและความดันภายในท่อได้ตลอดเวลา รวมทั้งมีท่อ Vent และท่อ Drain ในระบบการทำงาน เราจึงได้ค่าปริมาตรระหว่างตัวตรวจจับตัวกวาดมีค่าคงที่และนั่นคือ **Base Volume** นั้นเอง

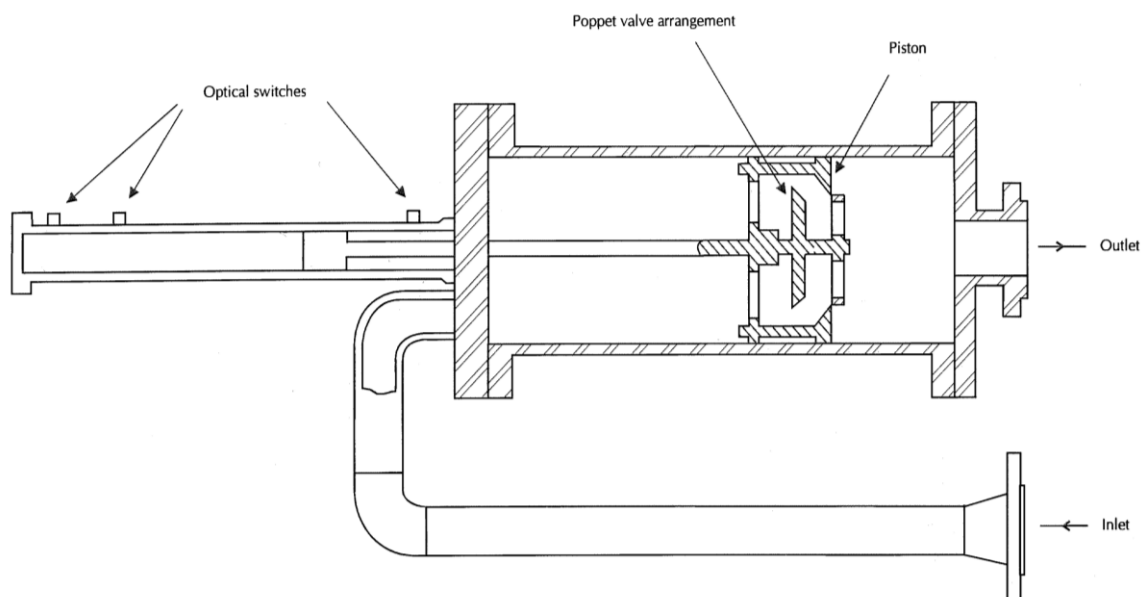
พิกัดกำลังของท่อดสอบความจุขนาดเล็ก มี 20, 40, 60, 120, 250 และ 318 ลิตร หรือ 5, 10, 15, 30, 65, 84 แกลลอน ตัวอย่างดังในตารางที่ 8-1 และตารางที่ 8-2

Maximum Flow (BPH)		Maximum Flow (GPM)		Maximum Flow (m ³ /h)		Displaced Volume		Prover Weight (lowest pressure rating)	
PD, Turbines	Coriolis, Ultrasonic	PD, Turbines	Coriolis, Ultrasonic	PD, Turbines	Coriolis, Ultrasonic	US gallons	L	lb	kg
715	715	500	500	114	114	5	18.9	1,200	544
2,140	1,719	1,498	1,203	340	273	20	75.7	3,500	1,588
3,570	1,719	2,499	1,203	568	273	20	75.7	4,350	1,973
5,000	4,671	3,500	3,270	795	743	25	94.6	5,250	2,381
7,200	5,783	5,040	4,048	1,145	919	40	151.4	7,850	3,561
12,500	11,267	8,750	7,887	1,987	1,791	75	283.9	12,500	5,670
17,500	15,922	12,249	11,145	2,782	2,531	120	454.2	14,500	6,577

ตารางที่ 8-1 Enraf, Compact Prover

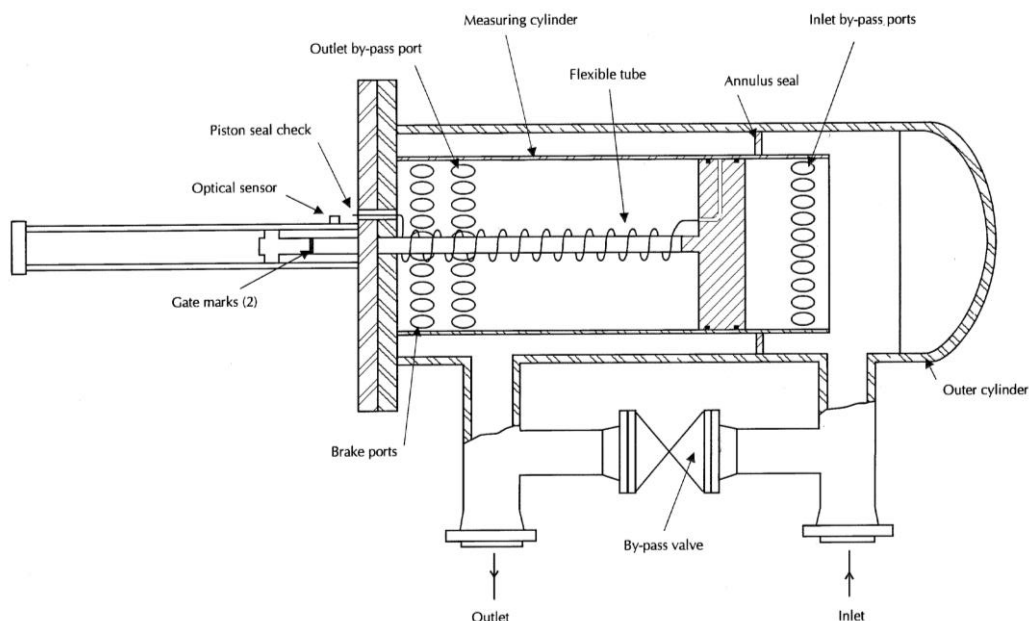
Nominal flow tube dia.	Provers rate ranges minimum maximum		Nominal prover base volume	Multiplier for stream volume	Flowtube I.D	Wall thickness	Inlet/Outlet flange size	Nominal prover shipping dimensions (L X W X H)	Approximate shipping weight
8"	0.25 gpm 0.946 lpm 0.357 bph 0.057 m ³ /ph	250 gpm 946 lpm 357 bph 57 m ³ /ph	5 gal (20 liters)	0.990590	8.250 (20.955 cm)	0.6875 (1.746 cm)	2"	121" x 56" x 50" (307cm x 142cm x 127cm)	2,200 lbs (998 kgs)
12" Mini	1.0 gpm 3.78 lpm 1.43 bph 0.227 m ³ /ph	1000 gpm 3780 lpm 1430 bph 227 m ³ /ph	10 gal (40 liters)	0.991670	12.250 (31.115 cm)	0.8750 (2.222 cm)	4"	147" x 62" x 55" (373cm x 157cm x 140cm)	4,400 lbs (1,995 kgs)
12"	1.75 gpm 6.623 lpm 2.5 bph 0.397 m ³ /ph	1750 gpm 6623 lpm 2500 bph 397 m ³ /ph	15 gal (60 liters)	0.991670	12.250 (31.115 cm)	0.8750 (2.222 cm)	6"	172" x 67" x 57" (437cm x 170cm x 145cm)	4,900 lbs (2,223 kgs)
18"	3.5 gpm 13.247 lpm 5.0 bph 0.794 m ³ /ph	3500 gpm 13247 lpm 5000 bph 794 m ³ /ph	30 gal (120 liters)	0.993020	17.500 (44.450 cm)	1.2500 (3.175 cm)	8"	193" x 76" x 56" (490cm x 193cm x 142cm)	7,300 lbs (3,311 kgs)
24"	7.0 gpm 24.495 lpm 10.0 bph 1.595 m ³ /ph	7000 gpm 26495 lpm 10000 bph 1595 m ³ /ph	65 gal (250 liters)	0.993464 Pre 2006 .992369	25.500 (64.770 cm)	1.0625 (2.699 cm)	12"	220" x 96" x 66" (559cm x 244cm x 168cm)	13,400 lbs (6,078 kgs)
34"	12.6 gpm 47.691 lpm 18.0 bph 2.860 m ³ /ph	12600 gpm 47691 lpm 18000 bph 2860 m ³ /ph	100 gal (400 liters)	0.988536	34.00 (86.360 cm)	1.2500 (3.175 cm)	16"	230" x 102" x 74" (584cm x 259cm x 188cm)	19,200 lbs (8,709 kgs)
40"	17.5 gpm 66.237 lpm 25.0 bph 3.972 m ³ /ph	17500 gpm 66237 lpm 25000 bph 3972 m ³ /ph	170 gal (650 liters)	0.985938	40.00 (101.60 cm)	1.500 (3.810cm)	20"	240" x 130" x 77" (610cm x 330cm x 196cm)	35,000 lbs (13,876 kgs)

ตารางที่ 8-2 Emerson, Compact Prover



รูปที่ 8-5 รูปลักษณะโดยทั่วไปของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กที่มีวาล์วอยู่ภายใน (Internal Valve, Unidirectional Compact Prover Design)

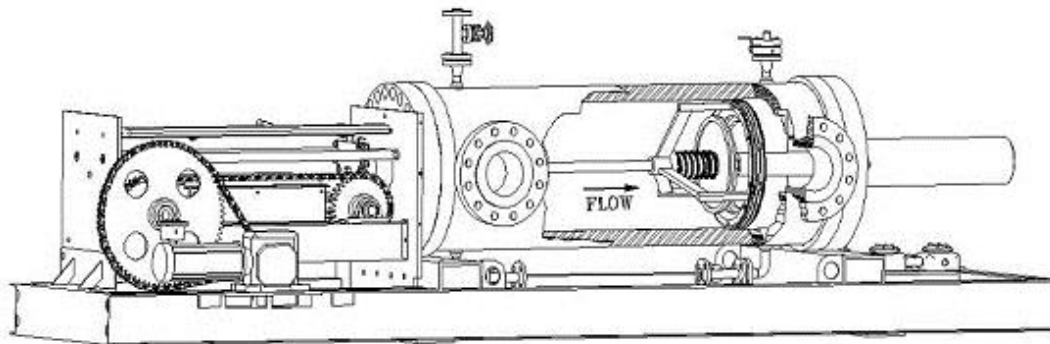
ในรูปที่ 8-5 จะเห็นได้ว่าภายในตัวกวาดประกอบด้วย “Piston” ซึ่งภายใน piston จะติดตั้ง “Poppet valve” เรียกรวมกันว่า “a flow-through valve” ตัวกวาดถูกออกแบบและจัดทำด้วยวัสดุให้เหมาะสมกับอุณหภูมิและความดันใช้งาน ตลอดจนทนต่อของเหลวที่ใช้วัด



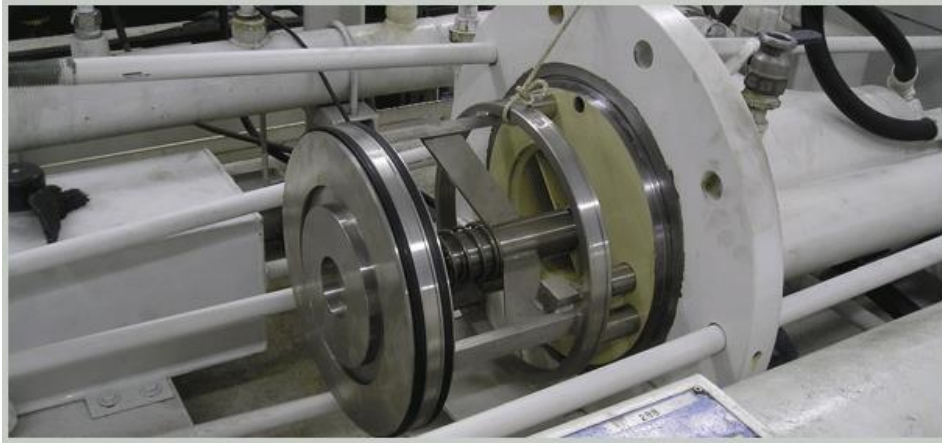
รูปที่ 8-6 รูปลักษณะโดยทั่วไปของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กที่มีวาล์วอยู่ภายนอก (External Valve)

สำหรับวิธีการขับเคลื่อนตัวกวาดให้สามารถเคลื่อนที่ไปกลับระหว่างตำแหน่ง Upstream กับ Downstream ได้ในปัจจุบันเท่าที่ทราบมี 2 วิธีการ คือ

1. **มอเตอร์ขับเคลื่อนผ่านระบบโซ่ (Chain Drive Mechanism)** มอเตอร์ขับเคลื่อนระบบโซ่จะดึง piston กลับจากตำแหน่ง downstream กลับมายังตำแหน่ง upstream/standby ส่งผลให้ poppet valve เปิดและยอมให้ของเหลวไหลผ่านออกไปด้านทางออกท่อทดสอบความจุขนาดเล็กจนถึงตำแหน่ง standby เมื่อท่อทดสอบความจุขนาดเล็กทำงานระบบกลไกการปล่อย piston ทำให้ poppet valve ปิดจากแรงกดของสปริงพร้อมเคลื่อนตัวไปพร้อมกับของเหลว เมื่อผ่านตัวตรวจจับตัวกวาด (displacer detector) ตัวสุดท้ายเพลลาที่ต่อเนื่องกับตัวกวาดจะถูกกลไกยึดจับให้หยุดนิ่ง ในขณะที่ชิ้นส่วนรอบนอกเรียกว่า piston จะยังคงเคลื่อนที่ต่อไป ทำให้เป็นการเปิดวาล์วที่เรียกว่า “a flow-through valve” และยอมให้ของเหลวไหลผ่านออกไปจากท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก ระบบเริ่มทำงานรอบการสอบเทียบใหม่โดย piston ถูกดึงให้วิ่งกลับไปทางด้าน downstream

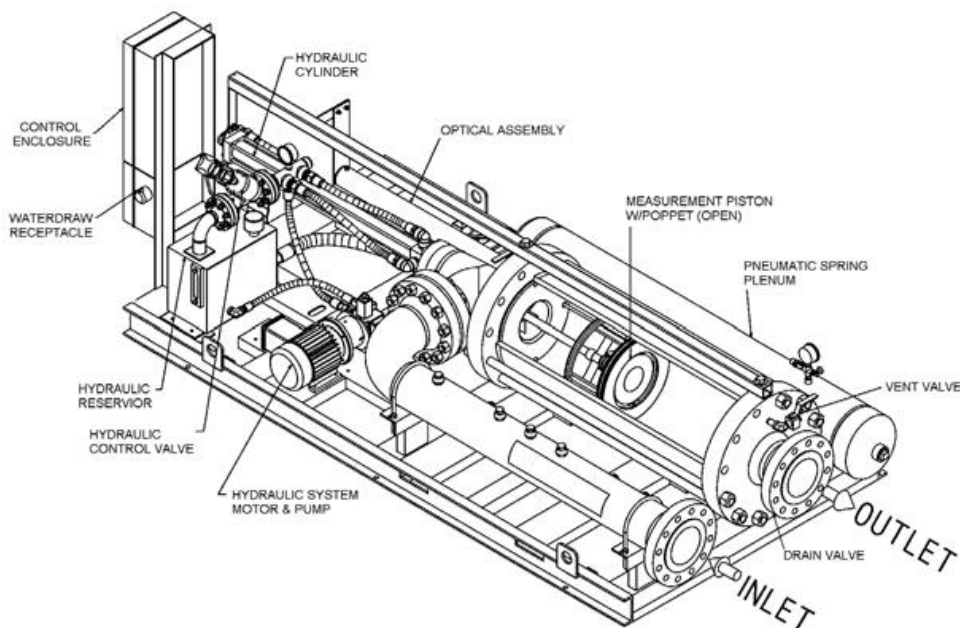


รูปที่ 8-7 ระบบดึงตัวกวาดกลับตำแหน่งพักด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อนผ่านระบบโซ่

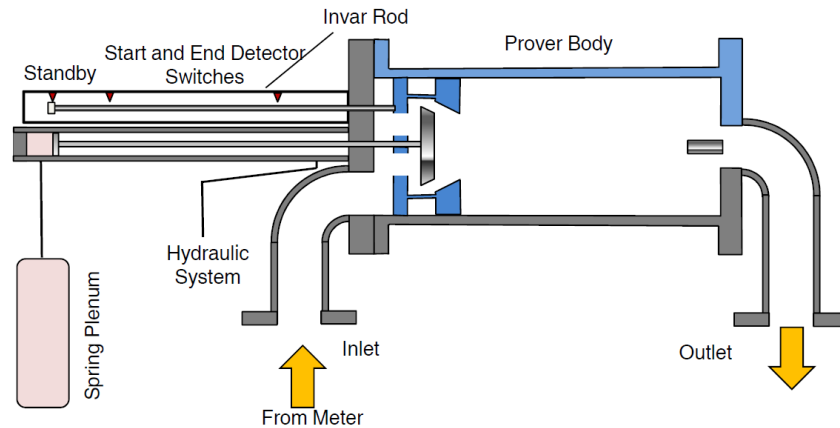


รูปที่ 8-8 ตัวกวาด (displacer) ทำด้วยวัสดุที่ไม่เหนียวแม่เหล็ก พร้อมซีล

2. ขั้วเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิก (Hydraulic Mechanism) ด้าน upstream ที่ตำแหน่ง standby นั้นตัว a flow-through valve จะอยู่ในตำแหน่งเปิดและยอมให้ของเหลวไหลผ่านออกไปจากท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก เมื่อเปิดวาล์วควบคุมไฮดรอลิก ความดันของระบบไฮดรอลิกจาก pneumatic spring plenum ดันให้ poppet valve ปิด (รูปที่ 8-10) จากนั้นระบบเริ่มทำงานรอบการสอบเทียบโดย piston วิ่งไปทางด้าน downstream พร้อมกับของเหลว เมื่อผ่านตัวตรวจจับตัวกวาด (displacer detector) ตัวสุดท้าย ระบบส่งสัญญาณไปยังวาล์วควบคุมไฮดรอลิกให้เปิดวาล์ว แรงดันของเหลวภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็กจะดันให้ piston เคลื่อนที่ต่อไป ในขณะที่ไม่มีแรงดันไปกด poppet valve อีกต่อไป ทำให้เป็นการเปิดวาล์ว a flow-through valve และยอมให้ของเหลวไหลผ่านออกไปจากท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก จากนั้นปั๊มไฮดรอลิกทำงานเพื่อดึงตัวกวาดกลับมายังตำแหน่ง standby พร้อมสำหรับทำงานรอบต่อไป ดังนั้นเราจะเห็นว่าความดันใน pneumatic spring plenum ที่ใช้ดัน poppet valve ให้ปิดนั้นหากไม่มีแรงดันเพียงพออาจทำให้ poppet valve ปิดไม่สนิทซึ่งจะมีผลต่อความถูกต้องแม่นยำของการทำงานของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กเช่นกัน

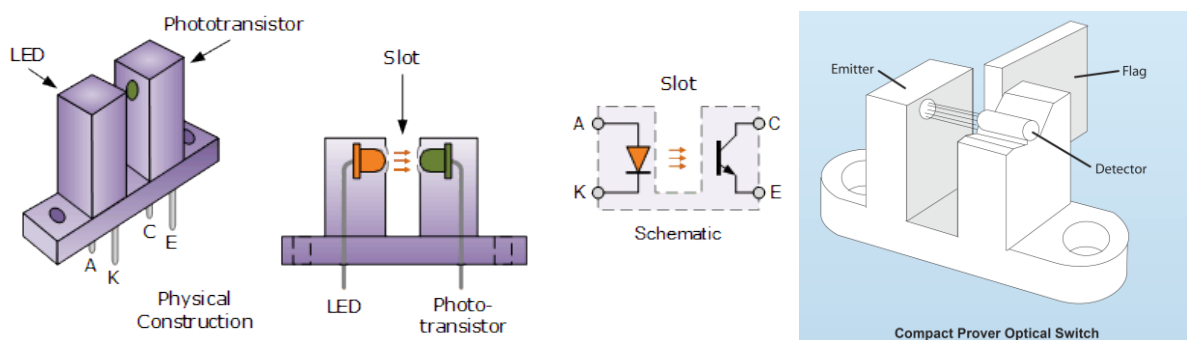


รูปที่ 8-9 ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิก



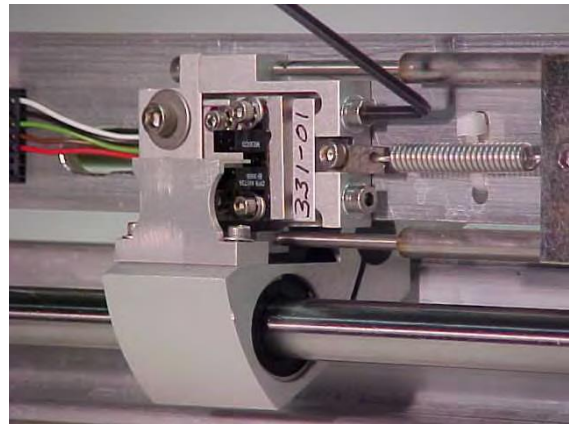
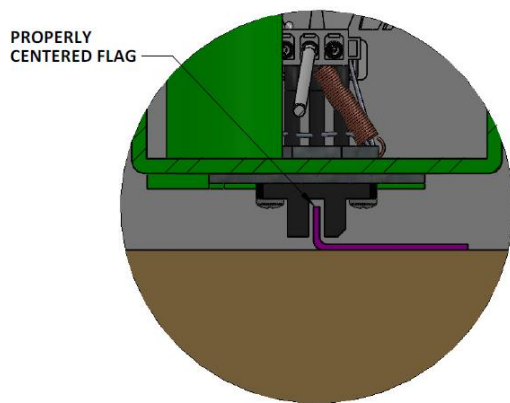
รูปที่ 8-10 ความดันของระบบไฮดรอลิกจาก pneumatic spring plenum ดันให้ poppet valve ปิด

โดยทั่วไปพบวาระยะห่างระหว่างตัวตรวจจับตัวกวาดที่บ่งบอกปริมาตรมาตรฐาน (Base Volume) อยู่ห่างกัน 1 เมตรโดยประมาณ ด้วยเหตุนี้ระยะเวลาในการสะสมสัญญาณพัลส์จึงสั้นมากและเพราะการทำงานของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กใช้ปริมาตรมาตรฐานน้อยมากเมื่อเทียบกับท่อทดสอบความจุแบบเดิม (conventional pipe prover) แต่ใช้เทคนิคการขยายสัญญาณจำนวนพัลส์เข้าช่วย ดังนั้นการติดตั้งตัวระบุตำแหน่ง (flag) ของตัวกวาดเข้ากับแกนโลหะพิเศษที่เรียกว่า Invar Rod ซึ่งมีสัมประสิทธิ์ขยายตัวเชิงเส้นต่ำมากและยังเชื่อมต่อโดยตรงกับตัวกวาดเพื่อไปตัดสัญญาณหรือ Trigger ตัวตรวจจับตัวกวาด (displacer detector) จึงจำเป็นต้องเลือกระบบที่น่าเชื่อถือ เช่น เลือกใช้ Optical Detector ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับตัวกวาด และที่สำคัญตำแหน่งตัวตรวจจับตัวกวาดต้องยึดให้มั่นคงหากมีการขยับเปลี่ยนตำแหน่ง (รูปที่ 8-12) นั้นหมายถึง ปริมาตรมาตรฐานเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน เราจึงต้องซีลตัวครอบตัวตรวจจับตัวกวาด (รูปที่ 8-13)



รูปที่ 8-11 Optical Switch

พบว่าท่อทดสอบความจุขนาดเล็กจะให้ค่าความสามารถทำซ้ำได้ไม่เกิน 0.02 % หรือ 2 ใน 10,000 ในการสอบเทียบ 5 runs ถือเป็นค่า Repeatability ของ Detector ซึ่งโดยทั่วไป Optical Detector จะมีค่า Repeatability 0.001 นิ้วใน 27.4 นิ้ว หรือ 1/27,400 (FMC Bulletin TPOV001) ซึ่งบอกให้ทราบเป็นนัยถึงข้อจำกัดขีดความสามารถสูงสุดของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก



รูปที่ 8-12 เมื่อตัวระบุตำแหน่ง(flag) ของตัวกวาดตัดผ่านระหว่าง Optical Switch

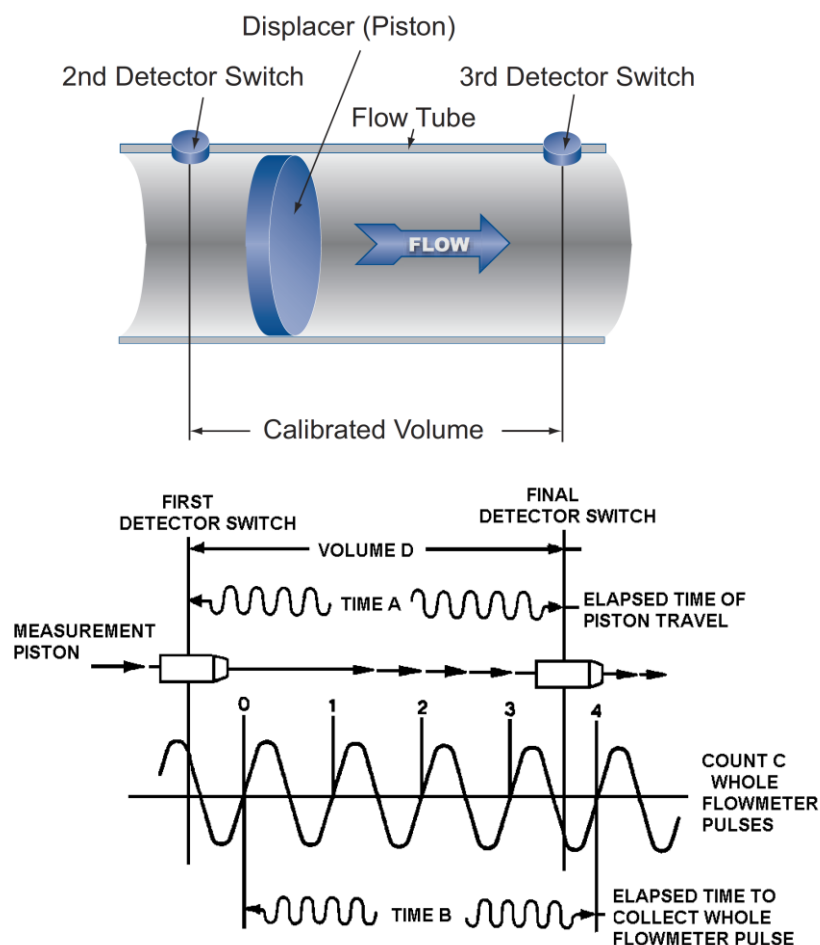


รูปที่ 8-13 การซีลฝาครอบ Optical Switch

ท่อดทดสอบความจุขนาดเล็ก กับ Timer, Pulse Counter, และ Pulse Interpolation

ขบวนการประมวลผลของท่อดทดสอบความจุขนาดเล็กจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีขีดความสามารถทำงานนับจำนวนพัลส์สัญญาณที่เรียกว่า “dual chronometry pulse interpolation” และเป็นเทคนิคที่ถูกใช้ในการคำนวณจำนวนพัลส์รวมทั้งเศษส่วนของพัลส์ทั้งหมดของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ผลิตขึ้นและวัดได้ระหว่างตัวตรวจจับสัญญาณ 2 ตัวทำงาน เดิมทีท่อดทดสอบความจุหรือที่เรียกว่า Conventional pipe prover (รูปที่ 8-4) เป็นท่อดมีความยาวและประกอบด้วยตัวตรวจจับตัวกวาด 2 ตัว และเมื่อใช้สอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวภายใต้เงื่อนไขความต้องการพัลส์สัญญาณสะสมต่อเนื่องของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ต้องการสอบเทียบดังกล่าวจำนวนไม่น้อยกว่า 10,000 พัลส์เพื่อให้แน่ใจถึงความเที่ยงของการสอบเทียบด้วยเหตุผลที่ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า มีแนวโน้มที่ผลผลิตเกิดขึ้นเมื่อตัวกวาดหรือลูกบอลผ่านตัวตรวจจับตัวกวาด 1 พัลส์ต่อ 1 ตัวตรวจจับตัวกวาด นั่นคือ 2 พัลส์ต่อรอบสอบเทียบของ Conventional pipe prover หรือ 2 พัลส์ต่อ 10,000 พัลส์เท่ากับ 0.02% นั่นเอง แต่สำหรับท่อดทดสอบความจุขนาดเล็กใช้จำนวนสัญญาณพัลส์น้อยกว่า 10,000 พัลส์ดังนั้นจึงมีแนวโน้มที่มีผลผลิต (error) สูงกว่า 0.02% แต่ถ้าหากยังคงต้องการให้มีผลผลิตไม่เกิน 0.02% ดังเดิมจำเป็นต้องนำเทคนิคใหม่ๆ เข้ามาช่วยทำงาน นั่นคือการขยายสัญญาณของมาตรวัดปริมาตรของเหลวให้มีจำนวนสูงขึ้นด้วยเทคนิคที่เรียกว่า “pulse interpolation” ซึ่งเป็นการแตกสัญญาณพัลส์ที่ได้จากมาตรวัดปริมาตรของเหลวออกย่อยละเอียดลงไป วิธีที่นิยมกันมากที่สุดคือ “Double Chronometry Pulse Interpolation”

Double chronometry pulse interpolation เป็นเทคนิคเพิ่มเวลาให้ละเอียดแม่นยำสูงถึง 0.000001 ต่อวินาที และมีตัวนับสัญญาณ (counter) 2 ตัว ตัวนับสัญญาณตัวที่ 1 เริ่มนับสัญญาณเมื่อตัวตรวจจับตัวกวาด (detector switch) ตัวที่ 1 ถูกกระตุ้นทำงาน และตัวนับสัญญาณตัวที่ 2 จะเริ่มนับสัญญาณหลังจากตัวนับสัญญาณตัวที่ 1 ทำงานโดยมีจุดเริ่มต้นที่สัญญาณพัลส์แรกสุดของมาตรวัดปริมาตรของเหลวหลังจากตัวนับสัญญาณตัวที่ 1 ทำงาน ("0") จากนั้นตัวนับสัญญาณตัวที่ 1 จะถูกให้หยุดทำงานลงเมื่อตัวตรวจจับตัวกวาดตัวที่ 2 ถูกกระตุ้นทำงาน มีระยะเวลาเท่ากับ Time "A" ผลตามมาทำให้ตัวนับสัญญาณตัวที่ 2 หยุดนับสัญญาณทันทีหลังจากตัวนับสัญญาณตัวที่ 1 หยุดทำงานที่จุดเริ่มต้นของสัญญาณพัลส์แรกสุดของมาตรวัดปริมาตรของเหลวหลังจากตัวนับสัญญาณตัวที่ 1 หยุดทำงาน ("4") ด้วยระยะเวลาเท่ากับ Time "B" ดังรูปที่ 8-14



รูปที่ 8-14 Double Chronometry Pulse Interpolation

เมื่อใช้อัตราส่วนเวลาตัวนับสัญญาณตัวที่ 1 เทียบกับเวลาตัวนับสัญญาณตัวที่ 2 จะทำให้การนับเศษส่วนของสัญญาณพัลส์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวแม่นยำสูงมาก

$$K = \frac{\text{Time "A"}}{\text{Time "B"}} \times \frac{C}{D}$$

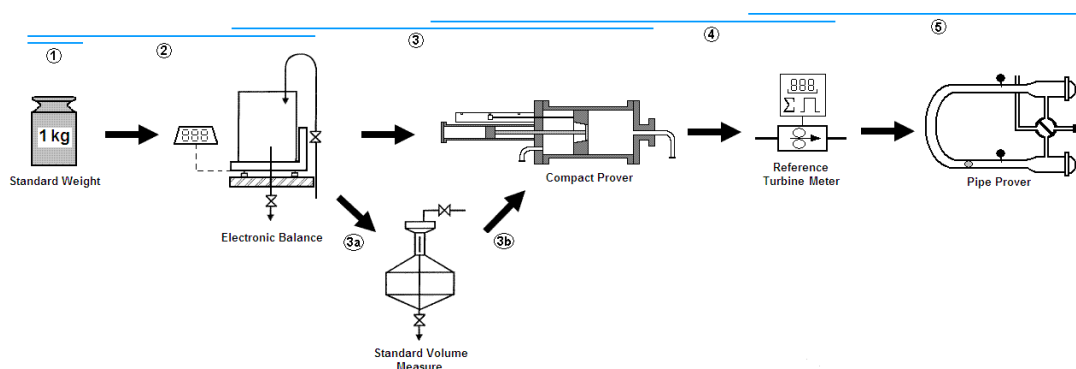
- | | | |
|-------|---|--|
| เมื่อ | K | คือ K-Factor จากมาตรวัดปริมาตรของเหลว (flowmeter) |
| | A | คือ เวลาสำหรับค่าปริมาตรระหว่างตัวตรวจจับตัวกวาดตัว 2 ตัว |
| | B | คือ เวลาสำหรับนับจำนวนสัญญาณพัลส์ทั้งหมดของมาตรวัดปริมาตรของเหลว |

- C คือ จำนวนสัญญาณพัลส์ที่นับได้เป็น จำนวนเต็ม ทั้งหมดของมาตรวัดปริมาตรของเหลว
- D คือ ปริมาตรระหว่างตัวตรวจจับตัวกวาดตัว 2 ตัว

วิธีการสอบเทียบเพื่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Calibration Methods)

ก่อนที่จะนำเพื่อทดสอบความจุขนาดเล็กมาใช้สอบเทียบกับมาตรวัดปริมาตรของเหลว จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการสอบเทียบเพื่อทดสอบความจุขนาดเล็กนั้นเสียก่อนเพื่อหา “ค่าปริมาตรมาตรฐาน (Base Volume)” ซึ่งหมายถึงค่าปริมาตรของเพื่อทดสอบความจุขนาดเล็กที่ถูกปรับแก้ไขค่าไปยังสภาวะมาตรฐาน (the calibrated volume corrected to standard conditions) สำหรับความแม่นยำในการสอบเทียบหาค่าปริมาตรมาตรฐานจะไม่สามารถมีค่าความแม่นยำสูงกว่าหรือดีกว่าความแม่นยำของถังตวงแบบมาตราที่ใช้ในการสอบเทียบดังกล่าว ด้วยเหตุนี้หากต้องการค่าปริมาตรมาตรฐานที่มีความแม่นยำสูงของเพื่อทดสอบความจุขนาดเล็ก ก็ควรเลือกใช้แบบมาตราที่มีความแม่นยำสูงเช่นกัน

ก่อนอื่นเราควรทำความเข้าใจห่วงโซ่การสอบเทียบย้อนกลับ (Traceability Chain) ในรูปที่ 8-15 ว่ามีความสำคัญในการถ่ายทอดแบบมาตราเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าความแม่นยำน่าเชื่อถือในการสอบเทียบ และ/หรือตรวจสอบให้คำรับรองเครื่องซึ่งตวงวัดอย่างไร เพื่อให้ได้มาซึ่งความมั่นใจว่า “ค่าปริมาตรมาตรฐาน (Base Volume)” ของเพื่อทดสอบความจุขนาดเล็กมีค่าความไม่แน่นอนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับกันได้ ดังในตารางที่ 8-3



รูปที่ 8-15 Traceability Chain ในการถ่ายทอดแบบมาตราของเพื่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

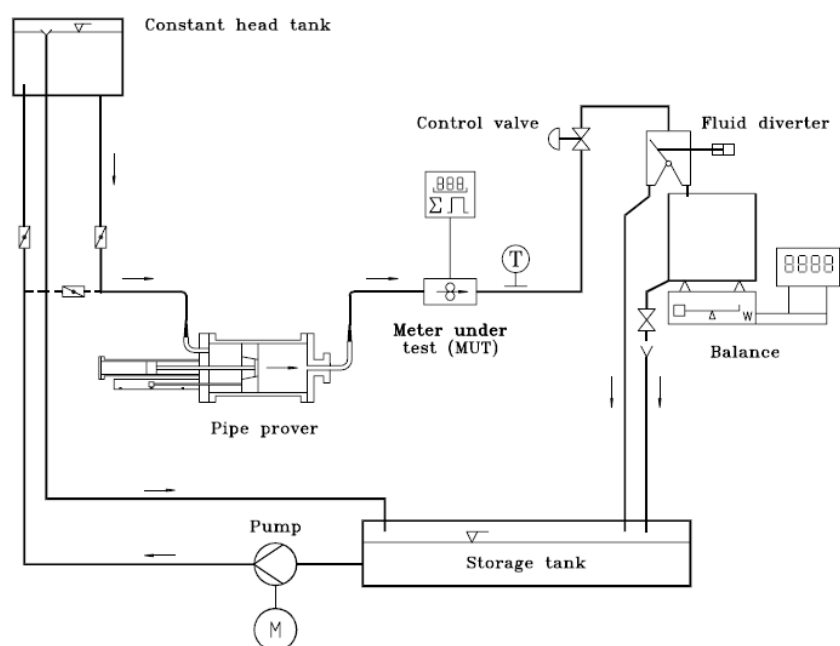
Table 3—Hypothetical Uncertainty Limits in General Liquid Metering Hierarchy

Level	Description of Hierarchy Level	Uncertainty Limit, + or – %	
		Per Event	Per Year
1	Primary Standards	0.002	0.002
2	Secondary Working Standards	0.005	0.005
3	Field Transfer Standards	0.015	0.015
4	Meter Prover Base Volume	0.03	0.03
5	Meter Indicated Volume	0.10	0.05
6	Correction for Quality and/or Quantity	0.15	0.07
7	Custody Transfer Ticket	0.20	0.10

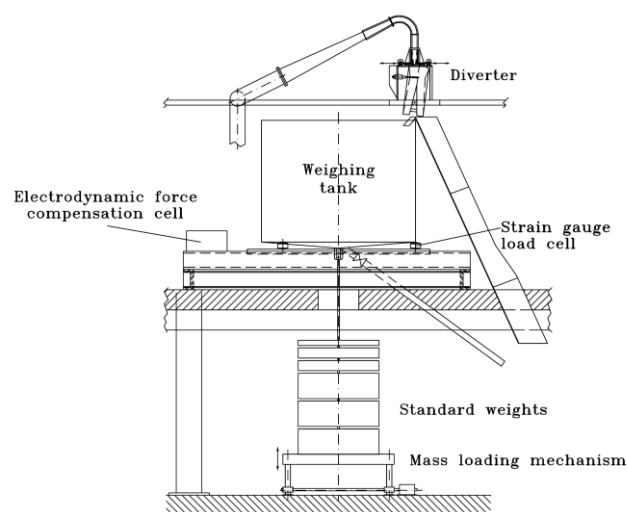
ตารางที่ 8-3 API MPMS Ch. 4-Sec.1-Introduction, 2005

หวังโซ่การสอบเทียบย้อนกลับ ได้กำหนดให้เป็นรูปแบบการถ่ายทอดแบบมาตรมายังท่อทดสอบความจุขนาดเล็กมาจากตุ้มน้ำหนักแบบมาตรา โดยท่อทดสอบความจุขนาดเล็กสามารถสอบเทียบโดยตรงจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับตุ้มน้ำหนักแบบมาตราโดยตรงเลย หรือใช้ถังตวงแบบมาตราที่ผ่านการถ่ายทอดจากการชั่งน้ำหนักเทียบกับตุ้มน้ำหนักแบบมาตราเป็นทางอ้อมอีกทางหนึ่งก็สามารถกระทำได้เช่นกัน จากรูปที่ 8-15 จึงพอสรุปรูปแบบการสอบเทียบมีด้วยกัน 3 วิธีการได้แก่

1. Gravimetric Method เป็นวิธีการชั่งน้ำหนักของน้ำสะอาดที่ใช้ในการสอบเทียบหาค่าปริมาตรมาตรฐานของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กโดยเครื่องชั่งน้ำหนักเทียบกับตุ้มน้ำหนักแบบมาตรา วิธีการดังกล่าวต้องดำเนินการในห้องปฏิบัติการและเป็นการลงทุนค่อนข้างสูง ในขณะที่เรามีท่อทดสอบความจุขนาดเล็กจำนวนมาก ร้อยทั่วประเทศไทยและราชการยังมีงบประมาณไม่มากพอการจัดหางบประมาณดำเนินการดังกล่าวจึงต้องรอเวลาที่เหมาะสม โดยทั่วไปค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบวิธีการนี้ (รูปที่ 8-15, 3) มีค่ามากกว่า 0.005%

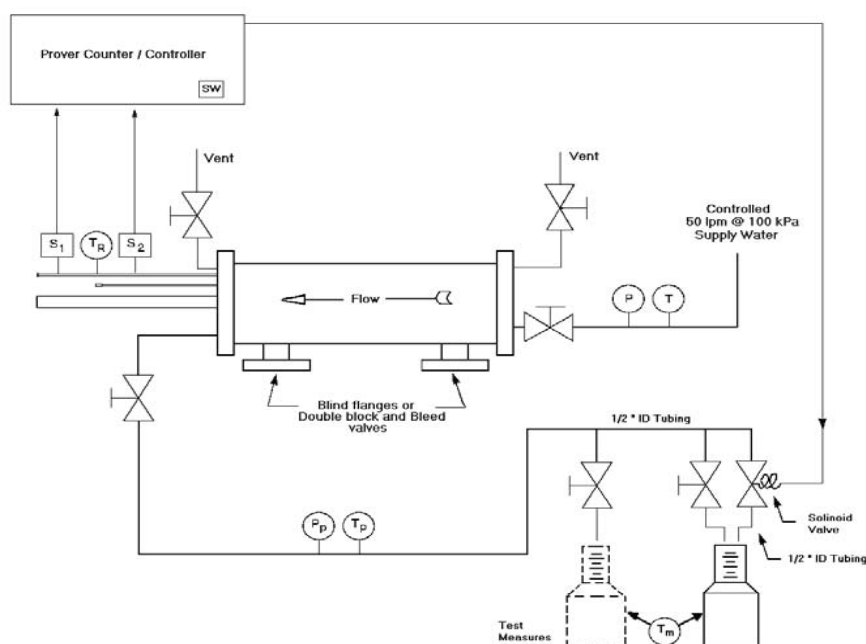


รูปที่ 8-16 สอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กด้วยวิธี Gravimetric Method

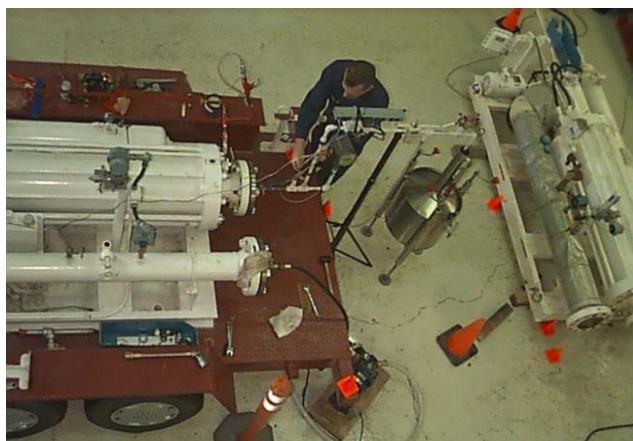


รูปที่ 8-17 ระบบการชั่ง 2 ระบบ คือ Stain gauge load cell และ EFC พร้อมแบบมาตราอ้างอิง

2. Waterdraw Method เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากใช้ทำการสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กด้วยถังตวงแบบมาตรา (รูปที่ 8-18) ซึ่งได้รับการสอบเทียบด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก (รูปที่ 8-15, 3a) โดยถังตวงแบบมาตราจะต้องมีค่า Repeatability น้อยกว่า 0.002 % และค่าความไม่แน่นอนของถังตวงแบบมาตราตาม API MSM Chapter 4 Proving System, Section 7 Field Standard, Table A4 (ตารางที่ 8-4) โดยทั่วไปค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบวิธีการนี้ (รูปที่ 8-15, 3b) มีค่ามากกว่า 0.01% และในบทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการสอบเทียบวิธีนี้เท่านั้น



รูปที่ 8-18 การจัดวางแบบมาตราและอุปกรณ์สอบเทียบ แบบ Waterdraw Method



รูปที่ 8-19 สอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กด้วยวิธี Waterdraw Method

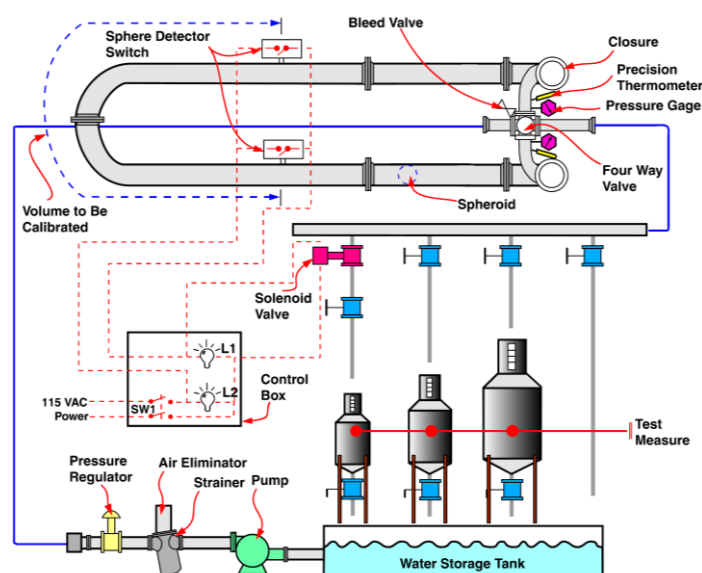
ในทางปฏิบัติงานจริง เรายังมีข้อจำกัดในการสอบเทียบถังตวงแบบมาตราด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักเนื่องจากพิกัดกำลังของเครื่องชั่ง, ค่าความละเอียด ตลอดจนค่าความไม่แน่นอนของเครื่องชั่ง อีกทั้งภาครัฐมีงบประมาณไม่เพียงพอในการลงทุนสร้างห้องปฏิบัติการดังกล่าวให้สามารถสอบเทียบถังตวงแบบมาตราด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักได้เกิน 100 ลิตร (26.417 แกลลอน) จนถึง 650 ลิตรตามพิกัดกำลังของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

แต่หากใช้ถังตวงแบบมาตราซึ่งได้รับการสอบเทียบด้วยการตวงเปรียบเทียบ (Volumetric Transfer Method) โดยทั่วไปมีค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบมากกว่า 0.015% ซึ่งอยู่เลยความต้องการตามตารางที่ 8-4 อยู่บ้างพอสมควร

Table A4—Uncertainty Limits for the Calibration of High Sensitivity Test Measures as Used in the Calibration of Small Volume Provers

Size of Test Measure, Gallons	Uncertainty Limit%
1	0.030
5	0.020
10	0.010
25	0.010
50	0.010
100	0.010

ตารางที่ 8-4 ค่า Uncertainty Limits ของถังตวงแบบมาตราสำหรับใช้สอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (API MPMS Ch. 4 - Proving Systems, Sec 7 - Field Standard Test Measures, 1998)

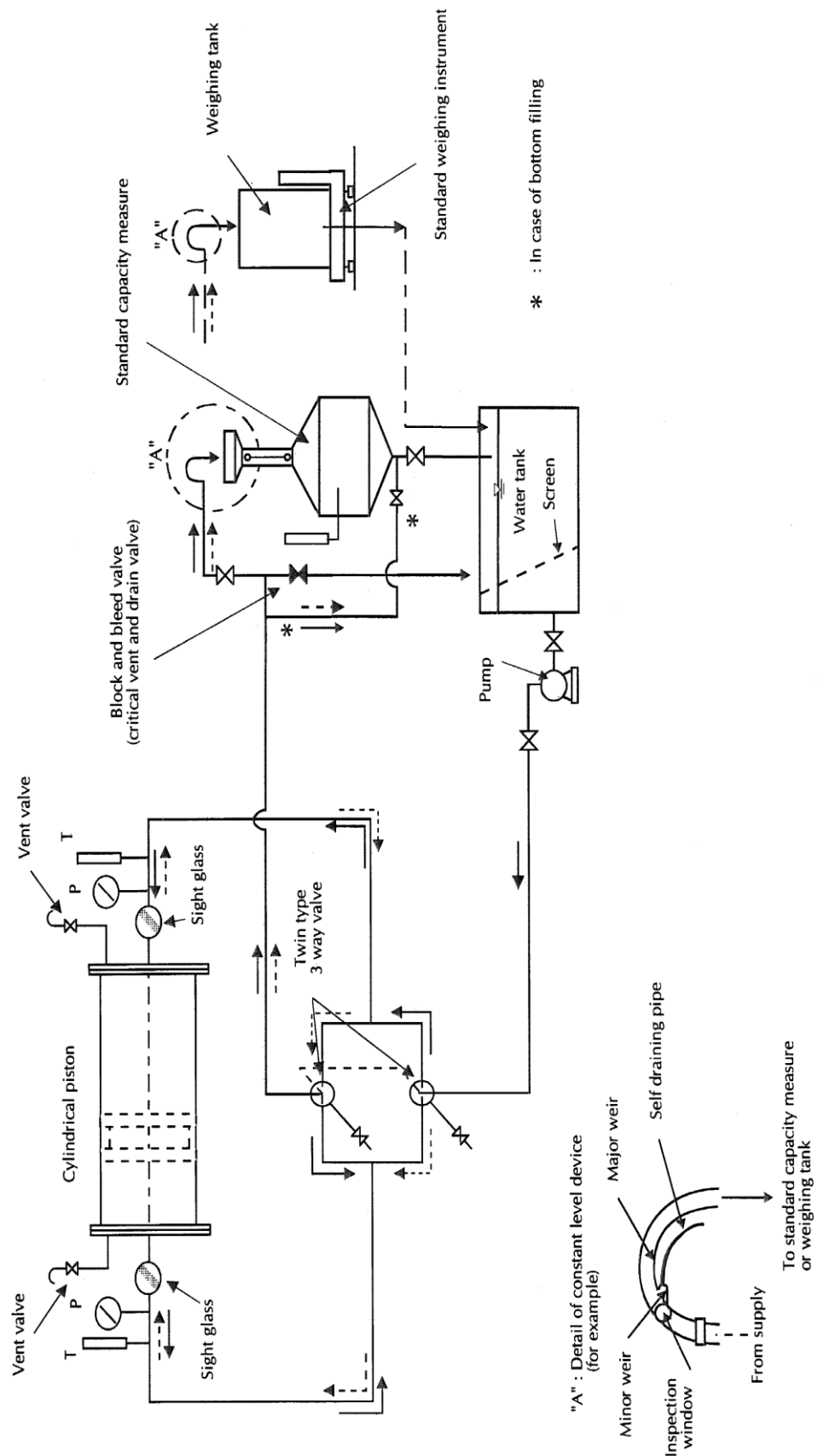


รูปที่ 8-20 สอบเทียบท่อทดสอบความจุ (pipe prover) ด้วยวิธี Waterdraw Method

3. Master-Flowmeter Method เป็นการสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กด้วยมาตรวัดมาตรฐาน (master meter) ซึ่งให้ผลดีพอสมควรขึ้นอยู่กับประวัติของมาตรวัดมาตรฐานเหล่านั้น สามารถทำการสอบเทียบได้หลายครั้งอย่างต่อเนื่องเพราะมาตรวัดมาตรฐานจะถูกติดตั้งอยู่กับที่ภายในระบบท่อร่วมกับท่อทดสอบความจุขนาดเล็กเป็นระบบการสอบเทียบระบบปิด



รูปที่ 8-21 สอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กด้วยวิธี Master Flowmeter Method



รูปที่ 8-22 สอบเทียบทดสอบความจุขนาดเล็กด้วยวิธี Water Draw Method และ/หรือ Gravimetric Method (OIML R119)

ปริมาตรมาตรฐาน (Base Volume) ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

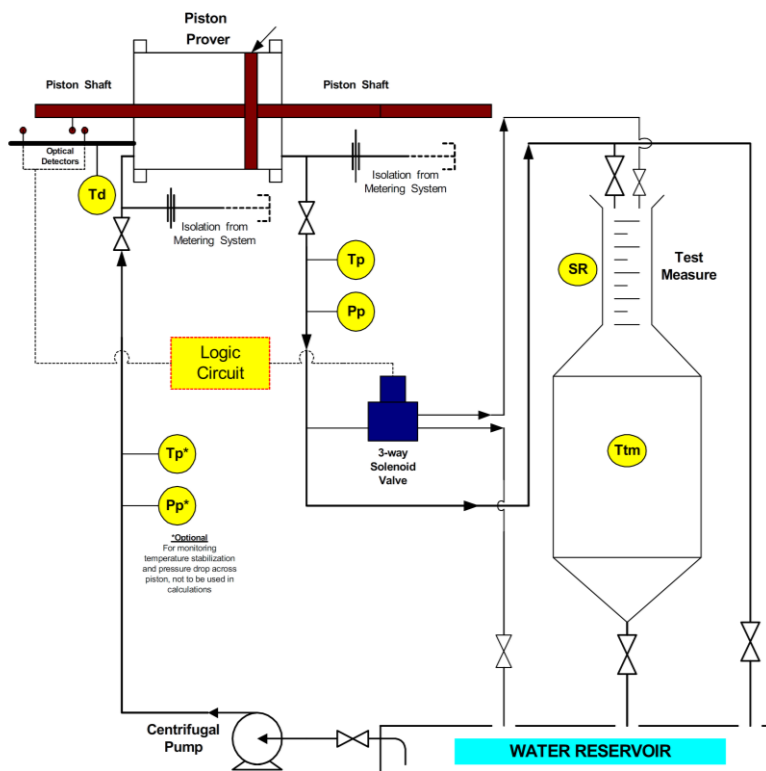
เมื่อเราเข้าใจขั้นตอนการทำงานของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กแล้ว เราจะเข้าใจว่าปริมาตรมาตรฐานของท่อทดสอบความจุ ต้องทำการระบุควบคู่กับทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวกวาดภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็กด้วยเช่นกัน ซึ่งพิจารณาออกเป็น 2 ค่าคือ

1. **ปริมาตรมาตรฐานของการสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กทิศทางเดียว (Base Volume of a Unidirectional Prover)** คือ ปริมาตรสอบเทียบที่ได้รับการปรับแก้ไขค่าไปยังค่าปริมาตรที่สภาวะมาตรฐาน โดยที่ตัวกวาด (displacer) เคลื่อนที่จากตัวตรวจจับ (detector) ตัวหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่งไม่ได้เคลื่อนที่ไป-กลับ เรียกเป็น “Upstream Base Volume” และ “Downstream Base Volume”

2. **ปริมาตรมาตรฐานของการสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กทิศทางไป - กลับ (Base Volume of a Bi-Directional Prover)** คือ ผลรวมของปริมาตรสอบเทียบจากการที่ตัวกวาด (displacer) เคลื่อนที่จากตัวตรวจจับ (detector) ตัวหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่งและเคลื่อนกลับมายังตัวตรวจจับเดิม ครอบคลุมการเคลื่อนที่ของตัวกวาดหนึ่งรอบและทำการปรับแก้ไขค่าผลรวมปริมาตรดังกล่าวไปยังค่าปริมาตรที่สภาวะมาตรฐาน

การสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กทิศทางเดียว (Base Volume of a Unidirectional Prover) ในกรณีที่เพลาลำดับหนึ่งหรือมากกว่าติดอยู่กับตัวกวาด (displacer) เพลาดังกล่าวอาจเป็นรูปทรงกระบอกสม่ำเสมอตลอดความยาวและอาจจะมีอยู่เฉพาะด้านใดด้านหนึ่งของตัวกวาด หรืออาจมีได้หลายกรณีจึงแบ่งออก

1) เพลารูปทรงกระบอกสม่ำเสมอตลอดความยาวและมีอยู่ทั้งสองด้านของตัวกวาด ปริมาตรด้าน Upstream อาจจะไม่เท่ากับปริมาตรด้าน Downstream การจัดวางแบบมาตรฐานในการสอบเทียบดังรูปที่ 8-23

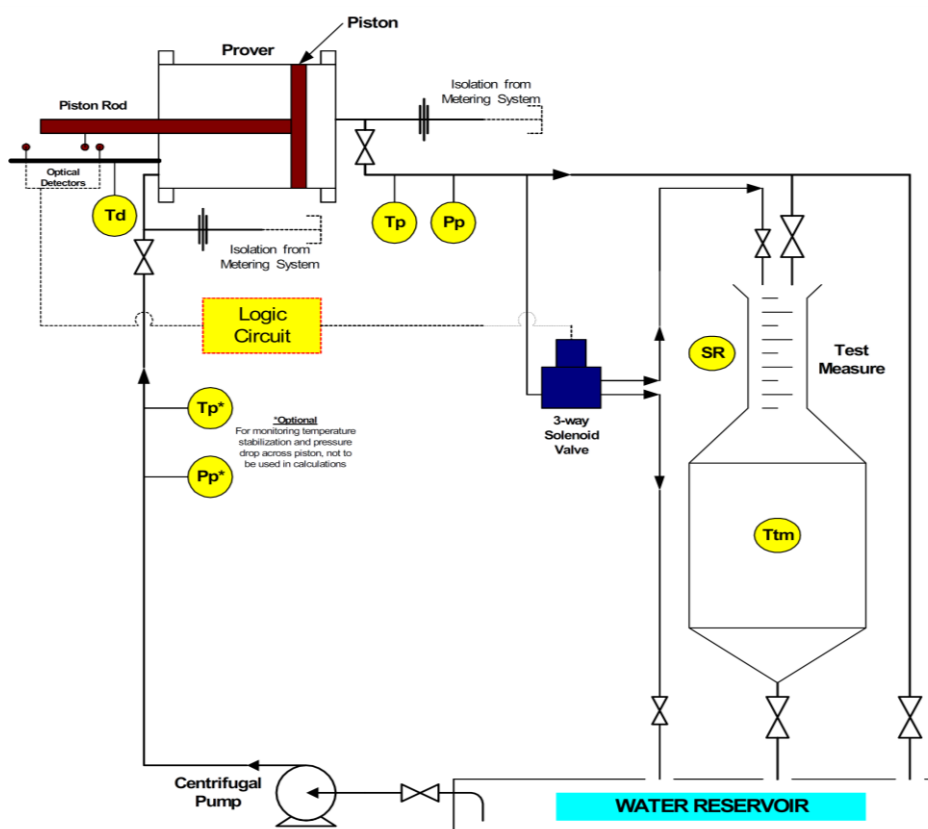


รูปที่ 8-23 ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กมีเพลารูปทรงกระบอกสม่ำเสมอตลอดความยาวและมีอยู่ทั้งสองด้านของตัวกวาด สอบเทียบด้วยวิธี Waterdraw (API MPMS Ch4, Sec.9, Part 2)

2) เพลารูปทรงกระบอกสม่ำเสมอตลอดความยาวและมีเพียงด้านใดด้านหนึ่งของตัวกวาด ดังนั้น ปริมาตรด้าน Upstream จะแตกต่างกับปริมาตรด้าน Downstream โดยความแตกต่างของปริมาตรดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับปริมาตรแทนที่ของเพลานั้นเอง ดูรูปที่ 8-5 และรูปที่ 8-6

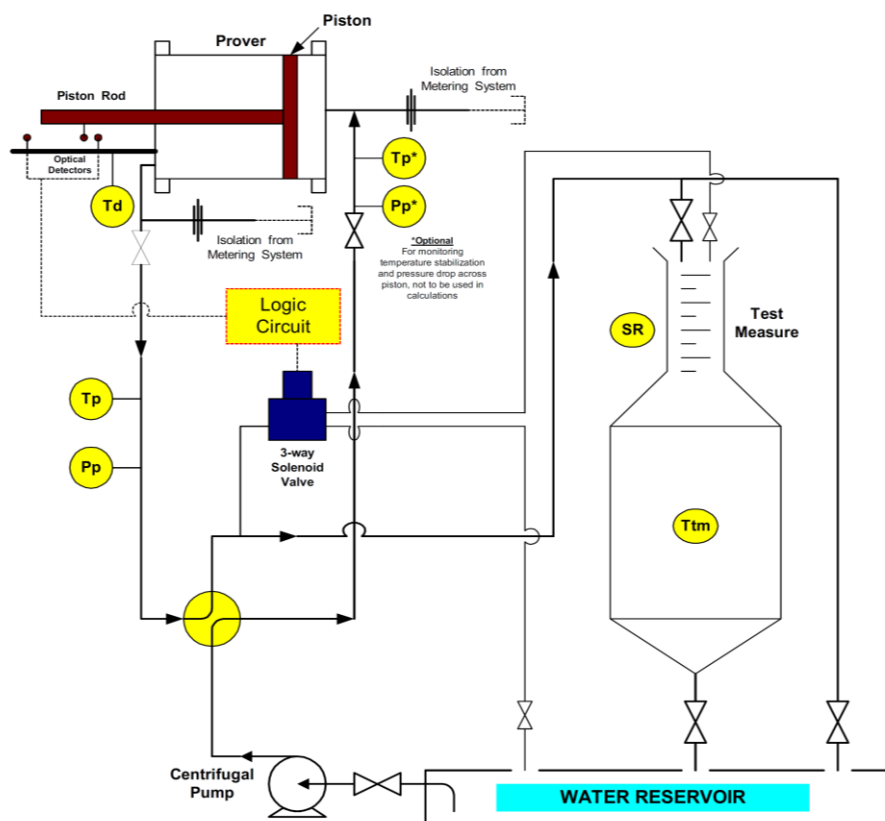
- ถ้าเพลายู่ด้าน upstream ของตัวกวาด ปริมาตรด้าน Upstream จะมีค่าน้อยกว่าปริมาตรด้าน Downstream ในทางกลับกัน
- ถ้าเพลายู่ด้าน Downstream ของตัวกวาด ปริมาตรด้าน Upstream จะมีค่ามากกว่าปริมาตรด้าน Downstream

ดังนั้นในใบรับรองผลการสอบเทียบเพื่อทดสอบความจุขนาดเล็กจึงต้องเขียนให้ชัดเจนว่าปริมาตรด้าน Upstream และ ปริมาตรด้าน Downstream มีค่าเท่าไร หากทำการสอบเทียบเพื่อทดสอบความจุขนาดเล็กเพื่อหาปริมาตรเพียงค่าเดียวจำเป็นต้องบอกด้านที่ทำการสอบเทียบว่าเป็นปริมาตรด้าน Downstream หรือปริมาตรด้าน Upstream โดยจัดวางแบบมาตราในการสอบเทียบดังรูปที่ 8-24 และรูปที่ 8-25 ตามลำดับ



รูปที่ 8-24 สอบเทียบ CPP ด้วยวิธี Waterdraw Method หาค่าปริมาตรมาตรฐานด้าน Downstream (API MPMS Ch4, Sec.9, Part 2)

เนื่องจากผู้ผลิตเพื่อทดสอบความจุขนาดเล็กมีอยู่ไม่กี่รายและหลักการทำงานมีความคล้ายคลึงกัน แต่อาจมีรายละเอียดปลีกย่อยที่แตกต่างกันบ้าง ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจการทำงานของเพื่อทดสอบความจุขนาดเล็กจึงยกตัวอย่างผู้ผลิตรายหนึ่ง ขั้นตอนการทำงานแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ

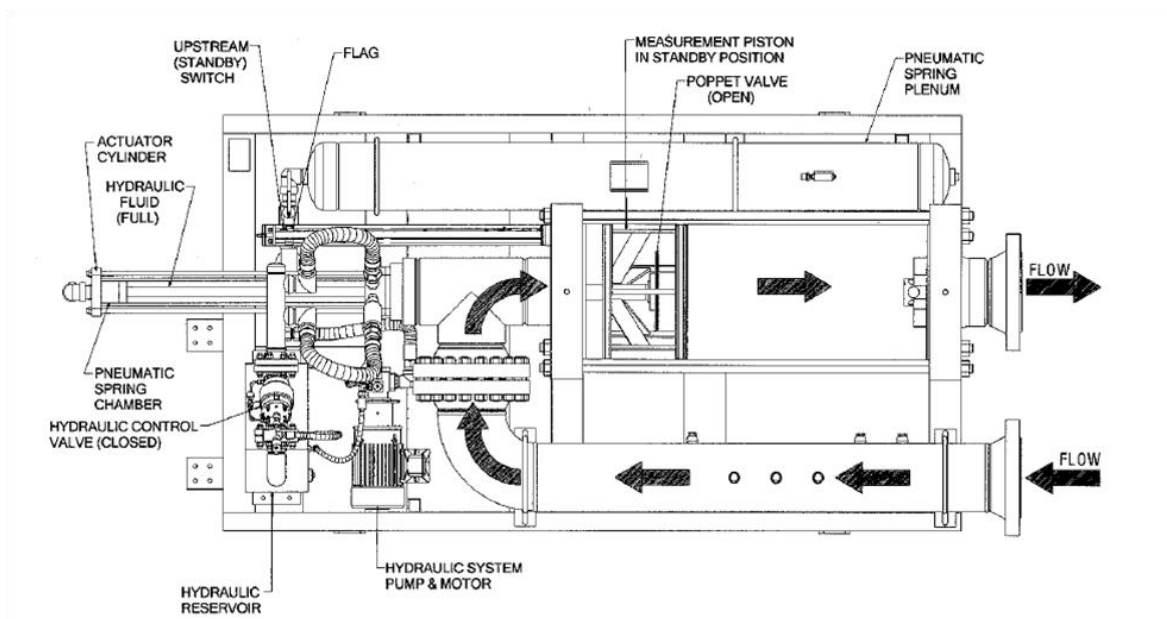


รูปที่ 8-25 สอบเทียบ CPP ด้วยวิธี Waterdraw Method หาค่าปริมาตรมาตรฐานด้าน Upstream (API MPMS Ch4, Sec.9, Part 2)

1. ขั้นตอนตำแหน่งพัก (Standby) (รูปที่ 8-26) ทำการตรวจสอบและเตรียมระบบสอบเทียบ โดย
 - 1.1. ตรวจสอบซีลของตัวกวาดทำหน้าที่ซีลระหว่างตัวกวาดกับผนังภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็กทำงานสมบูรณ์หรือไม่
 - 1.2. ตรวจสอบระบบวาล์วทางเข้าและวาล์วทางออก หรือวาล์วควบคุมทิศทางการไหลมีการรั่วไหล หรือไม่
 - 1.3. ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิและความดันถูกวิธีหรือไม่ และมีขีดชั้นหมายเลข (d) ละเอียดเพียงพอหรือไม่
 - 1.4. ตรวจสอบระบบขับเคลื่อนตัวกวาดให้กลับมายังตำแหน่งพักซึ่งอาจเป็นระบบไฮดรอลิกหรือมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยโซ่ ทำงานปกติหรือไม่
 - 1.5. สภาวะทดสอบด้วยอัตราการไหลและความดันคงที่ไม่ได้น้อยกว่าที่ผู้ผลิตกำหนด เช่น EMERSON : กำหนดให้ใช้แหล่งน้ำสะอาด มีอัตราการไหลและความดันคงที่ ตลอดจนปราศจากฟองอากาศภายในน้ำสะอาด โดยมี
 - Flowrate > 10 gpm (38 lpm) ที่ 30-100 psi (207 to 689 kPa)
 - 1.6. ตรวจสอบการจัดวางระบบสอบเทียบ หากเป็นระบบสอบเทียบ Waterdraw Method ดังรูปที่ 8-18 หรือ รูปที่ 8-23 ถึง รูปที่ 8-25

- 1.7. ถังตวงแบบมาตราที่ใช้ในการสอบเทียบเพื่อทดสอบความจุขนาดเล็กต้อง
 - ได้รับการตรวจสอบจากหน่วยงานของรัฐ ด้วยวิธีการชั่งน้ำหนักและให้ค่า Repeatability น้อยกว่า 0.002 % และค่าความไม่แน่นอนตามตารางที่ 8-4
 - มีค่าขีดขึ้นหมายมาตรละเอียดอ่านได้ต่ำสุด (resolution) 0.02 % ของค่าปริมาตรมาตรฐาน (Base Volume) ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก หรือน้อยกว่า เช่น ถังตวงแบบมาตรา 250 ลิตร ค่าขีดขึ้นหมายมาตรา (d) = $250 \times 1000 \times 0.0002 = 50 \text{ cc}$. ซึ่งในบางกรณีอาจใช้ถังตวงแบบมาตราจำนวนมากกว่า 1 ถึงก็สามารถกระทำได้โดยใช้ชุดอุปกรณ์ซึ่งผลิตผู้ผลิตจัดมาให้ประกอบด้วยท่อน้ำขนาดเล็กและโซลินอยล์วาล์ว (solenoid valve) ซึ่งจะทำให้การปิด - เปิด ด้วยการถูกกระตุ้นด้วยสัญญาณจากตัวตรวจจับ (detector)
- 1.8. เครื่องวัดอุณหภูมิสำหรับวัดอุณหภูมิเพื่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (T_1 , T_2) และอุณหภูมิถังตวงแบบมาตรา (T_M) ควร
 - ชนิด Glass Stem Thermometers 3 ชุด
 - ขีดขึ้นหมายมาตรา (d) อ่านละเอียดมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 °C
 - ค่า Uncertainty ต่ำกว่าค่าขีดขึ้นหมายมาตรา (d)
 - ช่วงอุณหภูมิ -1 to 50 °C
- 1.9. เครื่องวัดอุณหภูมิสำหรับวัดอุณหภูมิ Invar Rod (T_d)
 - RTD (Resistance Temperature Detectors) หรือ digital thermometer
 - ขีดขึ้นหมายมาตรา (d) อ่านละเอียดมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 °C
- 1.10. เครื่องวัดความดันของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กควรได้รับการสอบเทียบมีความแม่นยำ (accuracy) เท่ากับ 2 % ของช่วงวัดได้ทั้งหมด (full scale) หรือดีกว่า
 - ขีดขึ้นหมายมาตรา (d) อ่านละเอียดมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 PSI หรือ 1.0 kPa
 - ค่า Uncertainty ต่ำกว่าค่าขีดขึ้นหมายมาตรา (d)
 - ช่วงการวัด 0 - 100 psig (0 - 689 kPa)
- 1.11. ก่อนที่ทำการสอบเทียบเพื่อทดสอบความจุขนาดเล็กกับถังตวงแบบมาตรา ต้องจัดให้ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กและถังตวงแบบมาตราอยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเดียวกันเป็นระยะหนึ่งเพื่อให้มีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน อีกทั้งต้องป้องกันจากแสงแดดโดยตรง เพื่อให้เกิดความสมดุลของอุณหภูมิระหว่างของเหลวที่ใช้เป็นสารตัวกลางทดสอบกับท่อทดสอบความจุขนาดเล็กและถังตวงแบบมาตราและเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากเกินไปในระหว่างทำการสอบเทียบ
- 1.12. การใช้น้ำเป็นของเหลวตัวกลางทดสอบ มีข้อดีหลายอย่างด้วยกันคือ น้ำมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิช้าเมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป, มีการอัดตัวต่ำเมื่ออยู่ภายใต้ความดัน (low compressibility) และ น้ำมีการขยายตัวต่ำเนื่องจากมีค่า coefficient of thermal expansion ต่ำเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

- 1.13. ให้ตัวกวาดภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็กมีการเคลื่อนช่วงระยะเวลาหนึ่งก่อนทำการสอบเทียบเพื่อให้ตัวกวาดได้ไล่ฟองอากาศที่อยู่ค้างภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก อีกทั้งยังช่วยให้เกิดความสมดุลของอุณหภูมิระหว่างน้ำและตัวท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก ในกรณีที่ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กไม่มีฉนวนหุ้มและจำเป็นต้องทำการสอบเทียบภายนอกอาคารกลางแจ้งจำเป็นต้องหาสิ่งปกคลุมเป็นฉนวนให้กับท่อทดสอบความจุขนาดเล็กชั่วคราวก่อนเพื่อลดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก



รูปที่ 8-26 ขั้นตอนทำงานของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก ตำแหน่ง S_0 ; Standby Position

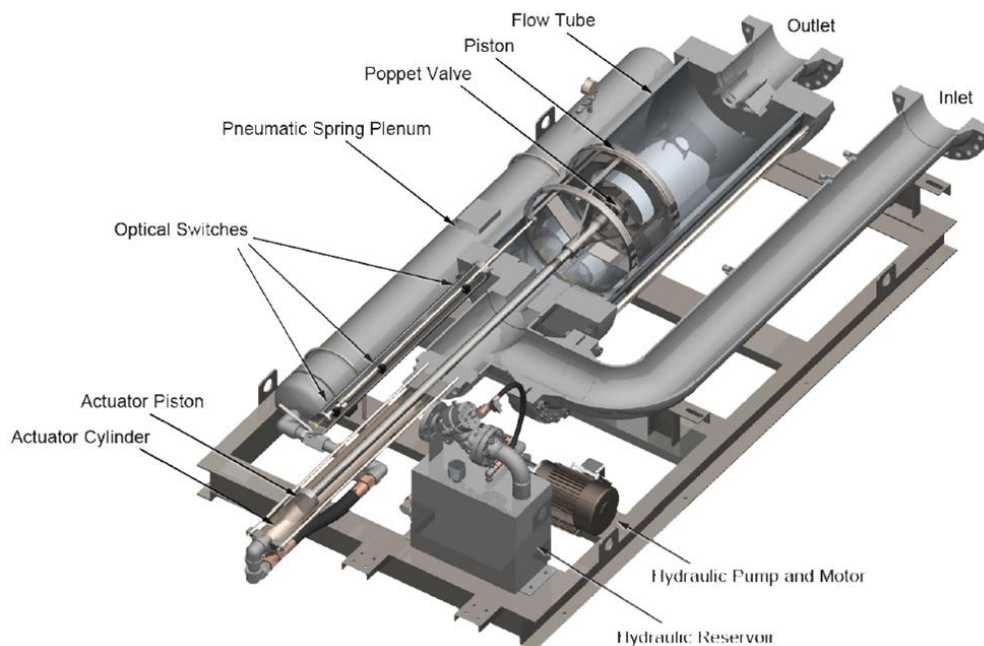
- 1.14. ในการสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กต้องกระทำที่อัตราการไหลไม่สูงเกินไปและไม่ต่ำเกินไปกว่าอัตราการไหลซึ่งกำหนดมาจากโรงงานผู้ผลิต เนื่องจากหากกระทำที่อัตราการไหลสูงเกินไปจะกระทำให้ซีลของตัวกวาด (displacer) เสียหายได้ ปกติพบว่าความเร็วการเคลื่อนของตัวกวาดสูงสุดจะมีค่าประมาณ 1.5 เมตรต่อวินาที (5 ฟุตต่อวินาที) แต่ก็ไม่ใช่ความเร็วที่บังคับขึ้นอยู่กับผู้ผลิตและการออกแบบ
- 1.15. ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กต้องมีระบบ pulse-interpolation **ที่ให้ค่า resolution อย่างน้อยเท่ากับ 1 ใน 10,000 ส่วนของปริมาตรที่แสดงค่าโดยมาตรวัด**สำหรับแต่ละรอบการเคลื่อนที่ระหว่างตัวตรวจจับตัวกวาด
- 1.16. การต่อสัญญาณควบคุมที่เกี่ยวข้องทั้งหมด และพร้อมสำหรับการสอบเทียบ ตัวกวาดอยู่ในตำแหน่งพัก
- 1.17. **ตรวจสอบ Slip Test**
- เมื่อหา “BASE VOLUME” ที่สภาวะมาตรฐานของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กที่อัตราการไหลต่ำแรงดันปกติ เช่น EMERSON : Flowrate < 10 gpm (38 lpm) ที่ 30-100 psi (207 to 689 kPa)

- เมื่อตรวจสอบ “Seal Leak Check” เช่น EMERSON: ใช้ Dial Gauge จับการเคลื่อนที่ Displacer เมื่ออัดแรงดันน้ำตามที่ผู้ผลิตกำหนด ไม่น้อยกว่า 75 psi เข้าท่อทดสอบความจุขนาดเล็กโดยปิดด้านทางออก ผลการทดสอบ Seal Leak Check ผ่านต่อเมื่อ Displacer ขยับน้อยกว่า 0.102 mm (0.004 inches) ในเวลา 5 นาที

1.18. เมื่อตรวจสอบระบบและเตรียมการระบบสอบเทียบครบสมบูรณ์ จึงทำงานขั้นตอนต่อไป

2. ขั้นตอนเริ่มเคลื่อนที่ (Initiation position); S_1 (รูปที่ 8-28)

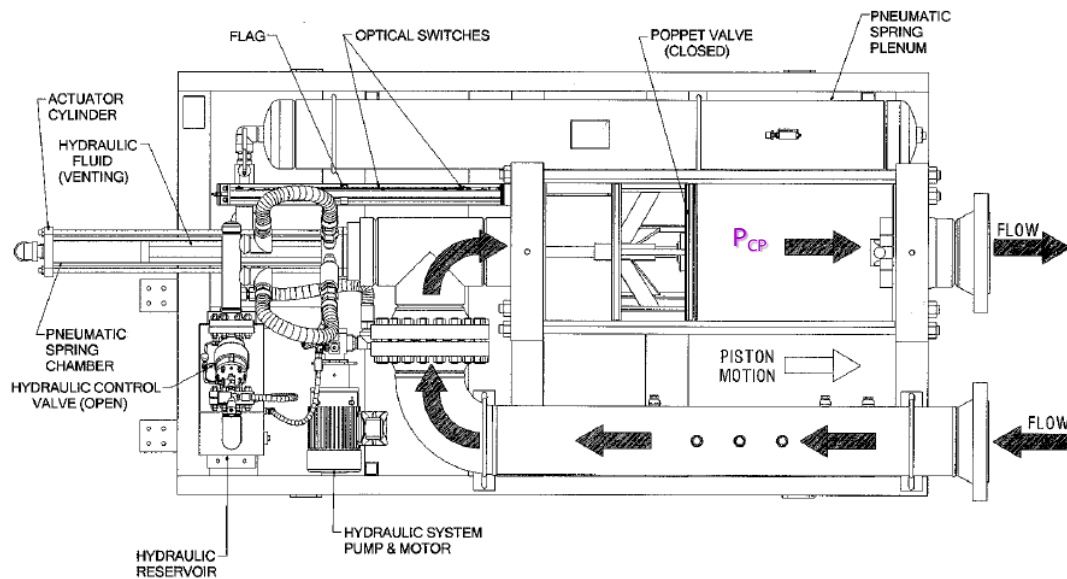
- 2.1. เมื่อเปิดวาล์วควบคุมไฮดรอลิก ความดันของระบบไฮดรอลิกจาก pneumatic spring plenum ดันให้ poppet valve ปิด ระบบเริ่มทำงานรอบการสอบเทียบโดย piston วิ่งกลับไปทางด้าน downstream พร้อมกับของเหลว
- 2.2. การวัดค่าอุณหภูมิและค่าความดันของน้ำที่ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กนั้นควรอยู่ในตำแหน่งซึ่งจะให้ค่าเป็นตัวแทนของน้ำซึ่งอยู่ระหว่างตัวกวาดกับถังตวงแบบมาตรา ด้วยเหตุนี้ควรจดบันทึกค่าเป็นค่าอุณหภูมิและความดันในท่อทดสอบความจุขนาดเล็กเมื่อทำการเริ่มการสอบเทียบ



รูปที่ 8-27 ตำแหน่ง Optical Switch เชื่อมติดกับตัวกวาด(displacer)

- 2.3. ในกรณีที่ใช้ optical switch เป็นตัวตรวจจับการเคลื่อนที่ของตัวกวาด (displacer) แต่ไม่สามารถตรวจจับการเคลื่อนที่ตัวกวาดได้โดยตรงดังนั้นผู้ผลิตจึงทำการเชื่อมต่อตัวกวาดเข้ากับ invar rod แล้วต่อยื่นออกมานอกท่อทดสอบความจุขนาดเล็กรวมทั้งติดตั้ง Flag บนแท่ง invar rod ด้วยเหตุนี้ Flag ที่อยู่บน Invar rod จึงเคลื่อนที่ไปพร้อมกับตัวกวาดพร้อมๆ กันโดยใช้ Flag ไปตัดสัญญาณ Optical switch ดังรูปที่ 8-12 ในการระบุ

ตำแหน่งของตัวกวาดนั่นเอง ดังนั้นเพื่อให้การทำงานของ Optical switch ไม่มีข้อผิดพลาดจึงควรจัดให้ Optical switch อยู่ในที่มืดเนื่องจากมันมีความไวต่อแสงแดดภายนอกมาก เช่นจัดให้มีเปลือกครอบ optical switch ระหว่างปฏิบัติงาน นอกจากนี้ในการทำงานของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กใช้ปริมาตรทดสอบจำนวนน้อยแต่เป็นการขยายสัญญาณเพิ่มขึ้นของจำนวนพัลส์ของสัญญาณดังนั้นการติดตั้ง Optical switch บนวัสดุ Invar เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์ขยายตัวเชิงเส้นของวัสดุชนิดนี้มีค่าต่ำมาก

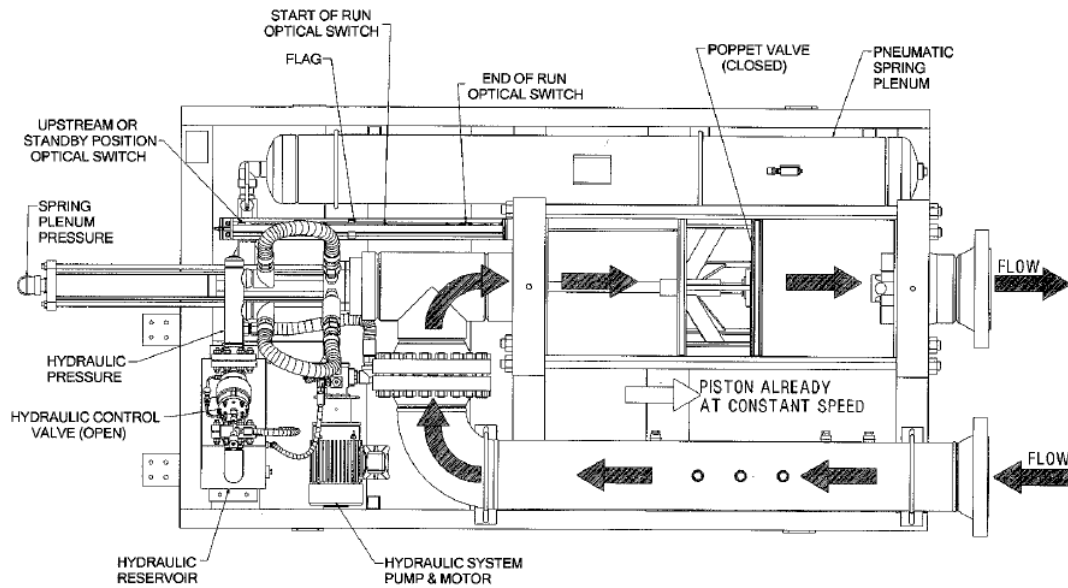


รูปที่ 8-28 ขั้นตอนทำงานของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก ตำแหน่ง S1 ; Initial Motion (บันทึกค่าความดัน)

2.4. เป็นตำแหน่งที่ทำการวัดค่าความดันของของเหลวสารตัวกลางทดสอบภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (P_{CP}) และค่าอุณหภูมิขาเข้า (T_{IN}) พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปผู้ปฏิบัติงานสอบเทียบจะทำการวัดความดันขณะที่ตัวกวาดเริ่มเคลื่อนที่และสิ้นสุดการเคลื่อนที่แล้วมาหาค่าเฉลี่ยบ้าง หรือไม่ก็นำค่าความดันระหว่างตัวกวาดเคลื่อนที่เป็นค่าความดันค่าเดียวแล้วนำไปคำนวณผล ซึ่งจะขัดกับคำแนะนำของผู้ผลิต Emerson ส่วนผู้ผลิตรายอื่นๆ กำหนดอย่างไรก็ต้องดูกัน

3. ขั้นตอนสอบเทียบสอบเทียบ (Proving); S_1 - S_2 (รูปที่ 8-29)

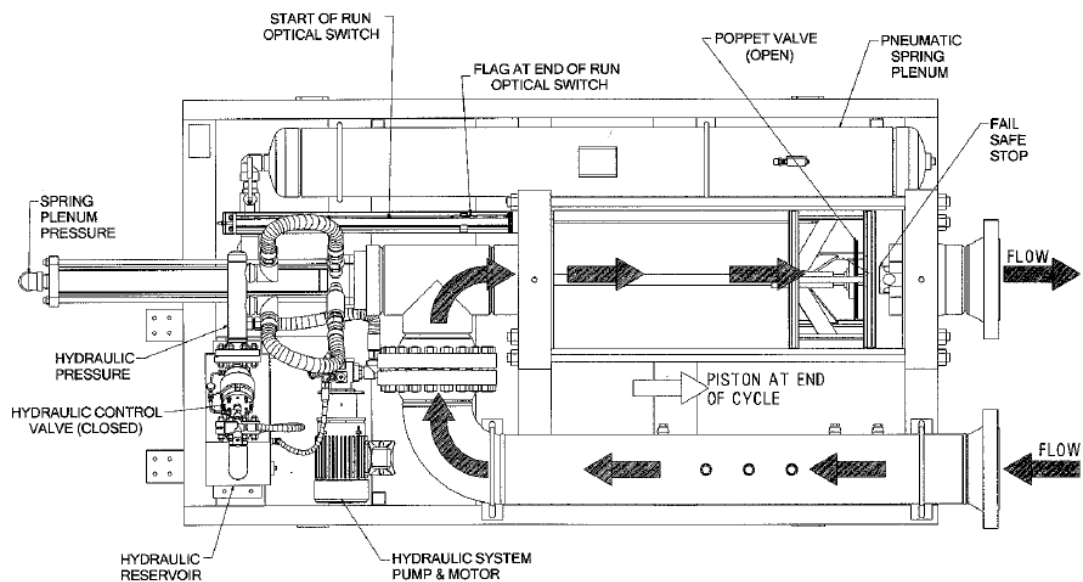
- 3.1. สัญญาณจาก Optical switch จะถูกส่งไปยังโซลินอยด์วาล์ว (solenoid valve) เพื่อเปิดวาล์วให้น้ำไหลเข้าสู่ถังตวงแบบมาตรา และผู้ปฏิบัติงานเปิดวาล์วอีกตัวเพื่อช่วยรักษาอัตราการไหลทดสอบให้เป็นไปตามที่กำหนด
- 3.2. ในขั้นตอนนี้ความดันจะลดลงเมื่อเทียบกับความดันที่ทำการวัดเมื่อตัวกวาดอยู่ในตำแหน่ง S_1 เล็กน้อย



รูปที่ 8-29 ขั้นตอนทำงานของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก ตำแหน่ง S_1 - S_2 ; Proving (Base Volume)

4. ขั้นตอนสิ้นสุดการสอบเทียบ (End of proving run); S_2 (รูปที่ 8-30)

- 4.1. วัดค่าอุณหภูมิขาออก เราใช้ค่าอุณหภูมิที่ทดสอบความจุขนาดเล็ก (T_{CP}) เป็นค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิขาเข้า (T_{IN}) และอุณหภูมิขาออก (T_{OUT}) จากท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก



รูปที่ 8-30 ขั้นตอนทำงานของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก ตำแหน่ง S_2 ; End of Proving Run

- 4.2. เมื่อผ่านตัวตรวจจับตัวกวาด (displacer detector) ตัวสุดท้าย (S_2) ระบบส่งสัญญาณ
- ไปยังวาล์วควบคุมไฮดรอลิกให้ปิดวาล์ว แรงดันของเหลวภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็กจะดันให้ piston เคลื่อนที่ต่อไป ทำให้เป็นการเปิดวาล์ว a flow-

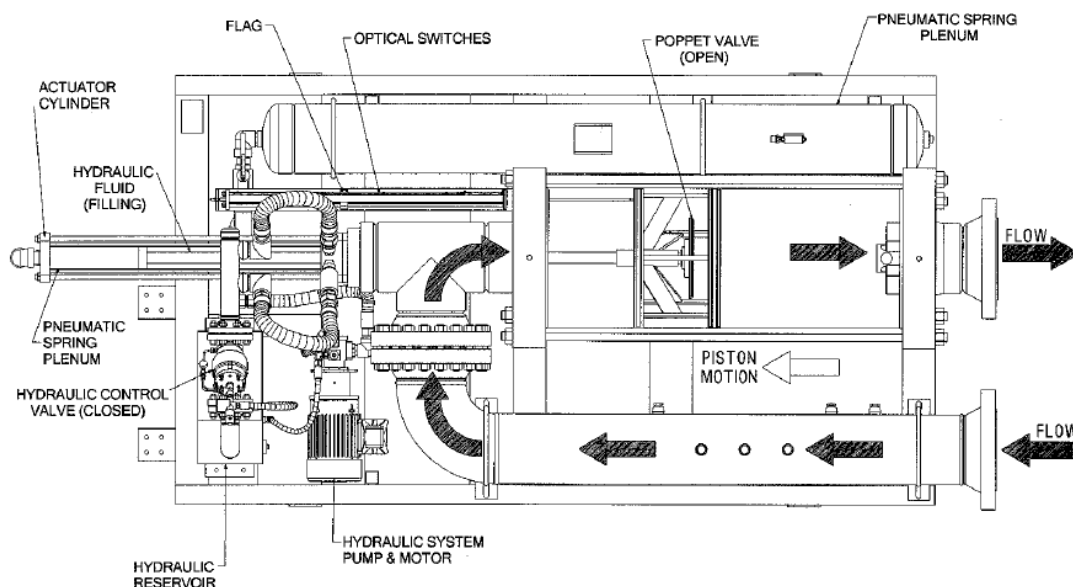
through valve, “Poppet valve” เปิด และยอมให้ของเหลวไหลผ่านออกไปจากท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

- โซลินอยด์วาล์ว (solenoid valve) เพื่อปิดวาล์วน้ำไม่ให้ น้ำไหลเข้าสู่ถึงตวงแบบมาตรา โดยผู้ปฏิบัติงานควรปิดวาล์วอีกตัวเพื่อช่วยรักษาอัตราการไหลทดสอบให้เป็นไปตามที่กำหนดก่อนหน้านี้เสียก่อนตัวกวาดเคลื่อนที่ถึง S_2

- 4.3. ขณะทำการสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของถังตวงแบบมาตรา (T_p) กับท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (T_{CP}) ต้องมีค่าไม่เกิน ± 0.2 °C หรือค่า $T_p - T_{CP} \leq |0.2|$ °C
- 4.4. ค่า Repeatability ของการสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กจะต้องได้ไม่เกิน 0.02%
- 4.5. สิ้นสุดขั้นตอนสอบเทียบหาปริมาตรมาตรฐานด้าน Downstream

5. ขั้นตอนกลับสู่ตำแหน่งพัก (รูปที่ 8-31)

- 5.1. ตัวกวาดจะถูกระบบไฮดรอลิก หรือมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยโซ่ ดึงกลับมายังตำแหน่งพัก โดยยังยอมให้ของเหลวไหลผ่านท่อทดสอบความจุออกไป ตลอดเวลาที่เคลื่อนที่กลับ ในกรณีเกิดความผิดพลาดในการทำงานของระบบไฮดรอลิกหรือระบบมอเตอร์ Poppet valve จะถูกก้าน Fail safe stop กระทั่งให้เปิด เพื่อไม่ให้ความดันคงค้างเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อตัวท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก



รูปที่ 8-31 ขั้นตอนทำงานของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก ตำแหน่ง S_2 วิ่งกลับผ่าน S_1 สิ้นสุด S_0 ไปตำแหน่งพัก (Standby) ด้าน upstream

การคำนวณผลการสอบเทียบเพื่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

เมื่อทำการสอบเทียบโดยวิธีการดวงเปรียบเทียบ เราพิจารณาปริมาตรของ “ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก” เทียบกับปริมาตรของ “ถังตวงแบบมาตรา” ภายหลังที่ทำการปรับค่าปริมาตรที่วัดได้ทั้งจากท่อทดสอบความจุขนาดเล็กและถังตวงแบบมาตราไปยังสภาวะอ้างอิง (อุณหภูมิอ้างอิงและความดันอ้างอิง) โดยทั่วไปคือที่ 30 °C และความดันบรรยากาศ เราจึงพิจารณา

1. พิจารณาตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{tw} , C_{ts} , C_{ps} , C_u , และ C_{pl}

1.1. ในเทอมอุณหภูมิของเหลวตัวกลางสอบเทียบเป็นน้ำสะอาดหรือน้ำประปา พิจารณาอุณหภูมิของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (compact prover) และถังตวงแบบมาตรา (prover tank) พบว่าโดยปกติแล้วค่าอุณหภูมิของทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน ; $T_{CP} \neq T_P$

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{ts}

- C_{tsP} พิจารณา
- C_{tsCP} พิจารณา

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{tsd}

- C_{tsd} นำมาพิจารณา เนื่องจากขณะสอบเทียบบางส่วนของ Invar rod ซึ่งติดอยู่กับตัวกวาด (displacer) ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กสัมผัสกับของเหลวที่ใช้ในการสอบเทียบและอากาศสิ่งแวดล้อมทำให้มีการขยายตัวหรือหดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเหลวภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็กและอุณหภูมิของอากาศสิ่งแวดล้อม

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_u

- C_{uP} สามารถตัดทิ้งได้
 - C_{uCP} สามารถตัดทิ้งได้
- เนื่องจากเราจะใช้ C_u เฉพาะกับสารตัวกลางทดสอบที่เป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวปิโตรเลียม แต่ในที่นี้สารตัวกลางเป็นน้ำสะอาดหรือน้ำประปาเพราะโดยทั่วไปเราไม่ได้ใช้น้ำบริสุทธิ์ ดังนั้นค่า C_{uP} , C_{uCP} สามารถตัดทิ้งได้

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{tw}

- C_{tw} นำมาพิจารณา เพราะใช้น้ำสะอาดหรือน้ำบริสุทธิ์เป็นตัวกลาง

1.2. ในเทอมความดันของเหลวตัวกลางสอบเทียบเป็นน้ำสะอาดหรือน้ำประปา พิจารณาความดันภายในท่อสอบเทียบขนาดเล็กซึ่งไม่เท่ากับความดันบรรยากาศ ($P_{CP} \neq P_{atm}$) แต่ในขณะเดียวกันความดันภายในถังตวงแบบมาตรามีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ $P_P = P_{atm}$

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{ps}

- C_{psP} สามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากถังตวงแบบมาตราเป็นถังเปิด ความดันภายในถังตวงแบบมาตรามีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ
- C_{psCP} นำมาพิจารณา เนื่องจากความดันเฉลี่ยภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็กมีผลต่อการขยายตัวหรือหดตัวตัวเรือนท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{pi}

- C_{pIP} สามารถตัดทิ้งได้ ไม่นำมาพิจารณา เพราะความดันภายในถังตวงแบบมาตรา เท่ากับความดันบรรยากาศ
- C_{pICP} นำมาพิจารณา เนื่องจากความดันน้ำเฉลี่ยค่อนข้างสูง

สรุปว่าค่าที่ต้องนำมาคิดทั้งหมดคือ $C_{tsdb}, C_{tsCP}, C_{pICP}, C_{psCP}$
 C_{tsP}, C_{twP}

2. การคำนวณหาค่าปริมาตรของถังตวงแบบมาตราและท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

เมื่อทราบถึงตัวแปรแก้ไขปริมาณที่มีผลต่อปริมาตรของเหลว ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงค่าปริมาตรที่อ่านได้จากถังตวงแบบมาตรา V_{Pr} ตามสเกลของถังตวงแบบมาตราซึ่งเป็นค่าปริมาตรถังตวงแบบมาตราที่ถูกปรับค่าปริมาตรไปยังสภาวะอ้างอิงหรือสภาวะมาตรฐานแล้ว (อุณหภูมิอ้างอิงและความดันบรรยากาศประจำแต่ละถัง) และปรับค่าปริมาตรมาตรฐานของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กจากการคำนวณจากสภาวะวัดได้ไปเป็นค่าปริมาตรที่สภาวะอ้างอิง (T_o, P_{atm}) เพื่อสามารถทำการเทียบปริมาตรที่สภาวะเดียวกัน

• สำหรับถังตวงแบบมาตรา

อ่านค่าปริมาตรของถังตวงแบบมาตราขณะสอบเทียบ V_{Pr} จากสเกลถังตวงซึ่งแสดงค่าปริมาตร ณ สภาวะมาตรฐานประจำแต่ละถังตวงแบบมาตราที่ความดันบรรยากาศ P_{atm} และอุณหภูมิของน้ำที่วัดได้ T_p โดยมีค่าความหนาแน่นของน้ำ ρ_{TP} ค่าปริมาตรของถังตวงแบบมาตราที่อุณหภูมิวัดได้และความดันอ้างอิงมีค่าเท่ากับ

$$V_{TOP} = V_{Pr} \times C_{tsP} \quad (Eq.8-1)$$

จากนั้นทำการแก้ไขปรับค่าปริมาตรของน้ำที่อุณหภูมิวัดได้ของน้ำขณะทำการสอบเทียบไปเป็นค่าปริมาตรของน้ำที่อุณหภูมิมาตรฐานหรืออุณหภูมิอ้างอิงซึ่งความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิมาตรฐานมีค่าเท่ากับ ρ_0

$$V_{TOP} = V_{OP} \times C_{twP} \quad (Eq.8-2)$$

$$V_{OP} = \frac{V_{TOP}}{C_{twP}} = V_{TOP} \times \frac{\rho_{TP}}{\rho_0} \quad (Eq.8-3)$$

ดังนั้นปริมาตรของน้ำภายในถังตวงแบบมาตราที่สภาวะมาตรฐานหรือสภาวะอ้างอิงจึงมีค่าเท่ากับ

$$V_{OP} = V_{Pr} \times \frac{C_{tsP}}{C_{twP}} = V_{Pr} \times C_{tsP} \times \frac{\rho_{TP}}{\rho_0} \quad (Eq.8-4)$$

• สำหรับท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (compact prover)

ในการสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กโดยให้ตัวกวาดเคลื่อนที่ไประหว่างตัวตรวจจับตัวกวาดทั้ง 2 เพื่อต้องการหาค่าปริมาตรของของเหลวระหว่างตัวตรวจจับตัวกวาดทั้ง 2 ภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็กเมื่อรู้ค่าปริมาตรดังกล่าวเป็นที่แน่นอนแล้วก็ทำการปรับค่าปริมาตรดังกล่าวไปยังสภาวะมาตรฐานหรือสภาวะอ้างอิง ซึ่งถือว่าปริมาตรดังกล่าวเป็น “ปริมาตรมาตรฐาน (Base Volume; BV_{CP}) ที่สภาวะมาตรฐาน” พบว่าตัวท่อทดสอบความจุขนาดเล็กและ invar rod หรือเพลลาที่ต่อเชื่อมกับตัวกวาด (displacer) จะมีการขยายตัวหรือหดตัว

เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ขณะทำการสอบเทียบค่าอุณหภูมิที่ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิทางด้านเข้ากับอุณหภูมิทางด้านออกจากท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (T_{CP}) ส่วน invar rod หรือเพลลาที่ต่อเชื่อมกับตัวกวาด (displacer) มีอุณหภูมิวัดได้เท่ากับ T_d ดังนั้นทำการปรับค่าปริมาตรได้ว่า

$$V_{TCP} = BV_{CP} \times C_{tsCP} \times C_{tsd} \quad (Eq.8-5)$$

แต่เนื่องจากน้ำซึ่งอยู่ภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็กได้รับความดันและมีอุณหภูมิภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็กไม่เท่ากับสภาวะมาตรฐาน ดังนั้นจึงต้องทำการปรับแก้ไขค่าปริมาตรของน้ำจากสภาวะอุณหภูมิการทำงาน; T_{CP} ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กซึ่งมีความหนาแน่นของน้ำ ρ_{TCP} ไปยังปริมาตรของน้ำที่อุณหภูมิมาตรฐานซึ่งความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิมาตรฐานมีค่าเท่ากับ ρ_0

$$V_{0PCP} = \frac{V_{TCP}}{C_{twCP}} = V_{TCP} \times \frac{\rho_{TCP}}{\rho_0} \quad (Eq.8-6)$$

$$\begin{aligned} V_{0PCP} &= BV_{CP} \times \frac{C_{tsCP} \times C_{tsd}}{C_{twCP}} \\ &= BV_{CP} \times C_{tsCP} \times C_{tsd} \frac{\rho_{TCP}}{\rho_0} \end{aligned} \quad (Eq.8-7)$$

จากนั้นทำการปรับค่าปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐานและความดัน P_{CP} ไปยังค่าปริมาตรที่สภาวะมาตรฐาน (T_0, P_{atm}) อันเนื่องจากอิทธิพลของการขยายหรือหดตัวของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กอันเนื่องมาจากความดัน

$$V_{0PCP1} = V_{0PCP} \times C_{psCP} \quad (Eq.8-8)$$

$$V_{0CP} = V_{0PCP1} \times C_{plCP} \quad (Eq.8-9)$$

เพราะฉะนั้นที่สภาวะมาตรฐาน (T_0, P_{atm}) ปริมาตรของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กจะมีค่าเท่ากับ

$$V_{0CP} = BV_{CP} \times \frac{C_{tsCP} \times C_{tsd} \times C_{psCP} \times C_{plCP}}{C_{twCP}} \quad (Eq.8-10)$$

$$V_{0CP} = BV_{CP} \times C_{tsCP} \times C_{tsd} \times C_{psCP} \times C_{plCP} \times \frac{\rho_{TCP}}{\rho_0} \quad (Eq.8-11)$$

แต่เนื่องจากในการสอบเทียบ หลังจากทำการปรับค่าแก้ไขปริมาตรของน้ำที่ไหลผ่านท่อทดสอบความจุขนาดเล็กและปริมาตรภายในถังตวงแบบมาตราไปยังสภาวะมาตรฐาน (T_0, P_{atm}) พบว่า ปริมาตรของน้ำที่ไหลออกจากท่อทดสอบความจุขนาดเล็กไปยังถังตวงแบบมาตราจะมีค่าเท่ากับปริมาตรของน้ำภายในถังตวงแบบมาตราส่วนจะเป็นปริมาตรด้าน Upstream หรือปริมาตรด้าน Downstream พิจารณากันอีกครั้ง ดังนั้น

$$V_{0CP} = V_{0P} \quad (Eq.8-12)$$

$$BV_{CP} \times C_{tsCP} \times C_{tsd} \times C_{psCP} \times C_{plCP} \times \frac{\rho_{TCP}}{\rho_0} = V_{0P} \times C_{tsP} \times \frac{\rho_{TP}}{\rho_0} \quad (Eq.8-13)$$

$$BV_{CP} = \frac{V_{Pr} \times C_{tsP} \times \frac{P_{TP}}{P_0}}{C_{tsCP} \times C_{tsd} \times C_{psCP} \times C_{plCP} \times \frac{P_{TCP}}{P_0}} \quad (Eq.8-14)$$

ดังนั้นค่า ปริมาตรมาตรฐาน (Base Volume) ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กที่สภาวะอ้างอิง (T_0, P_0) หรือสภาวะมาตรฐานมีค่าเท่ากับ

$$BV_{CP} = \frac{V_{Pr} \times C_{tsP} \times \frac{P_{TP}}{P_{TCP}}}{C_{tsCP} \times C_{tsd} \times C_{psCP} \times C_{plCP}} \quad (Eq.8-15)$$

3. ค่าความสามารถทำซ้ำได้ (Repeatability)

การสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กด้วยถังตวงแบบมาตราจะต้องมีค่าความสามารถทำซ้ำได้ไม่เกิน 0.02 % เมื่อถังตวงแบบมาตรามีค่าความแม่นยำสมบูรณ์ (absolute accuracy) ไม่มากกว่า 0.002%

ภายหลังทำการสอบเทียบไม่น้อยกว่า 5 รอบสอบเทียบแล้วให้นำค่าปริมาตรมาตรฐาน (Base Volume) ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กที่สภาวะอ้างอิง (T_0, P_0) หรือสภาวะมาตรฐานมาคำนวณหา

$$\text{Repeatability} = \frac{BV_{CP\max} - BV_{CP\min}}{BV_{CP\min}} \times 100\% \quad (Eq.8-16)$$

ข้อสังเกต การคำนวณค่าความสามารถทำซ้ำได้ สังเกตว่าตัวหารเป็นค่าต่ำสุดจากค่าผลสอบเทียบทั้งหมด

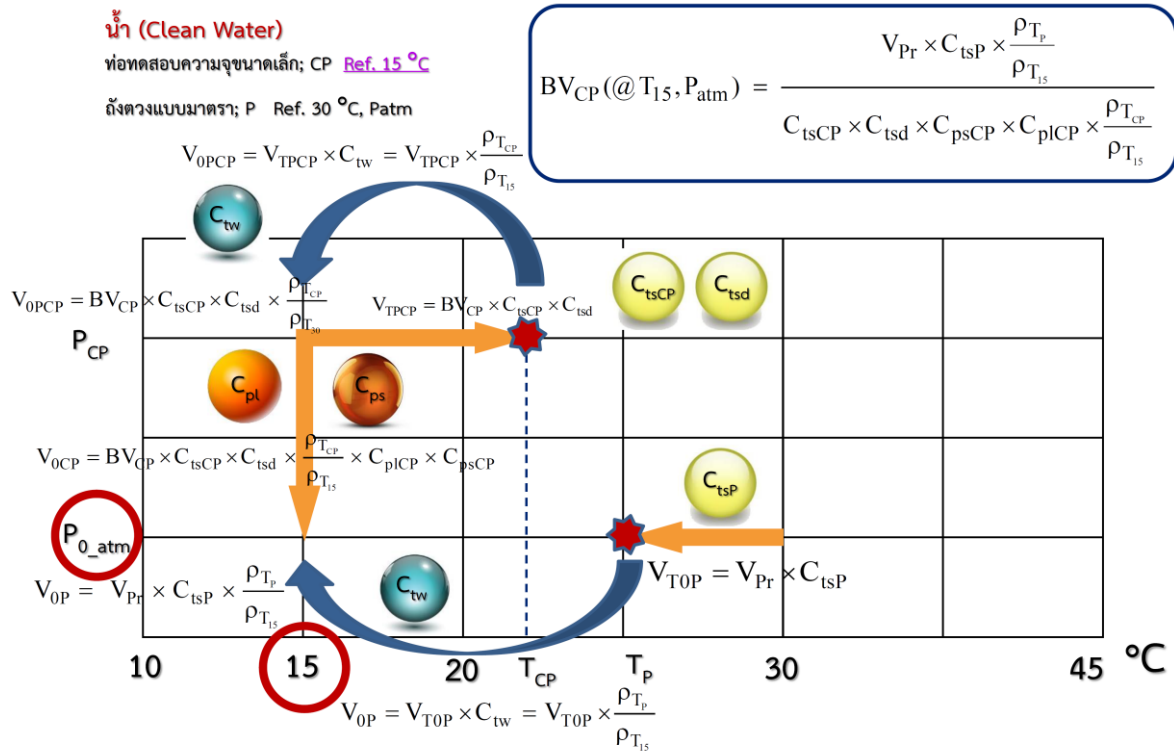
เพื่อให้แน่ใจว่าท่อทดสอบความจุขนาดเล็กแม้ได้ค่า Repeatability น้อยกว่า 0.02% ก็ตามแต่หากมีการรั่วไหลที่สม่ำเสมอผลการทดสอบดังกล่าวก็ไม่สามารถยืนยันได้ ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีกรณีดังกล่าวเกิดขึ้น ให้ทำการสอบเทียบหลังครบ 5 รอบแล้วด้วยการเพิ่มรอบสอบเทียบด้วยอัตราการไหลน้อยกว่าเดิมไม่น้อยกว่า 25% หรือพูดอีกนัยหนึ่งที่อัตราการไหลน้อยกว่า 0.75 เท่าของอัตราการไหลทดสอบ 5 รอบที่ผ่านมา หากผลการสอบเทียบคำนวณได้ปริมาตรมาตรฐาน (Base Volume) ที่สภาวะมาตรฐานแล้วมีค่าแตกต่างมากกว่า $\pm 0.02\%$ เท่าของปริมาตรมาตรฐาน (Base Volume) ที่สภาวะมาตรฐานของอัตราการไหลทดสอบ 5 รอบที่ผ่านมา นั้นแสดงว่ามีความเป็นไปได้สูงว่ามีการรั่วไหลภายในระบบสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กไม่ว่าจะเป็นแบบ unidirectional and bi-directional provers ซึ่งต้องทำการตรวจสอบแก้ไข และสอบเทียบใหม่

4. สำหรับกรณีอุณหภูมิอ้างอิงของถังตวงแบบมาตรา (Tank Prover) ต่างจากอุณหภูมิอ้างอิงของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Compact Prover)

สามารถคำนวณค่าปริมาตรมาตรฐาน (Base Volume) ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กที่สภาวะอ้างอิง (T_0, P_0) หรือสภาวะมาตรฐานมีค่าเท่ากับได้ดังนี้

ความจุขนาดเล็ก $T_{0CP} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm}

(Eq.8-17)



รูปที่ 8-32 การปรับสภาวะขณะวัดไปยังสภาวะอ้างอิง แล้วเทียบปริมาตรที่วัดได้ที่สภาวะอ้างอิงเดียวกัน

ทดสอบความจุขนาดเล็ก $T_{0CP} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm}

$$BV_{CP,30^{\circ}C} = \frac{V_{Pr} \times C_{tsP} \times \frac{\rho_{TP}}{\rho_{TCP}}}{C_{tsCP} \times C_{tsd} \times C_{psCP} \times C_{plCP}}$$

$$= \frac{V_{Pr} \times (1 + \gamma_P \times (T_P - 15)) \times \frac{\rho_{TP}}{\rho_{TCP}}}{(1 + \gamma_{CP} \times (T_{CP} - 30)) \times (1 + \gamma_{sd} \times (T_{sd} - 30)) \times \left(1 - \frac{P_{CP} D}{E t}\right) \times \left(\frac{1}{1 - P_{CP} F}\right)}$$

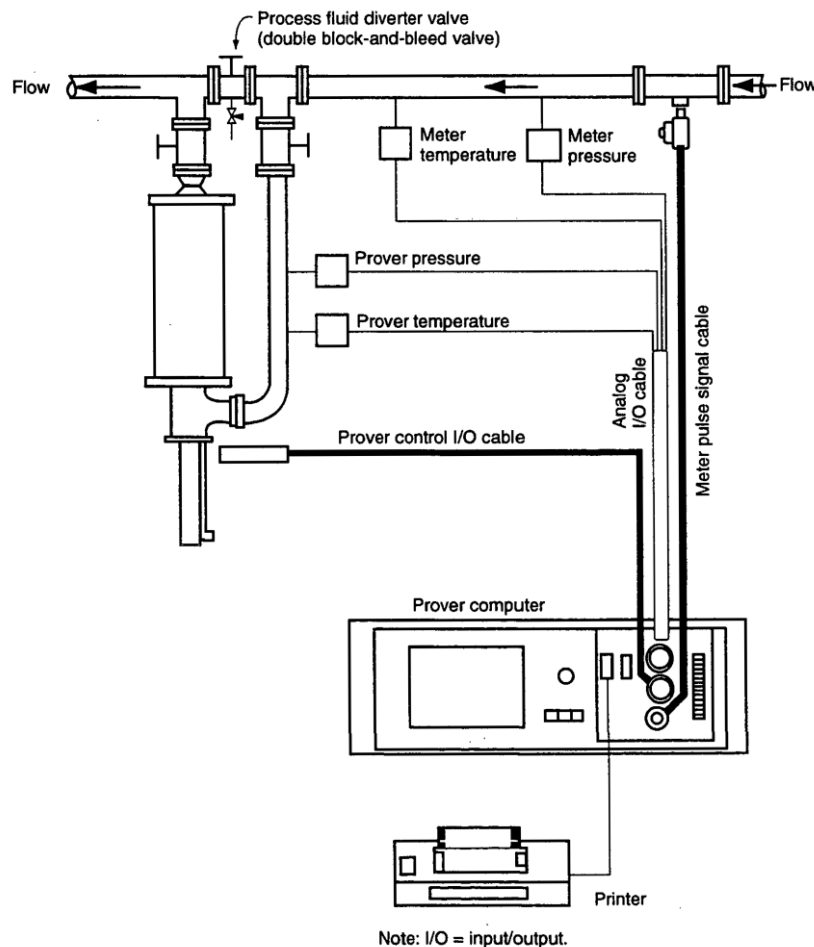
(Eq.8-18)

5. การนำค่า Base Volume ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กไปใช้งาน

เพื่อให้เข้าใจไปในทิศทางเดียวกันในเรื่องการนำค่า Base Volume ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กไปใช้งานในการสอบเทียบมาตรวัดแบบมาตรา เราแบ่งเป็น 2 กรณี

1) กรณีมาตรวัดปริมาตรของเหลว (Flow Meter) ซึ่งติดตั้งก่อน (Upstream) ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก ดังรูปที่ 8-33 (**Normal Condition**)

- ก. หา “BASE VOLUME” ที่สภาวะมาตรฐานด้าน Upstream ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก
- ข. หาผลผิดของมาตรวัดปริมาตรของเหลว ได้จากใช้ค่าปริมาตรที่วัดได้โดยมาตรวัดปริมาตรของเหลวเทียบกับ Upstream Base Volume ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก จากคำพูดนี้สามารถใช้เป็นหลักการสอบเทียบได้ตลอดถึงตำแหน่งการจัดวางมาตรวัดปริมาตรของเหลวและแบบมาตรา เพราะโดยหลักการแล้วแบบมาตราต้องอยู่ทางด้าน Downstream ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวเสมอ



รูปที่ 8-33 องค์ประกอบระบบคำนวณผลสอบเทียบมาตรวัดเทียบกับท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

- ค. อธิบายได้ว่าของเหลวที่ผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวจะไหลเข้าท่อทดสอบความจุขนาดเล็กทางด้าน Upstream ดังนั้นเราจึงใช้ Upstream Base Volume ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก
- 2) กรณีมาตรวัดปริมาตรของเหลว (Flow Meter) ซึ่งติดตั้งหลัง (Downstream) ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก ซึ่งไม่ใช่แนวปฏิบัติของงานชั่งตวงวัดในเชิงกฎหมาย (Legal Metrology) แต่พอรับได้
- ก. หา “BASE VOLUME” ที่สภาวะมาตรฐานด้าน Downstream ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก
- ข. หาผลผลิตของมาตรวัดปริมาตรของเหลว ได้จากใช้ค่าปริมาตรที่วัดได้โดยมาตรวัดปริมาตรของเหลวเทียบกับ Downstream Base Volume ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก
- ค. อธิบายได้ว่า ของเหลวที่ไหลออกจากท่อทดสอบความจุขนาดเล็กเป็น Downstream Base Volume แล้วผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวจะไหลเข้าท่อทดสอบความจุขนาดเล็กทางด้าน Upstream ดังนั้นเราจึงใช้ Upstream Base Volume ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

การป้อนค่า (Configuration) ใน FlowCom / Display Unit

จากที่ผ่านมาการสอบเทียบจำกัดอยู่แต่เพียงหาค่า Base Volume ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก แต่ต่อไปนี้ ชั่งตวงวัดต้องเข้าใจพื้นฐานของการยอมให้ใช้ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กเป็นแบบมาตรา นั้นหมายถึงท่อทดสอบความจุขนาดเล็กถือเป็นเครื่องชั่งตวงวัดชนิดหนึ่งและต้องมีคุณสมบัติความเป็นเครื่องชั่งตวงวัดตามที่ระบุไว้ในกฎกระทรวงฯ หรือพูดในทางเทคนิคง่ายๆว่า การรู้ปริมาตรระหว่าง Displacer Detectors 2 ตัวจะมีความหมายใดๆ เลยในการนำไปใช้งาน



รูปที่ 8-34 ส่วนประมวลผล (Flow Computer; Omni 6000) ที่รับสัญญาณจาก CPP และส่วนประมวลผลประจำ CPP



รูปที่ 8-35 CPP พร้อมส่วนควบคุม ส่วนประมวลผลและส่วนแสดงค่า

ด้วยเหตุนี้เพื่อความครบถ้วนในการปฏิบัติงาน เราจึงต้องทำการรายงานผลการหาค่า Base Volume ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กพร้อมกับส่วนแสดงค่าที่ใช้ประจำท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก รวมทั้งทำการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ฯ ทุกค่าที่มีผลต่อการประมวลผลค่า Base Volume ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กและการนำไปใช้เทียบกับมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่นำมาตรวจสอบให้คำรับรองหรือสอบเทียบนั้นๆ ซึ่งต้องพิจารณา

1. ในเทอมของอุณหภูมิ
 - 1.1. อุณหภูมิอ้างอิง หน่วยวัด °C หรือ °F
 - 1.2. อุณหภูมิภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก หน่วยวัด °C หรือ °F
 - 1.3. สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนตามบาศก์ (Coefficient of cubical expansion per °C) ของโลหะที่ใช้ทำท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก หน่วยวัด /°C หรือ /°F
 - 1.4. สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเชิงเส้น (Linear Coefficient of Expansion per °C) ของ Invar Rod หน่วยวัด /°C หรือ /°F
2. ในเทอมของความดัน
 - 2.1. ความดันอ้างอิง หน่วยวัด kPag, kg/m², bar หรือ psig
 - 2.2. ความดันภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก หน่วยวัด kPag, kg/m², bar หรือ psig
 - 2.3. เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (internal diameter) ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก หน่วยวัด cm. หรือ inch
 - 2.4. Modulus of Elasticity for Container Material หน่วยวัด kPag, kg/m², bar หรือ psig
 - 2.5. ความหนาของผนัง (wall thickness of container) หน่วยวัด cm. หรือ inch
 - 2.6. Compressibility Factor for Liquid หน่วยวัด /kPag หรือ /Psig
3. ในเทอมของของเหลวตัวกลางสอบเทียบ
 - 3.1. หน่วยค่าความหนาแน่น หน่วยวัด kg/m³ หรือ g/cm³
 - 3.2. หน่วยปริมาตรของเหลว หน่วยวัด ลิตร

$$C_{ts} = 1 + \gamma(T - T_0) \quad \text{Dimensionless}$$

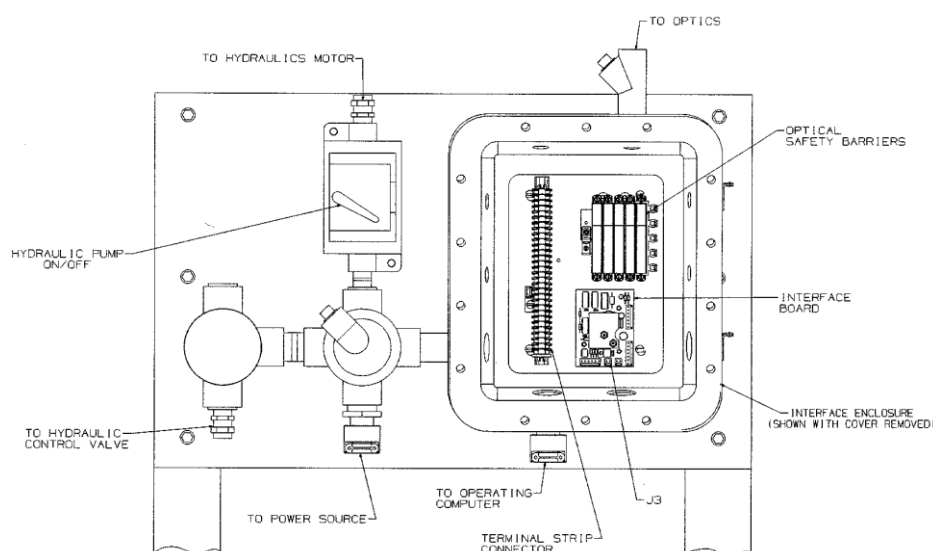
T	°C	°F
γ ; Coefficient of cubical expansion per °C	/°C	/°F
Carbon steel	0.0000223	0.0000124
17-4 Stainless steel	0.0000216	0.0000120
Cast 304 Stainless Steel	0.0000319	0.0000177
304 Stainless Steel	0.0000346	0.0000192
32205 Duplex	0.0000274	0.0000152
Linear Coefficient of Expansion per °C) ของ Invar Rod	0.00000144	0.0000008

ตารางที่ 8-5 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

$$C_{ps} = 1 + \frac{P \times D}{E \times t} \quad \text{Dimensionless}$$

P	kPa	Bar	psi
D	cm	cm	Inch
t	cm	cm	inch
E; Modulus of Elasticity for material flow tube	kPa	Bar	psi
Carbon steel	206,842,710	2,068,427.10	30,000,000
Stainless steel	196,500,574.5	1,965,005.745	28,500,000
32205 Duplex Stainless steel	200,000,000	2,000,000.00	

ตารางที่ 8-6 ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุและหน่วยของมิติของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก



รูปที่ 8-36 Control Panel ของ CPP ซึ่งต้องต่อเชื่อมกับส่วนประมวลผล (to operating computer) ต้องได้รับการลวดลวดผูกตะกั่วซีลด้วยเช่นเดียวกับ Junction Box ของเครื่องซึ่ง

การเรียกดูใบรายงานผลการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิและเครื่องวัดความดัน

จากรูปที่ 8-33 เราจะเห็นได้ว่าการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวโดยใช้ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Compact Prover) เป็นแบบมาตราซึ่งมีส่วนประมวลผลและส่วนแสดงค่าในรูปของ Prover computer (เช่น OMNI 6000 เป็นต้น) ในการทำงานของส่วนดังกล่าวนี้จะทำการดึงสัญญาณจากมาตรวัดปริมาตรของเหลว, ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก ตลอดจนเครื่องวัดอุณหภูมิและเครื่องวัดความดันประจำมาตรวัดปริมาตรของเหลวและท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก ในปัจจุบันส่วนใหญ่พบว่าสัญญาณจากเครื่องวัดอุณหภูมิและเครื่องวัดความดันมักอยู่ในรูปสัญญาณมาตรฐานแบบ analog เป็นค่ากระแสไฟฟ้า mA หรือแรงดันเป็น mV สุดแล้วแต่ ดังนั้นในการสอบเทียบตามรูปที่ 8-33 นอกจากเรียกหาใบรายงานผลสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็กแล้ว ยังต้องเรียกหาใบรายงานผลการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิและเครื่องวัดความดันที่เกี่ยวข้องด้วย

Omni 3000: 20.75.00 (F7E7) - Metering to PTT

General Setup

Setup

ID: 34069
 Location: Metering Station
 Company Name:
 Date Format: DD/MM/YY

Daylight Savings
 Start Date:
 End Date:

Equipment List

Meter Runs
 Meter Run: 1 2 3 4
 Temperature: Y Y N N
 Pressure: Y Y N N
 Density/Gravity: N N N N
 Temperature: N N N N
 Pressure: N N N N

Station

Station: N
 Density/Gravity: N
 Temperature: N
 Pressure: N

Prover

Prover: Y
 Inlet Temperature: Y
 Outlet Temperature: N
 Inlet Pressure: Y
 Outlet Pressure: N
 Plenum Pressure: N
 Density/Gravity: N
 Temperature: N
 Pressure: N

Prover

Configuration and Setup

Prover Type: Unidirectional Pipe Compact
 Prover Characteristics
 Prover Internal Diameter: 17.5 inches
 Prover Wall Thickness: 1.25 inches
 Modulus of Elasticity: 2.850000e+007
 Thermal Expansion: 0.0000120
 Linear Coefficient: 0.0000008
 Prover Volume/Mass
 Base Pressure: 0.0 PSIG
 Base Temperature: 59.0 degF
 Volume/Mass Upstream: 119.437 BBLs or KLBS
 Volume/Mass Downstream: 120.256 BBLs or KLBS
 Overtravel: 700.0 BBLs or KLBS

Operational Setup

Number of runs to average: 3
 Maximum number of runs: 10
 Number of passes per run: 5
 Inactivity Timer: 100 sec
 Run Repeatability
 Based On: Counts
 Maximum Deviation: 0.05 %
 Stability Sample Time: 5 sec
 Sample Temperature Change: 100.0 degF
 Sample Flow Rate Change: 10000.0 BBLs/hr
 Max Temperature Deviation: 5.0 degF
 Auto implement meter factor: N
 Retroactive Meter Factor: N
 Meter Factor Acceptability: 0.1 %
 Archive all reports: N

Auto Prove Setup

Startup Meter Down Time: 0 hours
 Startup Flow Amount: 0.0 BBLs
 Flow Rate Change Threshold: 20.0 %
 Minimum Flow Rate Change: 10000.0 BBLs/hr
 Flow Stable Period: 0 hours
 Maximum Flow between Proves: 2000.0 BBLs

รูปที่ 8-37 ตัวอย่างผลของการ Configuration ใน Flow Computer OMNI3000

ตัวอย่าง การสอบเทียบท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Compact Prover) โดยใช้ถังตวงแบบมาตรา

ข้อมูลของถังตวงแบบมาตรา

หมายเลข	631-37
ขนาดความจุ	20 ลิตร
วัสดุ	Stainless Steel
อุณหภูมิอ้างอิง	15 °C
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	0.0000477 /°C

ข้อมูลท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

หมายเลข	630-37
ขนาดความจุ	20 ลิตร
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน D	8.25 นิ้ว
ความหนา t	0.6875 นิ้ว
วัสดุ	17-4 PHS
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	0.0000216
Modulus of Elasticity for Stainless Steel	2.8×10^7 Psig
Invar rod ของ ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก	
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	0.00000144 /°C

สารตัวกลาง

เป็นน้ำสะอาด	
Compressibility factor for water	3.2×10^{-6} Psig

วิธีคำนวณ

คำนวณหาปริมาตรของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กที่สภาวะอ้างอิงจากสมการ

$$BV_{CP} = \frac{V_{Pr} \times C_{tsP} \times \frac{P_{TP}}{P_{TCP}}}{C_{tsCP} \times C_{tsd} \times C_{psCP} \times C_{plCP}}$$

รอบที่ 1

ค่าที่อ่านได้จาก ถังตวงแบบมาตรา V_{pr} =	19.9991	ลิตร
อุณหภูมิอ้างอิงของถังตวงแบบมาตรา	15	°C

หาค่า C_{tsP}

เมื่อวัดอุณหภูมิของถังตวงได้ 31.2 °C (หากเครื่องวัดอุณหภูมิซึ่งได้รับการสอบเทียบจากหน่วยงานของรัฐ จำเป็นต้องปรับค่า ก็ต้องปรับค่าเสียก่อน)

$$C_{tsP} = 1 + 0.0000477 (T - 15)$$

$$C_{tsP} = 1 + 0.0000477 (31.2 - 15) \\ = 1.000773$$

หาค่า C_{tw}

อุณหภูมิน้ำที่ถึงดวงแบบมาตรวัดได้	31.2	°C	$\rho_{TP} =$	995.276	Kg/m ³
อุณหภูมิน้ำที่ท่อสอบเทียบขนาดเล็ก	31.3	°C	$\rho_{TP} =$	995.245	Kg/m ³

$$C_{tw} = \frac{\rho_{TP}}{\rho_{TCP}} \\ = \frac{995.276}{995.554} \\ = 1.000031$$

หาค่า C_{tsCP}

ค่าการขยายตัวตามบาศก์ของวัสดุที่ใช้ทำ ท่อสอบเทียบขนาดเล็ก	0.0000216 /°C
---	---------------

$$C_{tsCP} = 1 + \gamma(T_{CP} - 15) \\ C_{tsCP} = 1 + 0.0000216(31.3 - 15) \\ = 1.000352$$

หาค่า C_{tsd}

เมื่อวัดอุณหภูมิที่วัดได้ที่ invar rod	32.38	°C
ค่าการขยายตัวของ invar rod	0.00000144	/°C

$$C_{td} = 1 + 0.00000144(32.38 - 15) \\ = 1.000025$$

หาค่า C_{psCP}

เมื่อความดันภายในท่อสอบเทียบขนาดเล็ก, P	70	Psig
เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน, D	8.25	นิ้ว
ท่อสอบเทียบขนาดเล็กมีความหนา	0.6875	นิ้ว
ค่า Modulus of Elasticity for stainless steel	2.8×10^7	Psig

$$C_{psCP} = 1 + \frac{PD}{Et} \\ = 1 + \frac{70 \times 8.25}{2 \times 10^8 \times 0.6875} \\ = 1.00003$$

หาค่า C_{plCP}

$$C_{plCP} = \frac{1}{(1 - PF)} \\ = \frac{1}{(1 - 70 \times 3.2 \times 10^{-6})} \\ = 1.000224$$

แทนค่าที่ได้ทั้งหมดลงในสมการหาค่าปริมาตรที่สภาวะอ้างอิงของท่อสอบเทียบขนาดเล็ก

$$\begin{aligned}
 BV_{CP} &= \frac{V_{Pr} \times C_{tsP} \times \frac{P_{TP}}{P_{TCP}}}{C_{tsCP} \times C_{tsd} \times C_{psCP} \times C_{plCP}} \\
 &= \frac{19.9991 \times 1.000773 \times 1.000031}{1.000352 \times 1.000025 \times 1.000030 \times 1.000224} \\
 &= \frac{19.9991 \times 1.000804}{1.000631} \\
 &= 19.9991 \times 1.000173 \\
 &= 20.003
 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่า BV_{CP} ที่สภาวะอ้างอิง (T_0, P_0) ของการสอบเทียบ **รอบที่ 1** มีค่าเป็น **20.00 ลิตร**

และ

การสอบเทียบ รอบที่ 2 ได้เท่ากับ	20.003 ลิตร
การสอบเทียบ รอบที่ 3 ได้เท่ากับ	20.003 ลิตร
การสอบเทียบ รอบที่ 4 ได้เท่ากับ	20.004 ลิตร
การสอบเทียบ รอบที่ 5 ได้เท่ากับ	20.004 ลิตร

ค่าปริมาตรเฉลี่ยซึ่งจะถือว่าเป็นค่าปริมาตรจริงที่สภาวะอ้างอิงของท่อสอบเทียบขนาดเล็กคือ **20.003** ลิตร

และมีค่า Repeatability = **0.005** %

การสอบเทียบหาค่า Base Volume ของท่อสอบเทียบขนาดเล็กต้องมีค่าความแม่นยำ (Repeatability) ไม่เกิน 0.02 % (รายงานการสอบเทียบอยู่หน้าถัดไป)

ANS

Compact Prover - Tank Prover

ตารางผลการตรวจสอบค่า Base Volume ของ Compact Prover / Small Volume Prover ด้วยถังตวงแบบมาตรา (Tank Prover)															
สำนักงานกลางมาตราชั่งตวงวัด กองชั่งตวงวัด															
วันที่ทำการตรวจสอบ		ผู้ขอรับการตรวจสอบ บริษัท COMPACT PROVER & TANK PROVER จำกัด													
ถึงตวงหมายเลข		631-37		Compact Prover หมายเลข		630-37		Model.		8-600-SCJBC		Serial no.		9403-35598-1-1	
ขนาดความจุ		20 ลิตร		TYPE & SIZE		unidirection & 6		Direction Calibration		Downstream					
อุณหภูมิอ้างอิง (T0)		15 ชั.		เส้นผ่านศูนย์กลางของ Flow tube(นิ้ว);D		8.2500 นิ้ว		อัตราการไหลที่ใช้สอบเทียบ		600 ลิตร/นาที					
วัสดุ		Stainless Steel		ความหนาของ Flow tube(นิ้ว); t		0.6875 นิ้ว		วัสดุ Flow tube		17-4 PHSS					
ส.ป.ส.การขยายตัวความตื้นที่;จ.		0.0000477 /จ.		ส.ป.ส.การขยายตัวความตื้นที่;จ.(Flow Tube)		0.0000216 /จ.		Modulus Of Elasticity (Psi); Flow Tube		28,000,000					
ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ตรวจสอบ		น้ำ		ส.ป.ส.การขยายตัวความตื้น;จ.(Invar Rod)		0.00000144 /จ.		F = Compressibility factor for water (Psi)		0.0000032					
ครั้งที่	ปริมาตรที่อ่านได้	อุณหภูมิ	CtsM	ความดัน	Cplep	Cpsep	DtM/Dtsep	Ctsep	อุณหภูมิ	Td	Ctsd	Base Volume of CPP.			
(1)			(4)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	@ 15 ชั., 0Psig			
1	19.9991	31.2	1.000773	70	1.000224	1.00003	1.000031	1.000352	32.38	1.000025	20.003	(2)[(4)(9)+(7)(8)(10)(12)]**			
2	19.9991	31.2	1.000773	70	1.000224	1.00003	1.000031	1.000352	32.38	1.000025	20.003				
3	20.0000	31.2	1.000773	70	1.000224	1.00003	1.000031	1.000352	31.89	1.000024	20.003				
4	20.0000	31.2	1.000773	70	1.000224	1.00003	1.000031	1.000352	31.29	1.000023	20.004				
5	20.0000	31.2	1.000773	70	1.000224	1.00003	1.000031	1.000352	31.29	1.000023	20.004				
Repeatability		0.005 %		Downstream		Volume between optical switch 1 and 2 at		@ 15 ชั., 0 Psi		20.003					

นายชั่งตวงวัด กองชั่งตวงวัด
ผู้ตรวจสอบ

บทที่ 9

การสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง มาตรวัดปริมาตรของเหลว (Calibration and/or Verification of Flowmeter)

การสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ในการซื้อขาย แลกเปลี่ยน หรือคิดค่าตอบแทน คำภาษี คำอากร ไม่ว่าใช้ด้วยวัตถุประสงค์ซื้อขายทั้งในรูปของสินค้าหรือบริการ ถือเป็นการดำเนินการเพื่อหาสมรรถนะของมาตรวัดปริมาตรของเหลว (flowmeter performance) นั้นๆ ว่ายังคงมีสมรรถนะตามที่ได้รับการออกแบบยังคงเป็นไปตามพระราชบัญญัติมาตราซึ่งดวงวัด พ.ศ. 2542 หรือไม่ ซึ่งมีวิธีการเปรียบเทียบผลการวัดโดยมาตรวัดปริมาตรของเหลวเทียบกับแบบมาตราภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ชัดเจน ซึ่งแบบมาตราอาจมีหลากหลายประเภท ตลอดจนชั้นความเที่ยง ความน่าเชื่อถือ ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานและความเสถียรเร็วในการดำเนินการ รวมทั้งปัจจัยอื่นๆ เป็นต้น รวมทั้งข้อจำกัดแต่ละวิธีการด้วยเหตุผลความจำเป็นเป็นรายกรณีไป

ในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ในการซื้อขาย (หรือมาตรวัดซื้อขายทั่วไป) ควรกระทำภายใต้สภาวะเงื่อนไขการทำงานเหมือนกับสภาวะเงื่อนไขการทำงานจริงๆ นั้น หมายถึงต้องทำการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองด้วยของเหลวตัวกลางซึ่งปกติใช้มาตรวัดซื้อขายดังกล่าวทำการวัดปริมาตรที่อัตราการไหลส่งจ่าย รวมทั้งความดันและอุณหภูมิโดยปกติที่มาตรวัดซื้อขายทำงานจริงๆ แต่ต้องยอมรับด้วยว่าในทางปฏิบัติงานจริงในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวเป็นการวัดแบบไดนามิกส์ซึ่งได้รับผลกระทบจากปัจจัยมากมายที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น อุณหภูมิ ความดันและความหนืดของเหลว, รูปแบบการไหล (flow profile), อัตราการไหลที่ไม่ราบเรียบ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยจากสภาวะแวดล้อม เช่น ความสั่นสะเทือน ความเค้นความเครียดจากระบบท่อหรือโครงสร้างรองรับระบบท่อที่เกี่ยวข้อง และอื่นๆ ซึ่งในแต่ละปัจจัยล้วนมีผลต่อมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่แตกต่างกันตามแต่ละลักษณะหรือหลักการทำงานของมาตรวัดนั้นๆ

ผลการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ชัดเจน (specific conditions) จากที่กล่าวมาแล้วว่าการสอบเทียบ และ/หรือ การตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวเป็นวิธีการเปรียบเทียบผลการวัดโดยมาตรวัดปริมาตรของเหลวเทียบกับแบบมาตราภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ชัดเจน (specific conditions) ดังนั้นการเลือกใช้แบบมาตราหรือระบบแบบมาตราต้องเป็นแบบมาตราหรือระบบแบบมาตราที่มีสภาวะเงื่อนไขคงที่มากที่สุดขณะทำการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองซ้ำแล้วซ้ำเล่า อีกทั้งต้องทำงานสอดคล้องและสอดคล้องกับสมรรถนะและลักษณะธรรมชาติการทำงานของมาตรวัดปริมาตรของเหลวนั้นๆ

เวลาการตอบสนองต่อการวัด (response time) ของมาตรวัดปริมาตรของเหลว ความสัมพันธ์ในการวัดอัตราการไหลหรือปริมาตรที่วัดไว้เทียบกับระยะเวลาเป็นอีกเรื่องหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งเพราะมีผลและ

ผูกพันต่อเนื่องกับระหว่างเวลาการตอบสนองต่อการวัด (response time) ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวต่อวิธีการสอบเทียบ และ/หรือตรวจสอบให้คำรับรอง (calibration and/or verification method) สำหรับเวลาการตอบสนองต่อการวัดของมาตรวัดปริมาตรของเหลวพออธิบายได้ง่ายในมาตรวัดที่มีส่วนวัดและส่วนแสดงค่าแบบ “กลไก” ในเทอมของโมเมนต์ แรงเสียดทาน อิทธิพลในการหน่วงหรือถ่วงของกลไกเนื่องจากการไหลของเหลว (drag affecting) เมื่ออัตราการไหลเปลี่ยน แต่หากเป็นมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่มีหลักการทำงานแบบ “อิเล็กทรอนิกส์” โดยการนับสัญญาณพัลส์จะเป็นเรื่องยากในการแยกแยะปัญหาเวลาการตอบสนองต่อการวัดค่อนข้างลำบาก ยกตัวอย่างเช่นมาตรวัด PD แบบกลไกทำงานภายใต้สภาวะปรกติเมื่อของเหลวไหลผ่านส่วนวัดปริมาตรก็หมุนตาม เมื่อการไหลหยุดส่วนวัดก็หยุดตามส่วนบันทึกผลหรือส่วนแสดงค่าก็จะหยุดตามเช่นกัน แต่หากเป็นมาตรวัด PD ซึ่งใช้ pulse generator เมื่อมีการไหลของเหลวผ่านมาตรวัดหยุดลงตัวกำเนิดสัญญาณพัลส์หยุด แต่ตัวนับสัญญาณ (counter) จะไม่หยุดอย่างชัดเจนจนกว่าครบรอบของรอบการนับหรือหลังจากการไหลหยุดไปแล้ว 1-2 วินาที ซึ่งในช่วงระยะเวลาดังกล่าวสัญญาณยังคงถูกนับต่อไปและสะสมสัญญาณเป็นผลการแสดงค่าปริมาตรต่อมา แม้จะสำหรับมาตรวัด PD แบบกลไกที่เริ่มช้ารุดเมื่อการไหลของเหลวผ่านมาตรวัดหยุดส่วนแสดงค่าอาจหมุนต่อไปอีกเล็กน้อยเช่นกัน

จากตัวอย่างดังกล่าวมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่มีหลักการทำงานที่แตกต่างกันย่อมมีเวลาการตอบสนองต่อการวัด (response time) แตกต่างกันไปด้วยเช่นกัน ในกรณีมาตรวัดเทอร์ไบน์ในส่วนของ turbine rotor จะตอบสนองต่อการไหลของเหลวในการหมุนเร็วหรือหมุนช้าได้ดีกว่า turbine rotor ที่ใช้ในการวัดการไหลของก๊าซหรือมาตรวัดชนิด electromagnetic flowmeter ซึ่งจะต้องใช้ระยะเวลาหนึ่งในการวัดแรงดันไฟฟ้า (voltage) ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยนอัตราการไหล เป็นต้น

ดังนั้นการเลือกวิธีการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง (calibration and/or verification method) จึงต้องคำนึงถึงความสอดคล้องกับเวลาการตอบสนองต่อการวัด (response time) ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวชนิดนั้นๆ ด้วย หากไม่เหมาะสมกันแล้วจะสะท้อนออกมาในรูปแบบของผลสอบเทียบที่ไม่น่าพอใจ เช่น ความสามารถในการทำซ้ำมีค่าสูง เป็นต้น

Resolution ของมาตรวัดปริมาตรของเหลว เรื่องต่อมาที่จะพูดถึงคือ Resolution หรือค่าความละเอียดต่ำสุดที่มาตรวัดปริมาตรของเหลวสามารถแสดงค่าเปลี่ยนแปลงได้ พบว่า resolution มีผลต่อความสามารถในการทำซ้ำได้และความไม่แน่นอนของการวัดได้ของมาตรวัดนั้นๆ และยังสะท้อนไปยังแบบมาตราต่องมีขีดความสามารถในการวัดให้เพียงพอต่อค่า resolution ของมาตรวัด

คุณสมบัติของเหลวตัวกลางสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง มาตรวัดปริมาตรของเหลวแต่ละชนิดจะได้รับอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเหลวตัวกลางในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองแตกต่างกันขึ้นอยู่กับหลักการทำงานของมาตรวัดปริมาตรของเหลวชนิดนั้นๆ เช่น มาตรวัดเทอร์ไบน์จะได้รับผลกระทบต่อค่าความหนืดของเหลวที่รุนแรงมากกว่ามาตรวัด PD แต่มาตรวัดชนิด orifice plates มีสมรรถนะของมาตรวัดขึ้นอยู่กับค่า Reynolds number จึงใช้ของเหลวตัวกลางที่แตกต่างจากของเหลวตัวกลางที่ใช้วัดจริงได้ แต่ที่แน่นอนคือมาตรวัดที่ใช้ในการซื้อขายผลิตภัณฑ์น้ำมันทั้งหมดในปัจจุบันขึ้นอยู่กับชนิดของเหลวตัวกลางสอบเทียบ ดังนั้นต้องสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดด้วยของเหลวที่ใช้งานจริง

รูปแบบการไหล (Flow profile) รูปแบบการไหลของเหลวภายในท่อจะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ความเรียบขรุขระ (roughness), คุณสมบัติของเหลวและความเร็วของเหลวในรูปแบบของ

Reynolds number ในการสอบเทียบในห้องปฏิบัติการจำเป็นต้องเตรียมระบบท่อทางเข้ามาตรวัดที่ต้องการสอบเทียบให้เป็นเส้นตรงมากที่สุดเท่าที่ทำได้ อีกทั้งขนาดท่อควรเป็นขนาดเดียวกับมาตรวัด แม้จะต้องพิจารณามาตรวัดแต่ละหลักการทำงานเป็นรายๆไปด้วยเช่นกัน

Traceability, Accuracy และ Uncertainty ในปัจจุบันการเรียนรู้และการศึกษาตลอดจนการถ่ายทอดความรู้มีโอกาสมากขึ้น การยอมรับและความน่าเชื่อถือในแบบมาตราไม่สามารถกระทำด้วยเพียงการกล่าวอ้างหรือบังคับให้เชื่อถือ ดังนั้นการจะให้แบบมาตราน่าเชื่อถือและยอมรับจำเป็นต้องสามารถสืบหาค้นหาที่ไปที่มาของแบบมาตราได้ ด้วยเหตุนี้สำนักงานกลางชั่งตวงวัดต้องรักษาแบบมาตราและสามารถสอบย้อนกลับไปยังแบบมาตราของประเทศได้ด้วยเช่นกัน

สำหรับค่าความไม่แน่นอนของแบบมาตราควรมีค่าความไม่แน่นอนน้อยกว่า 10 เท่าของค่าความไม่แน่นอนของมาตรวัดที่ต้องการสอบเทียบ (พอเป็นแนวทางนะครับ) ทั้งนี้อาจยืดหยุ่นได้ แต่ที่แน่ๆ แบบมาตราต้องมีอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดน้อยกว่า 1 ใน 3 เท่าของอัตราเผื่อเหลือเผื่อขาดของมาตรวัดปริมาตรของเหลว

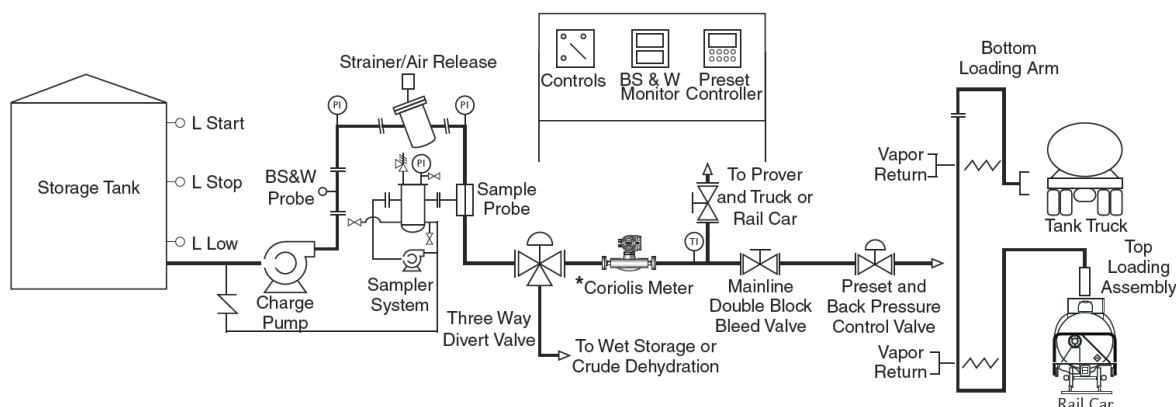
มาตรวัดปริมาตรของเหลวในระบบการส่งจ่าย

ระบบการวัดปริมาตรของเหลว หมายความว่า ระบบที่ประกอบด้วยมาตรวัดปริมาตรของเหลว อุปกรณ์ควบคุม และอุปกรณ์เสริมเพื่อให้มาตรวัดปริมาตรของเหลวในระบบการวัดปริมาตรของเหลวทำงานอยู่บนพื้นฐานเดียวกันและมีมาตรฐานการติดตั้งเดียวกัน

อุปกรณ์ควบคุม หมายความว่า อุปกรณ์ใช้งานพิเศษเฉพาะที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับผลของการวัด เช่น ส่วนตั้งศูนย์, ส่วนพิมพ์ค่า ส่วนแสดงราคา ส่วนแสดงผลรวม ส่วนแปลงค่า หรือ ส่วนตั้งปริมาณจ่ายล่วงหน้า

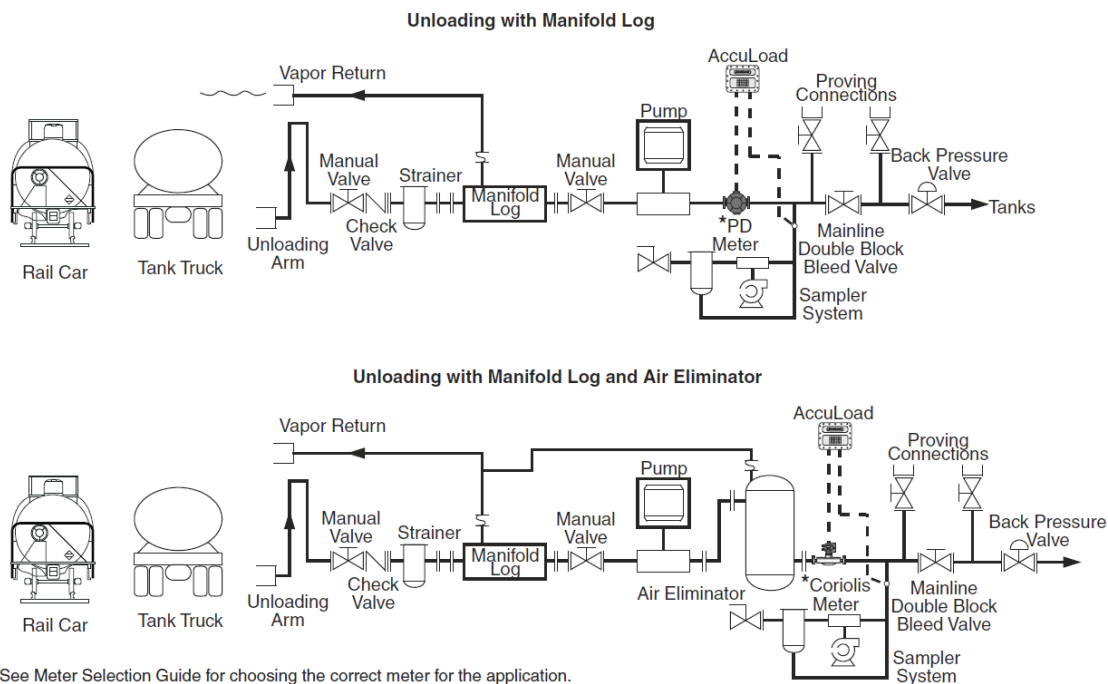
อุปกรณ์เสริม หมายความว่า ส่วนหรืออุปกรณ์ที่นอกเหนือจากอุปกรณ์ควบคุมที่จำเป็นต้องใช้เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นในผลการวัดอย่างถูกต้อง หรือมุ่งใช้เพื่อช่วยให้การดำเนินการในการวัดสะดวกยิ่งขึ้น หรือเป็นอุปกรณ์ที่มีผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัด เช่น เครื่องกำจัดไอ/อากาศ, ไล์กรอง, ปัม, วาล์ว หรือระบบท่อ เป็นต้น

องค์ประกอบภายในระบบท่อของระบบมาตรวัดปริมาตรของเหลวสำหรับจ่ายน้ำมันทางรถยนต์ (รูปที่ 9-1 และ รูปที่ 9-2) และระบบมาตรวัดปริมาตรของเหลวสำหรับจ่ายน้ำมันเครื่องบิน (รูปที่ 9-3, รูปที่ 9-4) ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการตรวจสอบอุปกรณ์ควบคุมและอุปกรณ์เสริม แต่อย่าสับสนว่าทำไมไม่กล่าวถึง ส่วนแสดงค่า ส่วนประมวลผล ส่วนบันทึกผลเพราะในส่วนนี้เราพูดถึงเฉพาะองค์ประกอบระบบท่อนั่นเอง



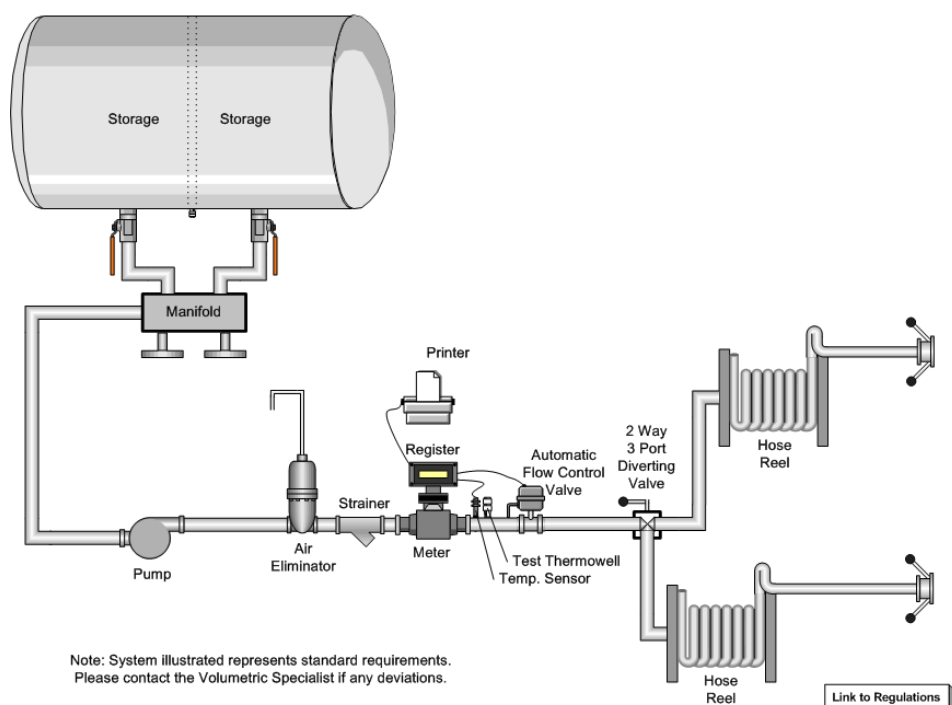
*See Meter Selection Guide for choosing the correct meter for the application.

รูปที่ 9-1 ระบบมาตรวัดปริมาตรของเหลวสำหรับ “จ่าย” น้ำมันทางรถยนต์และทางรถไฟเข้าถังเก็บสำรอง



รูปที่ 9-2 ระบบมาตรวัดปริมาตรของเหลวสำหรับ “รับ” น้ำมันทางรถยนต์และทางรถไฟเข้าถังเก็บสำรอง

Aircraft Fuelling – Truck Mounted

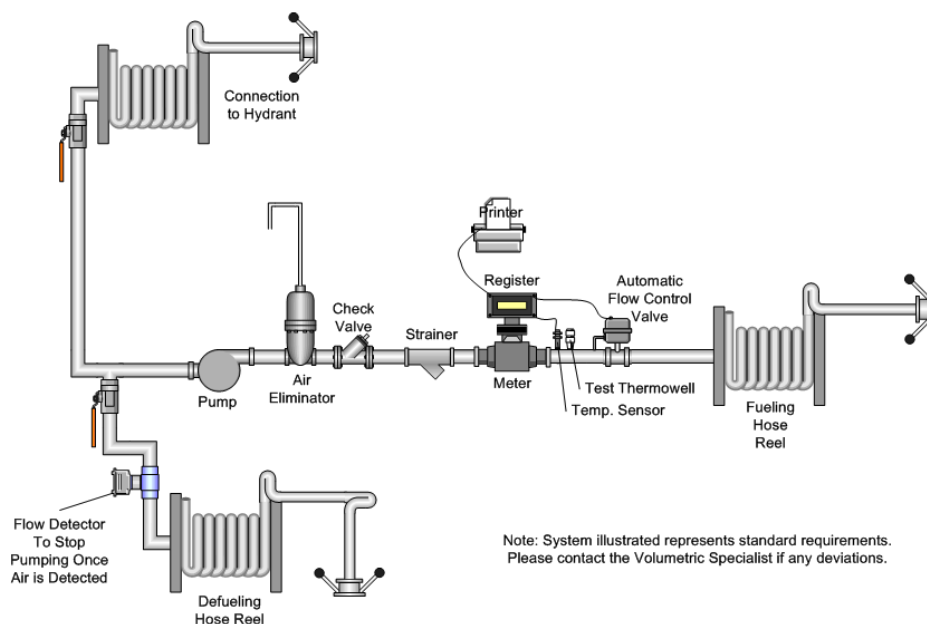


รูปที่ 9-3 ระบบมาตรวัดปริมาตรของเหลวสำหรับ “จ่าย” น้ำมันเครื่องบินจากถังสำรองน้ำมันประจำรถยนต์

วิธีการสอบเทียบ (Calibration Method for Liquids)

ในที่นี้เราจำกัดขอบเขตไว้ในเบื้องต้น ให้เป็นการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวโดยใช้ของเหลวสถานะเดียว (single phases) การที่เราจะสามารถระบุวิธีการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวชนิดใดว่าเหมาะสม น่าเชื่อถือหรือไม่ เราต้องพิจารณาดังนี้

Aircraft Fuelling and Defuelling - Truck Mounted Using a Hydrant



รูปที่ 9-4 ระบบมาตรวัดปริมาตรของเหลวสำหรับ “จ่าย” น้ำมันเครื่องบินจากระบบท่อส่งจ่ายเดินทางใต้ดิน

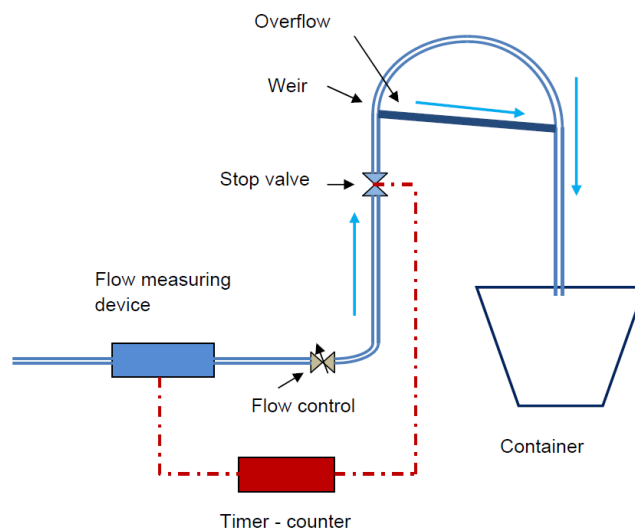
1. วิธีจัดเก็บปริมาตรของเหลวที่ถูกวัดด้วยมาตรวัดปริมาตรของเหลว (Liquid collection methods)

หากของเหลวตัวกลางที่ใช้ในการสอบเทียบเป็นของเหลวที่ไม่อันตราย หรือระเหยเป็นไอได้ง่าย หรือติดไฟได้ยาก เช่น น้ำ สามารถใช้เป็นถังเปิดเพื่อทำการจัดเก็บปริมาตรของเหลวที่ถูกวัดด้วยมาตรวัดปริมาตรของเหลว แบ่งวิธีการจัดเก็บเป็น 2 หลักการ คือ วิธีที่ 1 จัดเก็บในช่วงเวลาปิด-เปิดวาล์วเข้าสู่ภาชนะ (“bucket”) วิธีที่ 2 จัดเก็บตามการจับเวลาที่ไหลเข้าสู่ภาชนะจัดเก็บ (“stopwatch”) ทั้งนี้ภายหลังจากที่จัดเก็บด้วยวิธีการทั้ง 2 วิธีแล้วก็นำไปทำการชั่งน้ำหนักหรือภาชนะที่ใช้จัดเก็บดังกล่าวเป็นภาชนะที่ทราบค่าหรือระบุค่าปริมาตรได้ เช่น ถังตวงแบบมาตรา ก็ค่อยๆ วกกันต่อไปนะ วิธีการจัดเก็บปริมาตรของเหลวที่ผ่านการวัดด้วยมาตรวัดปริมาตรของเหลว ได้แก่

1.1. Standing start and stop method ไม่ขอแปลนะครับทับศัพท์ไปดีกว่า เป็นการจัดเก็บของเหลวที่ผ่านการวัดด้วยมาตรวัดปริมาตรของเหลวในช่วงเวลาปิด-เปิดวาล์วเข้าสู่ภาชนะ (“bucket”) เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดและใช้กับมาตรวัดที่ทำการวัดปริมาตรส่งจ่ายด้วยปริมาตรแน่นอนคงที่ต่อครั้งการจ่าย เช่น มาตรวัดประจำ Truck Loading หรือ Loading Rack เป็นต้น สามารถใช้วิธีการนี้ในการจัดเก็บของเหลวเพื่อใช้ในการสอบเทียบที่มีค่าความแม่นยำต่ำจนถึงการสอบเทียบที่มีค่าความแม่นยำสูง

ระบบจัดเก็บปริมาตรของเหลวที่ถูกวัดด้วยมาตรวัดปริมาตรของเหลวต้องถูกเตรียมให้ปราศจากไอหรืออากาศค้างอยู่ในระบบโดยทำการระบายของเหลว (drain) ในระบบที่เป็นตำแหน่งจุดต่ำสุดและต้องระบายไอ (vent) ในตำแหน่งจุดสูงสุดแต่ละช่วงของระบบการวัดจนมั่นใจว่าในระบบมีแต่สถานะของเหลวสถานะเดียว โดยเลือกใช้อาวุธควบคุมอัตราการไหล (Flow control) ทำหน้าที่แยกออกจากวาล์วปิด-เปิดและต้องไม่ก่อให้เกิดฟองอากาศ (vapor formation) บริเวณส่วนที่เป็นคอขวด (throttling action) ในตัววาล์วควบคุมอัตราการไหลส่วนจะควบคุมการปิด-เปิดด้วยระบบไฮดรอลิก, ระบบนิวเมติก หรือระบบมอเตอร์ให้พิจารณาตามหลักวิศวกรรม

แล้วกัน แต่ไม่ใช่พวก Gate valve หรือ Ball valve ที่เราต้องมาปิด-เปิดด้วยมือละคร้อยอย่างนี้เรียกว่า “slow acting valve” (ทำอย่างไรก็เหนื่อยใจทุกทีไป) นอกจากนี้ตำแหน่งติดตั้งวาล์วควบคุมการไหลควรอยู่ในตำแหน่งหลังมาตรวัดปริมาณของเหลวที่ต้องการทดสอบเพราะหากติดตั้งอยู่ในตำแหน่งก่อนมาตรวัดปริมาณของเหลวอาจก่อให้เกิดฟองอากาศเนื่องจากการทำงานของวาล์วควบคุมอัตราการไหลส่งผลให้ของไหลที่ไหลเข้าตัวมาตรวัดไม่ใช่ของเหลวสถานะเดียว (single phase) หากแต่เจือปนด้วยฟองอากาศ วาล์วควบคุมอัตราการไหลต้องมีขีดความสามารถควบคุมอัตราการไหลคงที่ตลอดช่วงระยะเวลาทดสอบโดยไม่ควรเปลี่ยนแปลงเกินช่วง $\pm 0.1\%$ ของอัตราการไหลที่ตั้งไว้ ส่วนวาล์วปิด-เปิดควรเป็นวาล์วที่มีการทำงานปิด-เปิดได้อย่างรวดเร็ว (fast acting valve) รูปที่ 9-5 เริ่มต้นวาล์วปิด-เปิดทำหน้าที่เปิดให้ของเหลวที่ผ่านการวัดจากมาตรวัดปริมาณของเหลวไหลเข้าสู่ภาชนะเมื่อได้ปริมาณที่ส่งจ่ายตามที่กำหนดให้ทำการปิดวาล์ว จากนั้นทำการเปรียบเทียบปริมาตรที่มาตรวัดปริมาณของเหลววัดได้เทียบกับปริมาตรในภาชนะบรรจุ เช่นถังตวงแบบมาตราเราก็จะได้ค่าผลผลิต ส่วนระยะเวลาในการปล่อยของเหลวเข้าภาชนะนำไปหารปริมาตรของภาชนะที่วัดได้ เราจะได้อัตราการไหล จากนั้นก็ระบายของเหลวออกจากถังตวงแบบมาตรา

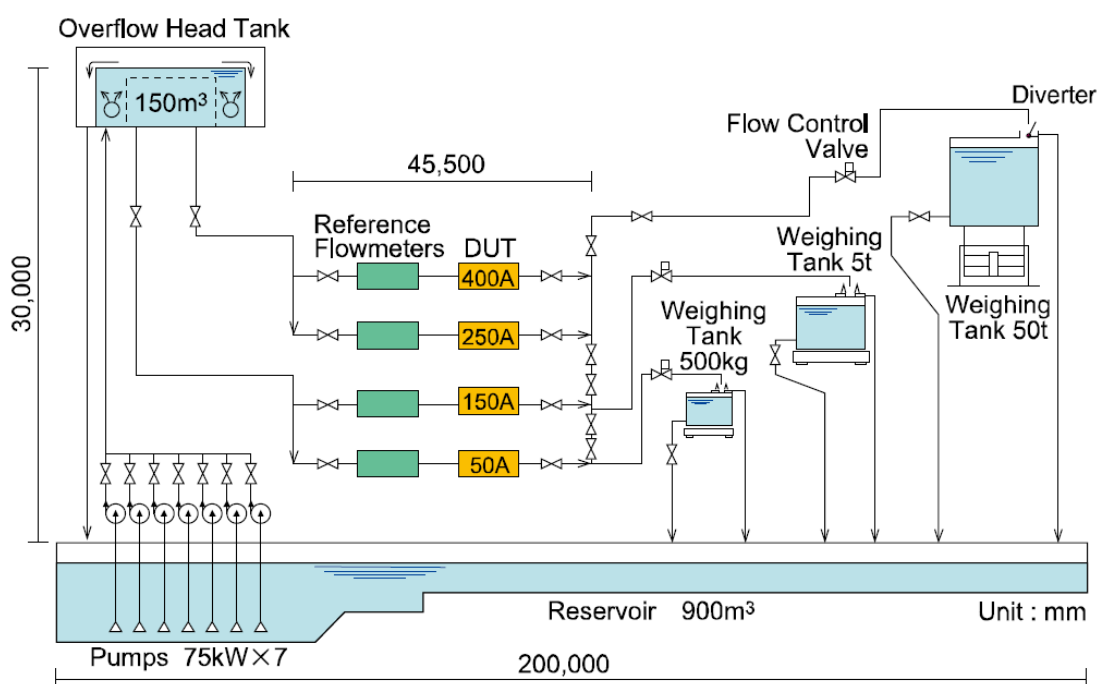


รูปที่ 9-5 วิธีจัดเก็บของเหลว แบบ Standing start and stop method (NEL)

โดยทั่วไปแล้วความยาวของท่อด้านทางออกจากมาตรวัดปริมาณของเหลวควรมีความยาวสอดคล้องกับปริมาตรไม่เกิน 5-10 % ของปริมาตรทดสอบในแต่ละรอบการทดสอบ นอกจากนี้เพื่อป้องกันปัญหาการระเหยของของเหลวทดสอบภายหลังไหลเข้าสู่ภาชนะ (container) ภาชนะดังกล่าวควรเป็นภาชนะปิดหรือซีลได้ระดับหนึ่ง

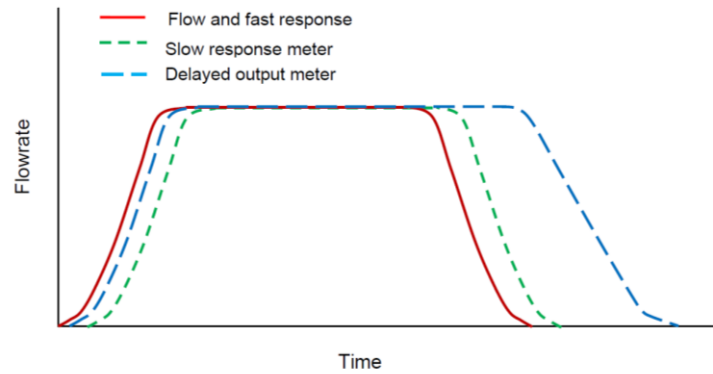
เพื่อให้ระบบสอบเทียบที่มีวิธีการจัดเก็บของเหลวมีความถูกต้องน่าเชื่อถือ การออกแบบระบบปั๊มและระบบท่อต้องมีวิธีการไม่ทำให้ระบบปั๊มและระบบท่อได้รับความเสียหายหลังจากทำการปิดวาล์วปิด-เปิดอย่างรวดเร็ว โดยจัดให้มีระบบ bypass หรือถัง desurger หรือระบบใดตามหลักวิศวกรรม อีกทั้งต้องมั่นใจว่าไม่มีส่วนใดของระบบท่อที่มีการดักอากาศไว้ภายในระบบท่อหรือเป็นจุดอับให้อากาศเล็ดลอดไปสะสมตัวอยู่เพราะไม่เช่นนั้นแล้วเมื่อทำการปิดวาล์วปิด-เปิดอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดแรงบีบอัดและตีกลับเนื่องจากอากาศดังกล่าวกระทำต่อของเหลวในระบบท่อเกิดการสะท้อนของเหลววิ่งกลับไปกลับมาผ่านตัวมาตรวัดปริมาณของเหลวทำให้มาตรวัดแสดงผลการวัดผิดพลาดไป หรือหากระยะเวลาการปิด-เปิดของวาล์วปิด-เปิดทำการปิดอย่างรวดเร็ว

เกินไปก็อาจเกิดปรากฏการณ์ Water Hammer ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการเช่นกัน และบางกรณีที่ไม่ต้องการใช้ระบบปั๊มในการสร้างอัตราการไหลทดสอบเพื่อลดปัญหาในเรื่องอัตราการไหลไม่คงที่, รูปแบบของการไหล (Flow profile) ที่ของเหลวภายหลังไหลออกจากปั๊มแล้วยังมียูปร่างการไหลวนเนื่องจาก, การลดฟองอากาศเข้าสู่ระบบท่อ การนำหน้าสูงโดยรักษาแรงดันคงที่ (static head) เป็นแหล่งจ่ายของเหลวแทนปั๊มก็เป็นที่ต้องการสำหรับห้องปฏิบัติการที่ต้องการความเที่ยงสูง (ดูรูปที่ 9-6) ดังนั้นต้องทำการประนีประนอมระยะเวลาการปิด-เปิดไม่ก่อให้เกิดปัญหาใดๆ แต่อย่างไรก็ตามต้องให้ระยะเวลาของการปิดวาล์วเท่ากับระยะเวลาของการเปิดวาล์ว ดังรูปที่ 9-7 และรูปที่ 9-8

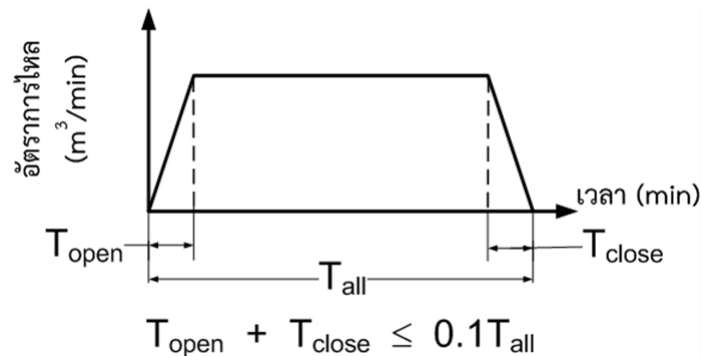


รูปที่ 9-6 Water flowrate calibration facility in NMIJ for Large flowrate (NMIJ)

ระยะเวลาในการทดสอบมาตรวัดปริมาตรของเหลวหรือระยะเวลาของส่วนที่เป็นเส้นตรงคงที่ดังในรูปที่ 9-7 ต้องมีระยะเวลานานเพียงพอเมื่อเทียบระยะเวลาการไต่ระดับอัตราการไหลจนถึงอัตราการไหลทดสอบที่ต้องการและการลดอัตราการไหลลงจนเป็นศูนย์ ทั้งนี้ก็เพื่อให้ผลผิดที่เกิดจากช่วงระยะเวลาไต่ระดับและลดระดับอัตราการไหลมีค่าน้อยที่สุด ในรูปที่ 9-7 จะเห็นได้ว่าในกรณีที่มาตรวัดปริมาตรของเหลวที่มีเวลาการตอบสนองต่อการวัดช้า (slow response meter) นั้นการไหลของเหลวเริ่มตั้งแต่จุด 0,0 ของกราฟแต่ผ่านมาระยะเวลาหนึ่งมาตรวัดจึงค่อยแสดงผลการวัด ทำให้มีระยะเวลาดทดสอบมาตรวัดที่อัตราการไหลคงที่สั้นลง มาตรวัดปริมาตรของเหลวชนิดดังกล่าวจึงไม่เหมาะสมกับวิธีจัดเก็บของเหลวเพื่อสอบเทียบด้วยวิธีนี้ แต่พบว่ามาตรวัด PD ส่วนใหญ่ไม่มีปัญหาในเรื่องเวลาการตอบสนองต่อการวัดช้าเนื่องจากมีระยะเวลาการตอบสนองต่อการวัด (response time) ต่ำอยู่แล้ว และนี่คือ เหตุผลหนึ่งของการกำหนดรูปแบบอัตราการไหล ดังในรูปที่ 9-8



รูปที่ 9-7 ระยะเวลาการตอบสนองต่อการวัด (response time) ของมาตรวัดปริมาณของเหลว (NEL)



รูปที่ 9-8 Flowrate Pattern ของมาตรวัดในทางปฏิบัติเพื่อหา MF ที่อัตราการไหลคงที่ค่าหนึ่ง

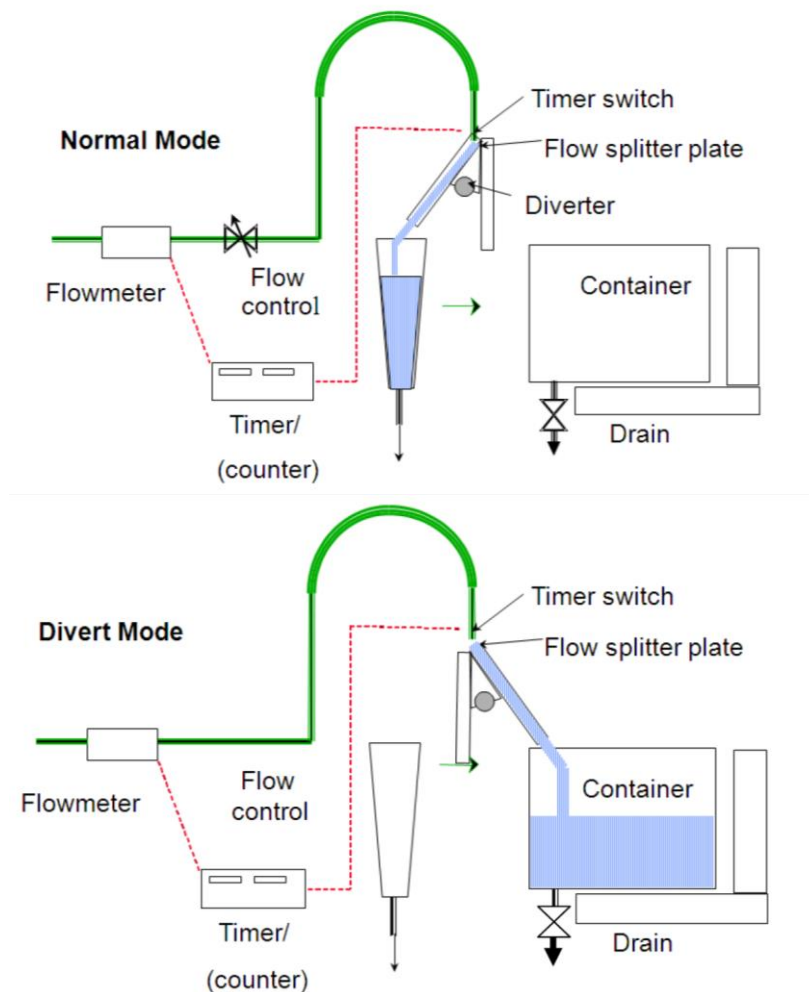
เพื่อให้การจัดเก็บวิธี Standing start and stop method มีความถูกต้องยิ่งขึ้นจำเป็นต้องมีจุดอ้างอิงในการเริ่มขั้นตอนจัดเก็บของเหลวที่คงที่ทุกครั้งในแต่ละรอบการทำงาน ในกรณีการส่งของเหลวเข้าภาชนะแบบ “Top Loading” การนำอุปกรณ์ที่เรียกว่า “weir” หรือเรียกว่า “transfer point” (รูปที่ 9-9) ติดตั้งเข้ากับท่อทางเข้าภาชนะจัดเก็บที่อยู่ในแนวตั้งจึงเป็นเรื่องสำคัญและจำเป็น ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวนี้หากติดตั้งเข้ากับถังแบบมาตราจะเข้ากับถังแบบมาตรา “แบบรับ” เมื่อของเหลวที่ผ่านมาตรวัดปริมาณของเหลวไหลลงสู่ภาชนะจัดเก็บเมื่อทำการปิดวาล์ว ของเหลวที่อยู่จุดสูงสุดบริเวณช่ององ 180 องศาจะแบ่งการไหลไป 2 ทิศทางคือ ไหลเข้าสู่ภาชนะจัดเก็บไปส่วนหนึ่งและไหลย้อนกลับมายังทางท่อทางเข้าด้านมาตรวัดปริมาณของเหลวส่วนหนึ่ง (ไม่ได้ไหลกลับผ่านมาตรวัด) เมื่อติดตั้ง “transfer point” ของเหลวจะถูกทำให้ไหลผ่านท่อลัดเพื่อไหลลัดกลับไปยังท่อที่ไหลเข้าสู่ภาชนะจัดเก็บจนกระทั่งระดับของไหลมีระดับเดียวกับระดับทางเข้าท่อลัดนั้นก็จะหยุดไหล เราก็จะสังเกตเห็นระดับของไหลใน sight glass ว่าอยู่ตำแหน่งใดท่อลัดพอดีทุกครั้งที่เราเริ่มเปิดวาล์วและปิดวาล์ว แต่หากกรณีส่งของเหลวเข้าภาชนะแบบ “Bottom Loading” จำเป็นต้องออกแบบให้วาล์วเปิด-ปิดเป็น step (เช่น เริ่มเปิด 10%-40%-60%-100% เป็นต้น) จนกว่าได้ปริมาณที่ต้องการ

1.2. Flying start and finish ในบางครั้งเรียก “Diverter Method” เนื่องจากของเหลวยังคงไหลผ่านมาตรวัดปริมาณของเหลวด้วยอัตราการไหลทดสอบคงที่ตลอดเวลาไม่มีการหยุด เพียงแต่มีอุปกรณ์เปลี่ยนทิศทางการไหลที่เรียกว่า “diverter” (รูปที่ 9-10) เปลี่ยนทิศทางการไหลของของเหลวว่าจะให้ของเหลวไหลลงสู่ภาชนะจัดเก็บหรือจะให้ไหลกลับไปยังแหล่งจ่ายของเหลวที่ปั๊มดูดอัดเข้าระบบท่อ ดังนั้นจึงเป็นการจัดเก็บตามระยะเวลาของการจับเวลาที่ไหลเข้าสู่ภาชนะจัดเก็บ (“stopwatch”) ดังนั้นด้วยการทำงานดังกล่าวภาชนะจัดเก็บและตัวเปลี่ยนทิศทางการไหลจึงต้องเป็นระบบเปิดสู่ความดันบรรยากาศ



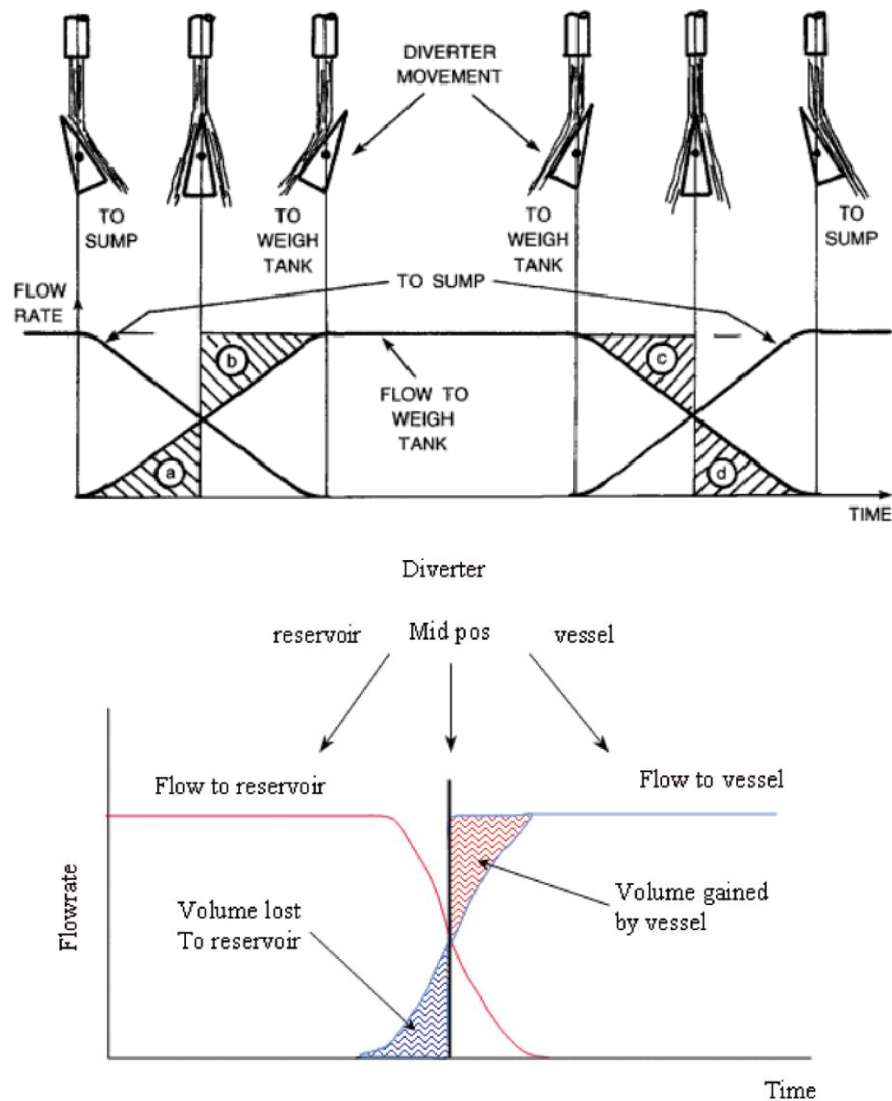
รูปที่ 9-9 อุปกรณ์ที่เรียกว่า “weir” หรือ เรียกว่า “transfer point”

กลไกการทำงานของตัวเปลี่ยนทิศทางการไหล ต้องทำงานด้วยความรวดเร็วมากเท่าที่จะทำได้เพื่อลดผลผิดของปริมาตรที่ไหลเข้าสู่ภาชนะมากเกินกว่าค่าที่มาตรวัดปริมาตรของเหลววัดได้ เรียกว่า “timing error” ซึ่งค่าผลผิดจากสาเหตุดังกล่าวจะสะท้อนไปยังค่าความไม่แน่นอนของผลการวัดเป็นสาเหตุหลักทีเดียว



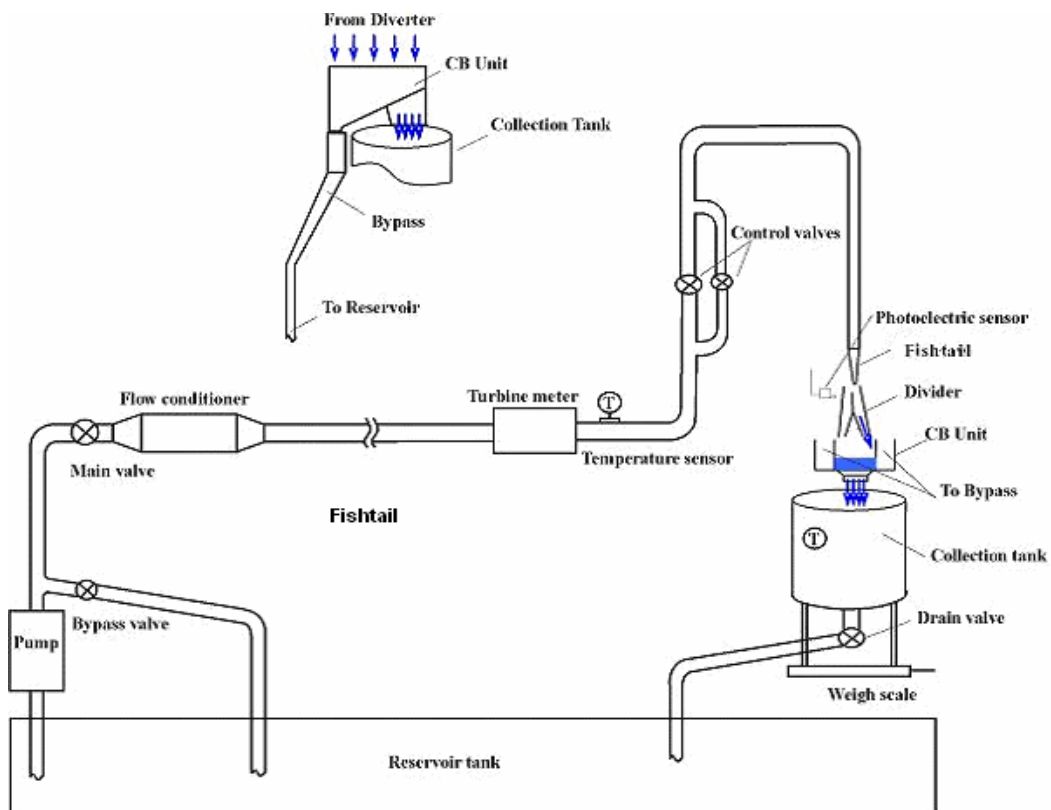
รูปที่ 9-10 วิธีจัดเก็บของเหลว แบบ Flying start and finish หรือ “Diverter Method” (NEL)

สำหรับการปรับตั้ง diverter นั้นต้องใช้มาตรวัดแบบมาตราที่มีความเที่ยงสูงทำการวัดปริมาตรด้วย อัตราการไหลที่ต่างกันเพื่อทำการหาเวลาที่เหมาะสมในการทำงานของ diverter โดยได้จากการ ประนีประนอมการออกแบบหาจุดที่เรียกว่า “hydraulic center” จุดตัดระหว่างอัตราการไหลไปยังภาชนะ จัดเก็บกับอัตราการไหลกลับไปยังแหล่งจ่ายของเหลวที่จุดกึ่งกลาง จนกระทั่งผลต่างจากการสอบเทียบด้วยมาตร วัดแบบมาตรามีค่าต่างกันน้อยสุดโดยเปรียบเทียบที่อัตราการไหลที่ต่างกันซึ่งต้องหาจุดที่เหมาะสมนั้นๆ (รูปที่ 9-11)

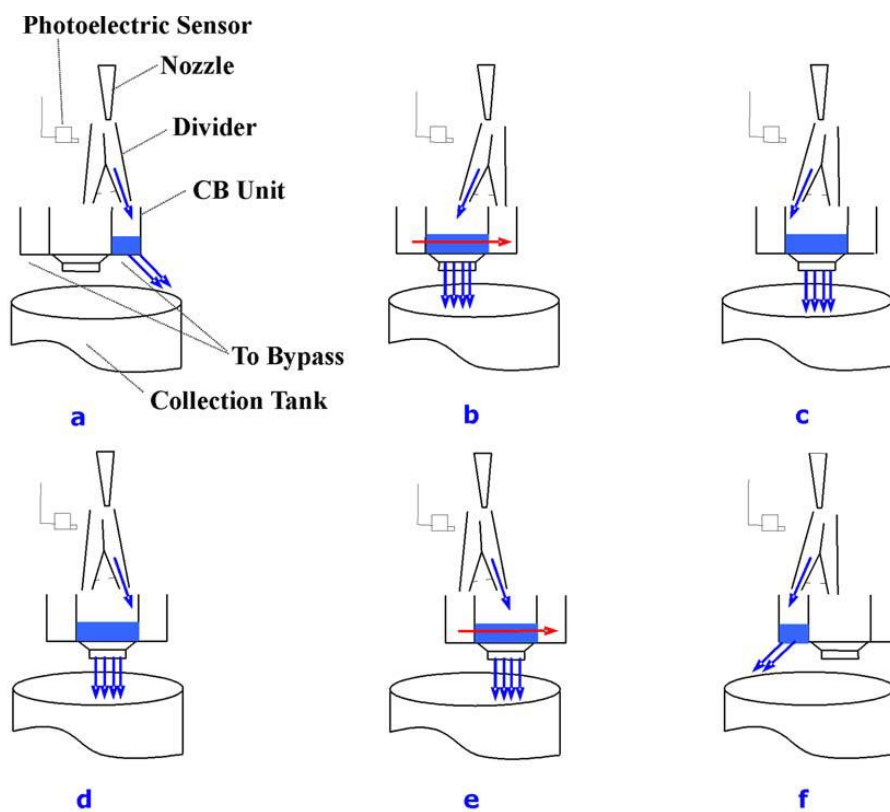


รูปที่ 9-11 จุดที่เรียกว่า “hydraulic center”

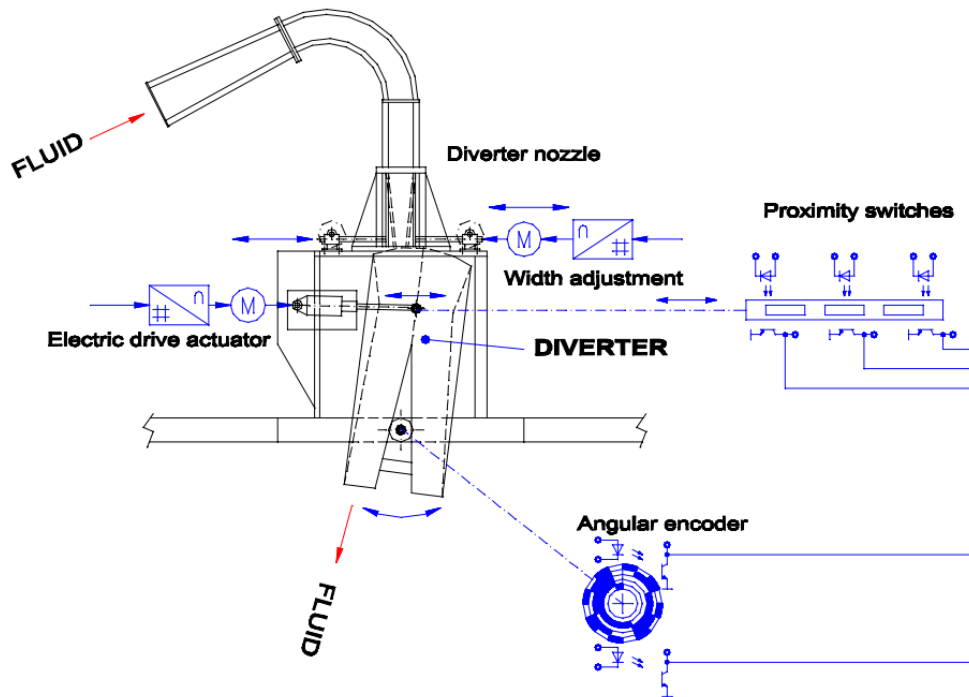
มาตรวัดปริมาตรของเหลวที่เหมาะสมกับการใช้วิธีการจัดเก็บของเหลวด้วยวิธีการนี้ ได้แก่มาตรวัด ปริมาตรของเหลวที่มีเวลาการตอบสนองต่อการวัดช้า (slow response meter) และมาตรวัดที่มีวัดอุประสงค์ เพื่อต้องการให้มีอัตราการไหลถูกต้องมากกว่าให้มีปริมาตรที่วัดได้ถูกต้อง นอกจากนี้วิธีการนี้ไม่สามารถใช้ได้กับ มาตรวัดปริมาตรของเหลวที่มีส่วนแสดงค่าแบบกลไกหรือเราต้องอ่านค่าปริมาตรด้วยสายตาเพราะอ่านไม่ทันครับ จึงเหมาะกับมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่มีส่วนแสดงค่าแบบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสามารถเชื่อมการควบคุมการทำงาน



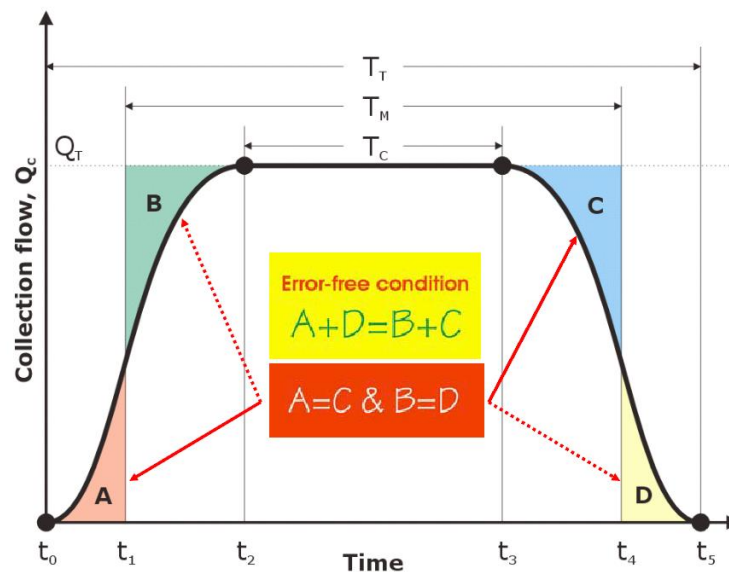
รูปที่ 9-12 วิธีจัดเก็บของเหลว แบบ Flying start and finish หรือ “Diverter Method” (NIST)



รูปที่ 9-13 การทำงานของ diverter ทั้งปรับมุมเอียงพร้อมไปกับเคลื่อนที่จากรูปที่ 9-12 (NIST)



รูปที่ 9-14 การทำงานตัวขับ Diverter drive ในการปรับมุมเอียงและพร้อมควบคุมการเคลื่อนที่ (motion control) เพื่อให้เก็บของเหลวในอัตราคงที่กราฟรูปข้างล่าง (PTB)



รูปที่ 9-15 ความสัมพันธ์ระยะเวลากับอัตราการไหลเมื่อ Converter เปลี่ยนทิศทางการไหลของเหลวลงสู่ภาชนะ ด้วยการจับเวลา T_M เพื่อให้พื้นที่ใต้กราฟส่วน “A” ไปทดแทนส่วน “B” และให้ส่วน “D” ไปทดแทนส่วน “C” ทำให้พื้นที่ใต้กราฟเป็นรูปสี่เหลี่ยมสมบูรณ์แบบ (NIST)

สำหรับภาชนะที่ใช้จัดเก็บของเหลวเพื่อหาค่าปริมาตรที่วัดได้ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวนั้น อาจจัดให้มีแผ่น buffer เพื่อแบ่งภาชนะออกเป็นส่วนๆ แต่ของเหลวไหลยังคงไหลถึงกันทั้งภาชนะ ทั้งนี้เพื่อลดแรงกระเพื่อมของผิวน้ำภายในภาชนะซึ่งจะมีความสำคัญมากหากภาชนะดังกล่าววางอยู่บนเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความไวสูงมาก เนื่องจากเครื่องชั่งจะแสดงผลไม่นิ่งและเปลี่ยนแปลงไปตามการกระเพื่อมของน้ำในภาชนะบนเครื่องชั่ง

1.3. Dynamic collection methods วิธีการจัดเก็บของเหลวที่ผ่านการวัดด้วยมาตรวัดปริมาตรของเหลวในข้อ 1.1 และ 1.2 เมื่อเสร็จสิ้นแต่ละรอบการทำงานแล้ว จากนั้นทำการหาปริมาตรด้วยวิธีการตวงเปรียบเทียบหรือจะเป็นการชั่งน้ำหนักแล้วแปลงเป็นค่าปริมาตรต่อไปซึ่งล้วนเป็นลักษณะการทำงานที่เรียกว่า “static measurement” สำหรับในข้อ 1.3 นี้เป็นลักษณะคล้ายกับวิธีการที่ 1.1 และ 1.2 แต่มีรูปแบบการทำงานโดยของเหลวยังคงไหลผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ต้องการทดสอบต่อเนื่องตลอดเวลาแล้วยังเป็นการไหลผ่านแบบมาตราที่ต้องการจัดเก็บของเหลวตลอดเวลาด้วยเช่นกัน ซึ่งวิธีการดังกล่าวยังยากต่อการปฏิบัติ อีกทั้งความถูกต้องแม่นยำต่ำ แต่หากไม่ใช้วิธีการจัดเก็บของเหลวแต่อย่างใดแต่ใช้แบบมาตราโดยตรง เช่น ท่อทดสอบความจุ (pipe prover) หรือ small volume prover ก็เป็นอีกเรื่องหนึ่ง

2. วิธีการสอบเทียบ (Measurement methods)

การสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวต้องกระทำภายใต้อัตราการไหล ความดัน และอุณหภูมิที่ใช้งานจริง และหากมาตรวัดใช้กับของเหลวชนิดแตกต่างกัน ก็ต้องดำเนินการด้วยของเหลวชนิดนั้นจนครบทุกชนิดของเหลวที่ใช้งานจริง วิธีการสอบเทียบในที่นี้จะมี 2 หลักการที่สำคัญในการหาปริมาณที่วัดได้ของมาตรวัดปริมาตรของเหลว นั่นคือการหาปริมาณในรูปของ “มวลน้ำหนัก” หรือปริมาณในรูปของ “ปริมาตร” ภายหลังที่ทำการจัดเก็บของเหลวซึ่งได้แก่

2.1. Gravimetric calibrators เป็นการหาน้ำหนักภาชนะเปล่าก่อนจัดเก็บปริมาณของเหลวที่ผ่านการวัดโดยมาตรวัดปริมาตรของเหลว และหาน้ำหนักภาชนะหลังจากจัดเก็บปริมาณของเหลวที่ผ่านการวัดโดยมาตรวัดปริมาตรของเหลว (รูปที่ 9-16 ถึง รูปที่ 9-19) จากนั้นนำหาค่าผลต่างและทำการแก้ไขตัวแปรที่มีผลต่อการหาค่าน้ำหนัก เช่น แรงลอยตัวในอากาศ เป็นต้น ซึ่งค่าน้ำหนักดังกล่าวนี้ในบางครั้งจะถูกแปลงไปเป็นค่าปริมาตร

$$M = W \times \left(1 + \rho_a \times \left(\frac{1}{\rho_f} - \frac{1}{\rho_s} \right) \right) \quad (\text{Eq-9-1})$$

เมื่อ M = มวลของของเหลว, Kg (g)
 W = น้ำหนักจากผลการชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่ง, Kg (g)
 ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศขณะชั่ง, Kg/m³ (g/cm³)
 ρ_f = ความหนาแน่นของของเหลวขณะชั่ง, Kg/m³ (g/cm³)
 ρ_s = ความหนาแน่นของตม้น้ำหนักมาตรฐาน, Kg/m³ (g/cm³)

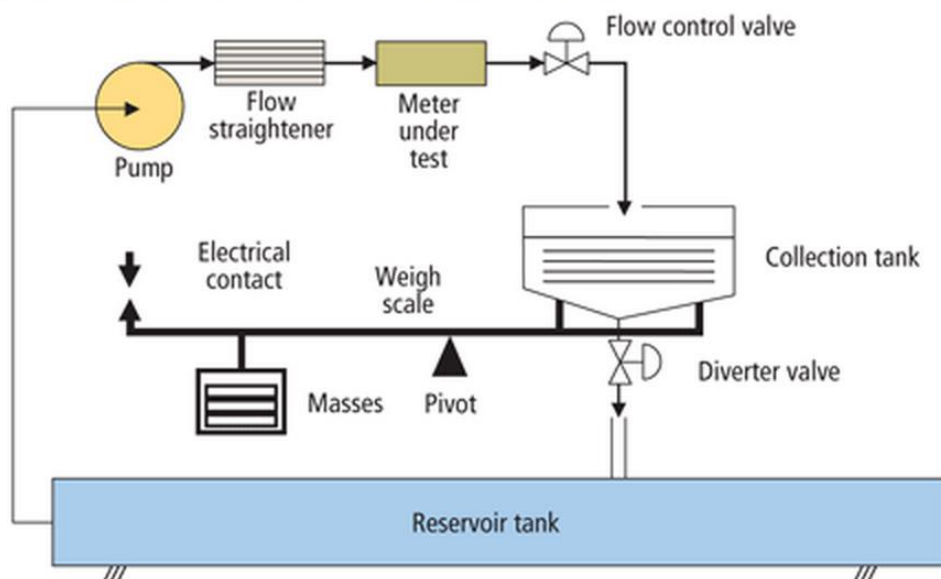
หากต้องการแปลงค่ามวลน้ำหนักไปยังค่าปริมาตรให้หารค่าน้ำหนักด้วยค่าความหนาแน่นของเหลววัดได้ที่มาตรวัดปริมาตรของเหลว

สำหรับเครื่องชั่งโดยปกติจะเป็นเครื่องชั่งที่มีส่วนรับน้ำหนักเป็นแท่นรับน้ำหนัก (platform) มีความเที่ยงสูง เช่น เครื่องชั่ง Electronic force balance หรือ Load cell machine พร้อมส่วนช่วย addition of electronic output สำหรับเครื่องชั่งที่ใช้โหลดเซลล์ทำงานด้วยหลักการ Strain gauge โดยทั่วไปแล้วไม่สามารถให้ค่า uncertainty ได้ดีกว่า 0.1% ในขณะที่เราต้องการค่า uncertainty น้อยกว่า 0.01% และยังมีเครื่องชั่งที่มีขีดความสามารถสูงขึ้นไปที่ใช้ shear force and compensated strain gauge cells หรือ Gyroscopic weighing (รูปที่ 9-20) ซึ่งเป็นเครื่องชั่งชนิดพิเศษดีมาก แต่ราคาแพงมากเช่นกัน สำหรับรายละเอียดเพิ่มเติมสามารถหาอ่านได้ใน ISO 4185 : Measurement of liquid flow in closed conduits -Weighing method



รูปที่ 9-16 ภาพขณะบรรจุของเหลวปิโตรเลียมพร้อมเครื่องชั่งในการสอบเทียบแบบ Gravimetric Method วิธีจัดเก็บของเหลว แบบ Standing start and stop method

Dynamic gravimetric flow calibration facility



รูปที่ 9-17 วิธีจัดเก็บของเหลว แบบ Standing start and stop method ด้วยเครื่องชั่ง dynamic gravimetric flow calibration เป็นแบบคานท่อน้ำหนัก



12-Tonne Weight-Tank
System



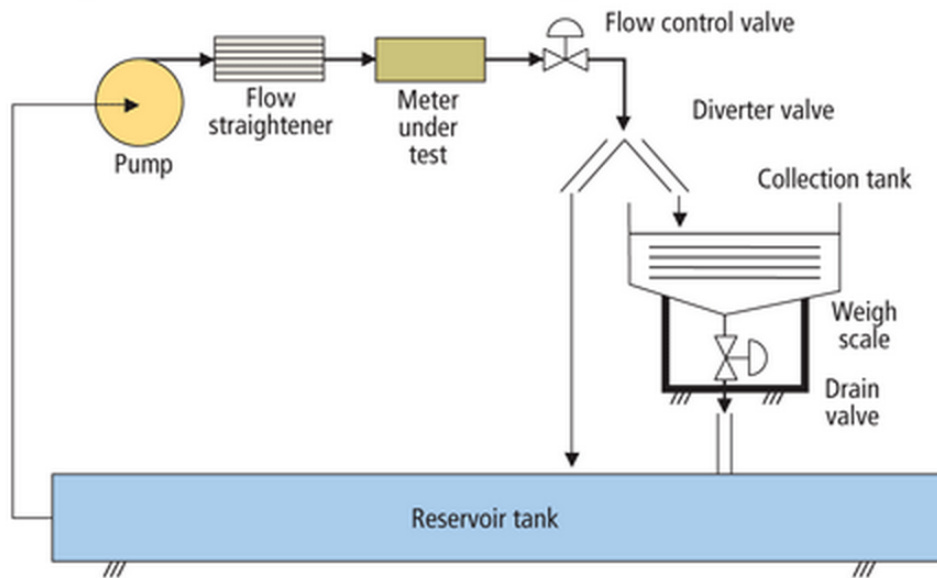
Diverter Valve Assembly



Load Cell 12 ตัน

รูปที่ 9-18 สอบเทียบ Gravimetric Method (น้ำ), 12-Tonne Weight-Tank System หน่วยงาน NEL
วิธีจัดเก็บของเหลว แบบ Flying start and finish หรือ “Diverter Method”

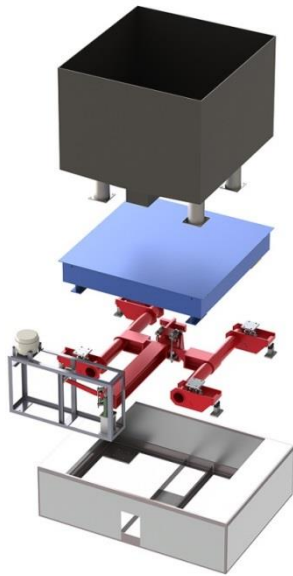
Static gravimetric flow calibration facility



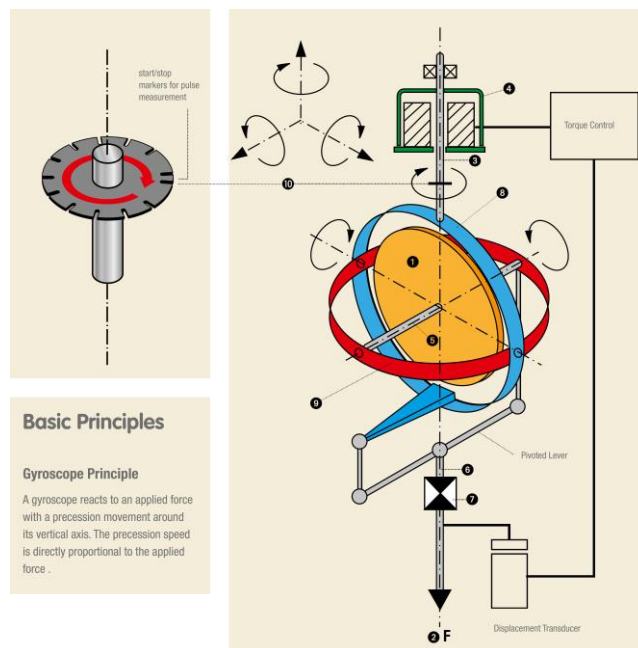
รูปที่ 9-19 วิธีจัดเก็บของเหลว แบบ Flying start and finish หรือ “Diverter Method” ด้วยเครื่องชั่ง static gravimetric flow calibration เป็น เครื่องชั่งโดยตรง

2.2. **Volumetric calibrators** ของเหลวที่ผ่านการวัดด้วยมาตรวัดปริมาตรของเหลวเมื่อถูกจัดเก็บเข้าสู่ภาชนะ หรือถังตวงแบบมาตรา ซึ่งได้รับสอบเทียบและทราบค่าปริมาตรชัดเจนไม่ว่าด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก หรือจากถังตวงแบบมาตราอ้างอิงในการถ่ายทอดแบบมาตราก็ตาม ปกติถังตวงแบบมาตราจะถูกออกแบบดังรูปที่ 9-23 เพื่อสะดวกกับการระบายของเหลวออกไปจนหมด อีกทั้งป้องกันอากาศถูกดักไว้อยู่ตามซอกมุมซึ่งก่อให้เกิดผลการวัดปริมาตรผิดไป เมื่อทราบค่าปริมาตรวัดได้จากถังตวงแบบมาตรา ให้ทำการระบายของเหลวออกตามระยะเวลา (drain time) ที่ระบุไว้ใน nameplate ประจำถังตวงแบบมาตรา ซึ่งจะทำให้ได้สถานะของเหลวค้างภายในถังตวงแบบมาตราใกล้เคียงกันทุกครั้ง ด้วยเหตุนี้เองการสอบเทียบด้วยวิธีการนี้จึงมีข้อจำกัดวิธีการจัดเก็บของเหลวเป็นแบบ “Standing start and stop method” เท่านั้นเนื่องจากง่ายต่อการควบคุมในทางปฏิบัติเพื่อไม่ให้ของเหลวล้นออกจากถังตวงแบบมาตรา อีกประการหนึ่งนั่นคือของเหลวที่ใช้ต้องมีค่าความหนืดน้อยกว่า 5 cSt แต่หากมีค่าความหนืดสูงกว่า 10 cSt จะเริ่มมีปัญหาด้าน drain time หรือของเหลวค้างในถังตวงแบบมาตราในสถานะไม่คงที่ ทำให้ปริมาตรตั้งต้นการสอบเทียบด้วยถังตวงแบบมาตราคลาดเคลื่อนไป

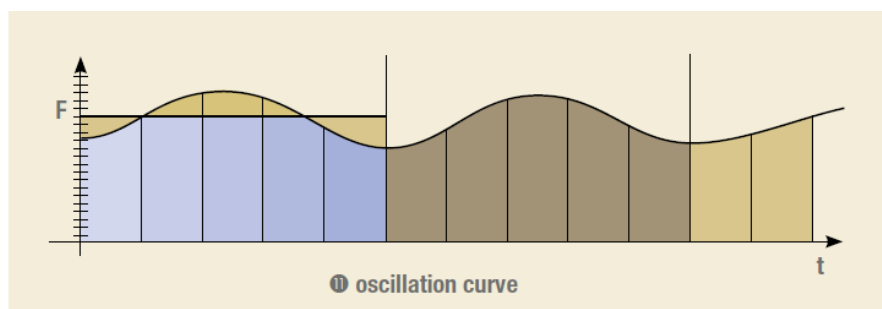
2.3. **Pipe provers** ในปัจจุบัน pipe prover น่าจะเป็นแบบมาตราที่ดีมากสำหรับระบบการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองแบบไดนามิกส์ (Dynamic calibration) เท่าที่มีอยู่ในปัจจุบัน อีกทั้งยังเป็นระบบปิด หรือจัดให้เป็นส่วนหนึ่งของระบบการวัด (metering system) เพื่อความสะดวกรวดเร็วในการตรวจสอบมาตรวัดปริมาตรของเหลว แต่ในปัจจุบันอาจพบว่า Pipe Prover จะมีจำนวนลดน้อยลงเนื่องจากต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก อีกทั้งต้องติดตั้งอยู่กับที่ ผู้ครอบครองอาจมีข้อจำกัดในการปฏิบัติงาน และอาจมีต้นทุนในการติดตั้งและการบำรุงรักษาที่ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะการเคลือบผิวภายในท่อ (lining) ของ Pipe prover



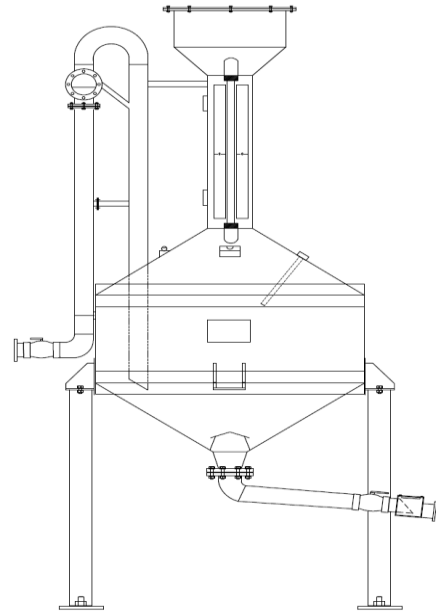
รูปที่ 9-20 เครื่องชั่ง Gyroscopic สำหรับสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวด้วยวิธีชั่งน้ำหนัก;
 $Max = 40,000 \text{ kg}$, $d = 100 \text{ g}$, $n = 300,000$ (WÖHWA Waagenbau GmbH)



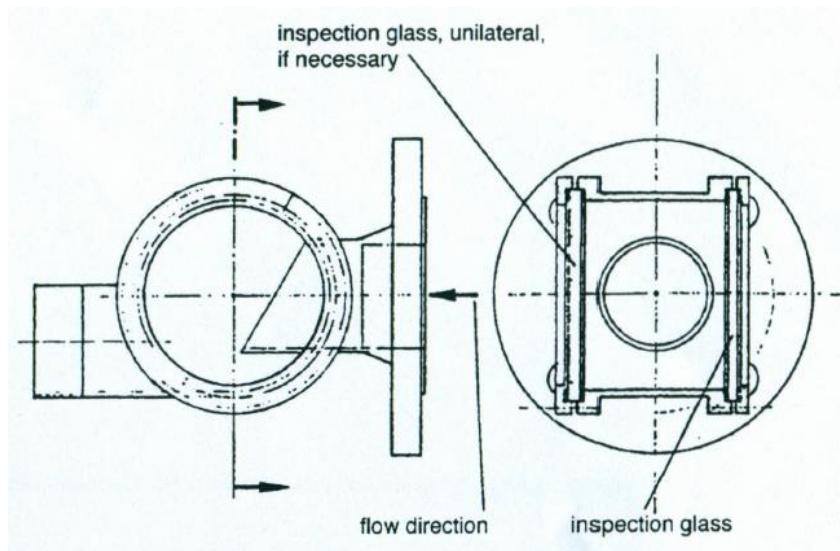
รูปที่ 9-21 หลักการทำงานของเครื่องชั่ง Gyroscopic (WÖHWA Waagenbau GmbH)



รูปที่ 9-22 หลักการทำงานของเครื่องชั่ง Gyroscopic (ต่อ)



รูปที่ 9-23 ถังตวงแบบมาตรา “แบบรับ” เพื่อรับปริมาตรของเหลวผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่ผ่านการวัดของมาตรวัดปริมาตรของเหลว (ซ้ายมือ) ส่วนถังตวงแบบมาตราใช้รับน้ำจากมาตรวัดน้ำประปา (ขวามือ)



รูปที่ 9-24 Sight Glass ติดตั้งด้านท่อทางออกจากถังตวงแบบมาตราเพื่อใช้ในการตรวจสอบ Drain time

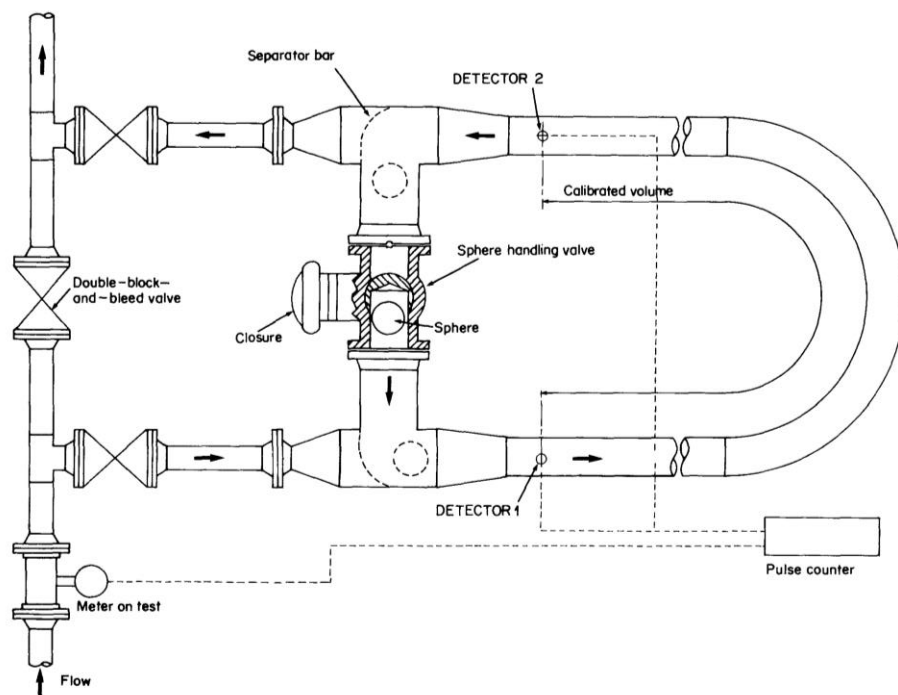


รูปที่ 9-25 ตัวอย่าง Sight glass ด้านทางออกถังตวงแบบมาตรา



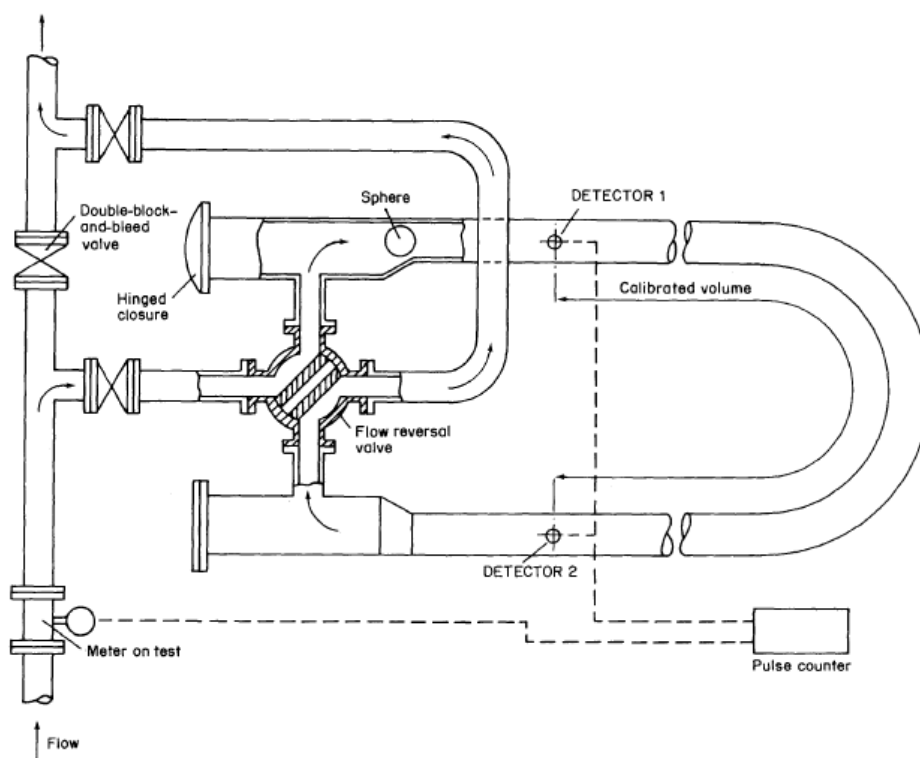
รูปที่ 9-26 Metering System โดยมี Conventional Pipe Prove เป็นแบบมาตรฐานสอบเทียบมาตรวัด PD

2.3.1. Uni-directional sphere prover เป็น Conventional Pipe Prover ซึ่งใช้ตัวกวาดที่เป็นลูกบอลวิ่งไปในทิศทางเดียวต่อการสอบเทียบหรือตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลว



รูปที่ 9-27 Conventional Pipe Prove แบบ Uni-directional sphere prover

2.3.2. Bi-directional sphere prover เป็น Conventional Pipe Prover ซึ่งใช้ตัวกวาดที่เป็นลูกบอลวิ่งไปในทิศกลับไป-กลับมา โดยใช้ 4-way valve ควบคุมทิศทางการไหลเข้า-ออกเพื่อทดสอบความถูกต้องของการสอบเทียบหรือตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลว



รูปที่ 9-28 Conventional Pipe Prove แบบ Bi-directional sphere prover

2.3.3. Small volume provers ได้กล่าวไว้แล้วในบทก่อนหน้านี้

โครงสร้างการถ่ายทอดแบบมาตราในการสอบเทียบมาตรวัด (Liquid Metering Hierarchies)

เพื่อให้ระบบการสอบเทียบคงไว้ซึ่งความถูกต้องและน่าเชื่อถือการจัดโครงสร้างและลำดับชั้นแบบมาตราเป็นเรื่องจำเป็น จาก API MPMS Chapter4 Section 1 ได้กำหนดดังรูปที่ 9-29 เป็นขอบเขตจำกัดค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty Limits) ต่อครั้งและต่อปีในภาพรวม โดยเทียบเคียงกับงานซึ่งตรวจวัดของประเทศเรา

- | | |
|----------------|--|
| Level 1 | แบบมาตราชั้นหนึ่ง เก็บรักษาไว้ที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ |
| Level 2 | แบบมาตราชั้นสอง เก็บรักษาไว้ที่สถาบันมาตรวิทยาและหน่วยงานซึ่งตรวจวัดในเชิงกฎหมาย (Legal Metrology) เพื่อใช้สอบเทียบแบบมาตรา Level 3 หรือเรียกว่า Field Transfer Standards |
| Level 3 | แบบมาตราชั้นสาม เก็บรักษาไว้ที่หน่วยงานซึ่งตรวจวัดในเชิงกฎหมาย (Legal Metrology) รวมทั้งแบบมาตราที่หน่วยงานซึ่งตรวจวัดในเชิงกฎหมายยอมรับและให้ใช้เป็นแบบมาตราชั้นสาม หรือเรียกว่าแบบมาตราภาคสนาม (Field Transfer Standards) เพื่อใช้สอบเทียบแบบมาตรา Level 4 แบบมาตราภาคสนามในที่นี้ ตัวอย่างเช่น ถังตรวจแบบมาตรา (Tank Prover), Pipe Prover, Small Volume Prover หรือที่เรียกกันติดปากว่า Compact Prover ทั้งนี้คำว่า “Prover” ตาม API คือตัวพิสูจน์หรือแบบมาตรานั้นเอง |
| Level 4 | แบบมาตราชั้นสาม เช่นกัน แต่ใช้เป็นแบบมาตราซึ่งทราบค่าปริมาตรอ้างอิงแล้วในการสอบเทียบหรือตรวจสอบให้คำรับรองโดยตรงกับมาตรวัดปริมาตรของเหลวเพื่อใช้หาค่า |

Meter Factor หรือ K-Factor แบบมาตรานี้จะถูกเก็บรักษาไว้ที่หน่วยงานชั่งตวงวัดในเชิงกฎหมาย (Legal Metrology) รวมทั้งแบบมาตราที่หน่วยงานชั่งตวงวัดในเชิงกฎหมายยอมรับและให้ใช้เป็นแบบมาตราชั้นสาม ซึ่งครอบคลุมถึงถังตวงแบบมาตรา (Tank Prover), Pipe Prover, Small Volume Prover, Master Flowmeter เป็นต้น

Level 5, 6 & 7 ใช้กับการสอบเทียบการแสดงผลการวัดของมาตรวัด, ส่วนการทำงานร่วมกับมาตรวัด เช่น ตัวชดเชยค่าอุณหภูมิ (Temperature Compensator) ส่วนแสดงผลการวัด, ส่วนพิมพ์ผลการวัด เป็นต้น

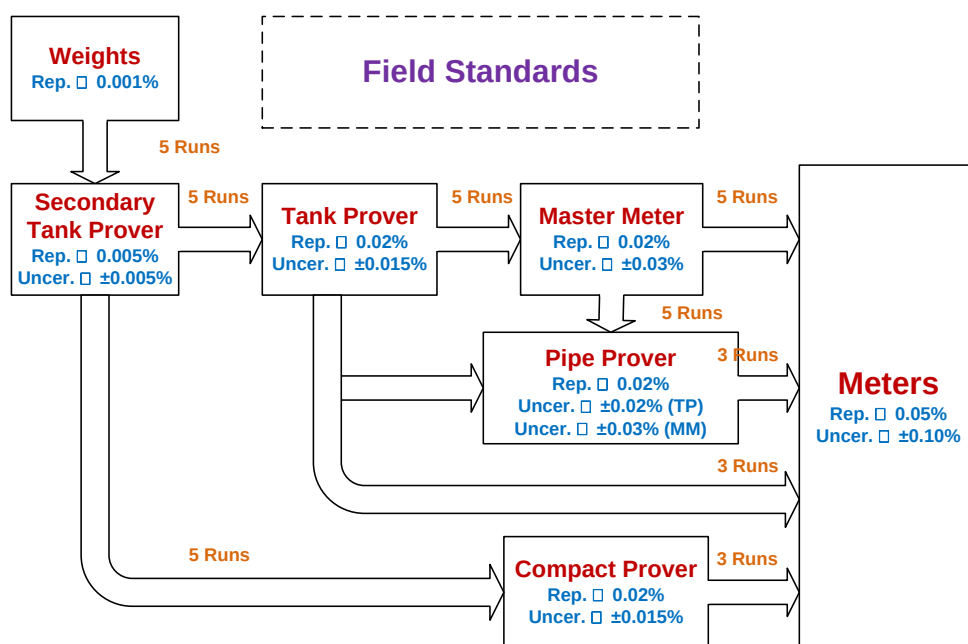
Table 3—Hypothetical Uncertainty Limits in General Liquid Metering Hierarchy

Level	Description of Hierarchy Level	Uncertainty Limit, + or – %	
		Per Event	Per Year
1	Primary Standards	0.002	0.002
2	Secondary Working Standards	0.005	0.005
3	Field Transfer Standards	0.015	0.015
4	Meter Prover Base Volume	0.03	0.03
5	Meter Indicated Volume	0.10	0.05
6	Correction for Quality and/or Quantity	0.15	0.07
7	Custody Transfer Ticket	0.20	0.10

รูปที่ 9-29 โครงสร้างและลำดับชั้นแบบมาตรา จาก API MPMS Chapter4 Section 1

ดังนั้นเราจะเห็นได้ว่าในทางความเป็นจริงแล้วใน พระราชบัญญัติมาตราชั่งตวงวัด พ.ศ. 2542 นั้นเรากำหนดแบบมาตราอยู่เพียง 3 ชั้น คือแบบมาตราชั้น 1, แบบมาตราชั้น 2 และแบบมาตราชั้น 3 สำหรับแบบมาตราชั้น 1 หรือ “Primary Standard” หรือ “National Standard” ของประเทศไทยจึงมีเพียงหนึ่งเดียวที่เก็บรักษาไว้ในหน่วยงานสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของประเทศเพื่อสามารถเปรียบเทียบสร้างความน่าเชื่อถือไว้ซึ่งกันระหว่างประเทศ เช่น มาตรฐานแห่งชาติด้านมวลคือตุ้มน้ำหนัก 1 กิโลกรัมต้นแบบระหว่างประเทศ (International prototype of the kilogram) หมายเลข 80 ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เรื่องกำหนดมาตรฐานแห่งชาติเกี่ยวกับหน่วยวัดปริมาณ เครื่องมือ อุปกรณ์และวัสดุอ้างอิงที่ใช้ในการวัดปริมาณ ลงวันที่ 13 ก.ย. 2549 ออกตามความใน พระราชบัญญัติพัฒนาระบบมาตรวิทยาแห่งชาติ พ.ศ. 2540 เป็นแบบมาตราชั้นหนึ่งทางมวลตามพระราชบัญญัติมาตราชั่งตวงวัด พ.ศ. 2542 ตามประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่องกำหนดแบบมาตราชั้นหนึ่งตามพระราชบัญญัติมาตราชั่งตวงวัด พ.ศ. 2542 พ.ศ. 2550 ลงวันที่ 4 ม.ค. 2550 อย่างทำเป็นงแล้วบอกว่าตุ้มน้ำหนัก 2 กับ 5 กิโลกรัมอีก 2 ตุ่มเป็นแบบมาตราชั้น 1 เพิ่มขึ้นมา อย่างนี้เค้าไม่ทำกันครับ แต่จะไปขอตุ้มน้ำหนัก 1 กิโลกรัมต้นแบบระหว่างประเทศ หมายเลข จาก BIPM เพิ่มอีกตุ้มหนึ่งอย่างนี้รับได้และประเทศที่เจริญแล้วเค้าทำกันครับ แต่นั่นแหละก็ไม่ได้หมายความว่าเราจะมีแบบมาตราชั้นที่ 2 และแบบมาตราชั้น 3 เพียงหนึ่งเดียวเช่นเดียวกับแบบมาตราชั้นหนึ่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการบริหารการจัดการของแต่ละประเทศว่าเราจะวางโครงสร้างแบบมาตราอย่างไรให้เหมาะสมกับประเทศของเรา เช่นอาจกำหนดให้แบบมาตราชั้น 3 สามารถแบ่งย่อยออกเป็น ชั้นย่อยอีก 3 ชั้น เป็นแบบมาตราชั้น 3.1, 3.2 และ 3.3 ก็กระทำได้

จากที่เราทราบกันอยู่แล้วว่า ค่าอัตราเพื่อเหลือเผื่อขาด (Maximum Permissible Error; MPE) ประกอบด้วยค่าความคลาดเคลื่อน (Error) และค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ซึ่งงานในด้านซึ่งตวงวัดเรากำหนดให้ค่าความไม่แน่นอนต้องมีค่าไม่เกิน 1 ใน 3 ของ MPE ตัวอย่างเช่น หากตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวชั้น 0.5 ด้วยมาตรวัดแบบมาตรา (master flowmeter) มาตรวัดแบบมาตราจะต้องมี MPE น้อยกว่า $0.5/3 = 0.166\%$ นั่นหมายถึงจะมีค่าความไม่แน่นอนไม่เกิน $0.166/3 = 0.05\%$ ตรงกับ Level 5 (per year) นั้นเองครับ



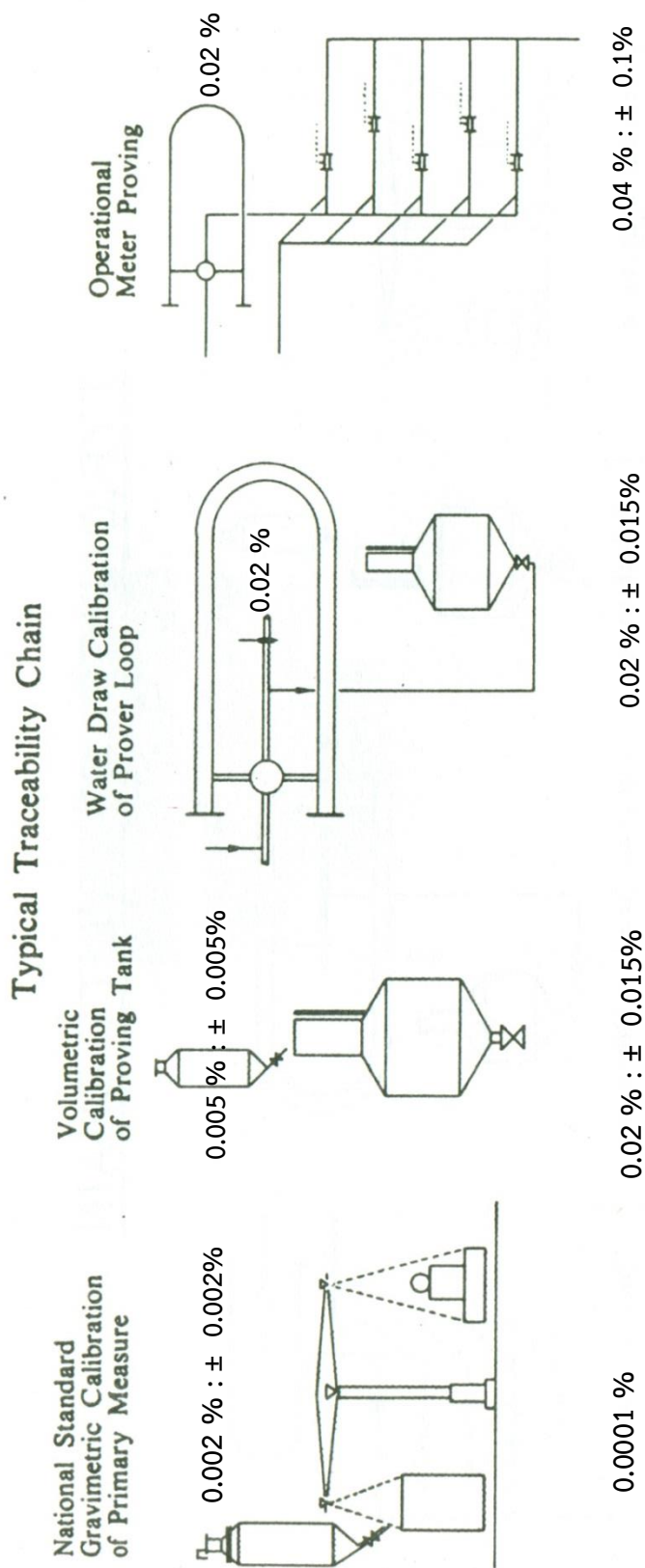
รูปที่ 9-30 แนวปฏิบัติการสอบเทียบแบบมาตราและมาตรวัดปริมาตรของเหลว แบบไทยๆ

ข้อเปรียบเทียบการใช้แบบมาตรา

ถึงแม้หัวข้อนี้จะพุดในเทอมของการสอบเทียบ เนื่องจากมีรายละเอียดปลีกย่อยที่สามารถดำเนินการได้เฉพาะในห้องปฏิบัติการ แต่โดยหลักการใดที่สามารถนำไปปรับใช้ในงานภาคสนามเพื่อการตรวจสอบให้คำรับรองหรือการตรวจสอบก็สามารถกระทำได้ด้วยเช่นกัน

Criteria	แบบมาตรา (Standards)		
	Prover Tank	Master Flowmeter	Pipe Prover
Viscosity (cSt)	0 - 5	0 - 500	0 - 500
Temperature (°C)	0 - 30	0 - 50	0 - 90
Flowrate (m ³ /hr)	0 - 300	0 - 400	0 - 1,000
Pressure (barg)	0	0 - 20	0 - 50
Products	White oils	White/Black oils	White/Black oils, LPG
Mode of Operation	● Start / Stop	● Start / Stop ● Flying	● Flying

ตารางที่ 9-1 ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้วิธีการสอบเทียบ และ/หรือตรวจสอบให้คำรับรอง



Repeatability : ± Uncertainty

รูปที่ 9-31 Typical Traceability Chain

Pulse Interpolation

Pulse interpolation เป็นเทคนิคครอบคลุมวิธีการเพิ่มความละเอียด (resolution) ของสัญญาณพัลส์ ด้านทางออกของเครื่องชั่งตวงวัด ซึ่งมีหลายเทคนิควิธีการ ในที่นี้เทคนิคดังกล่าวถูกใช้เพื่อให้สามารถสอบเทียบมาตรวัดด้วยปริมาตรของเหลวจำนวนน้อยลง มาตรวัดปริมาตรของเหลวโดยทั่วไปจะมีความละเอียดของสัญญาณพัลส์ที่ผลิตออกมาเป็นจำนวนพัลส์น้อยในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง แต่มีจำนวนพัลส์สะสมเพียงพอสำหรับให้ผลการวัดปริมาตรในคราวละหลายๆ ได้ แต่หากจำนวนสะสมสัญญาณพัลส์มีค่าน้อยเกินไปจะส่งผลต่อความแม่นยำถูกต้อง เช่น จำนวนสะสมสัญญาณพัลส์ 100 พัลส์ต่อการวัดและหากมีความผิดพลาดในการนับสัญญาณพัลส์หรือมี resolution error เพียง 1 พัลส์ก็จะทำให้มาตรวัดปริมาตรของเหลวมีผลผิดอยู่ที่ 1% ซึ่งจะไม่เป็นที่ยอมรับสำหรับมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ในการซื้อขายหรือมาตรวัดแบบมาตราด้วยเหตุนี้ในการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวจึงต้องการจำนวนสะสมสัญญาณพัลส์อย่างน้อย 10,000 พัลส์ในการวัดแต่ละครั้งเพื่อลดผลผิดให้เหลือ 0.01% ถ้าหากมีความผิดพลาดในการนับสัญญาณพัลส์หรือมี resolution error เพียง 1 พัลส์นั่นเอง ดังนั้นจึงส่งผลตามมาทำให้เราต้องจัดหาถึงตวงแบบมาตรา, เครื่องชั่งน้ำหนัก หรือแบบมาตราอื่นๆ ที่ใหญ่เพียงพอต่อการรับรองปริมาตรการวัดไม่น้อยกว่า 10,000 พัลส์ของมาตรวัดที่ต้องการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง นั้นหมายถึงค่าใช้จ่ายในการจัดสร้างอาคารตลอดจนเครื่องมืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง และฯลฯ ด้วยปัญหาและอุปสรรคดังกล่าวเพื่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (small volume prover หรือ Compact Prover) จึงถูกผลิตเข้ามาเติมเต็มช่องว่างนี้ และด้วยมีปริมาตรน้อยปัญหาจึงกลับมาอยู่ที่จำนวนสะสมสัญญาณพัลส์อย่างน้อย 10,000 พัลส์ในการวัดแต่ละครั้งอีกครั้ง ครั้นจะออกแบบมาตรวัดปริมาตรของเหลวใหม่ให้มีค่าความละเอียดสูงขึ้นคงเป็นไปได้ยาก วิธีการแก้ไขปัญหาก็เป็นการเล่นกับการเพิ่มความละเอียดของสัญญาณพัลส์เพื่อมาเทียบกับจำนวนพัลส์สะสมของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่มีอยู่จำกัดจึงเป็นคำตอบในการแก้ไขปัญหาของการทำงานทดสอบความจุขนาดเล็กเพื่อให้มีขีดความสามารถในการวัดที่มีค่าแม่นยำที่อัตราการไหลสูง ที่เรียกว่า “Pulse interpolation”

แต่ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะในกรณีสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวเทียบกับ ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (small volume prover หรือ Compact Prover) และกับ conventional pipe prover

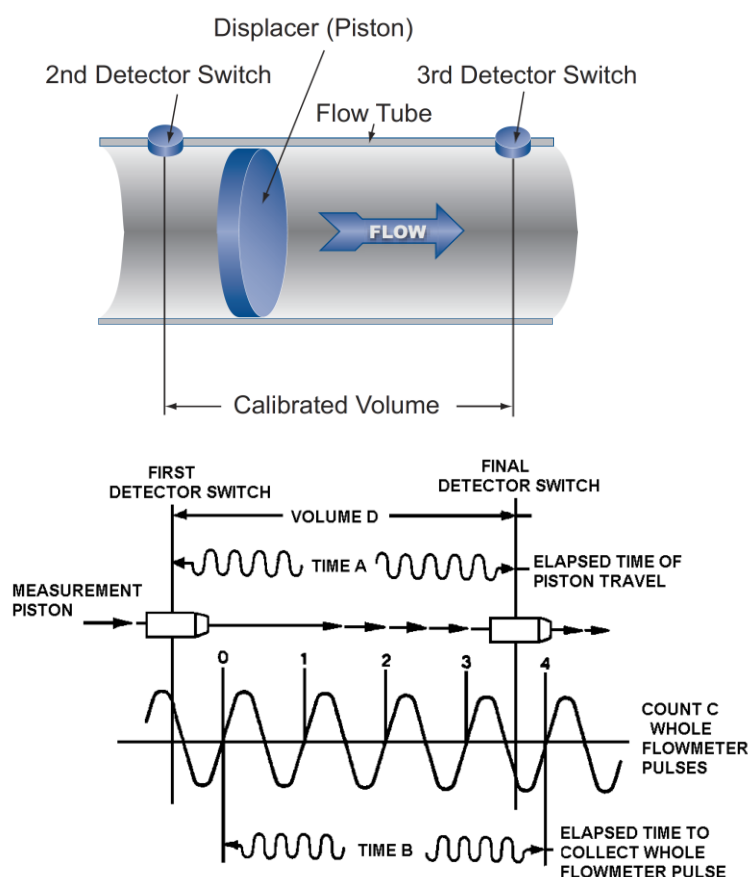
เพื่อให้การสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวด้วย pipe prover หรือ small volume prover (compact prover) มีความถูกต้องแม่นยำ จึงมีการนำ Pulse interpolation มาใช้งานซึ่ง Pulse interpolation เป็นเทคนิคในการเพิ่มความละเอียด (resolution) ของสัญญาณพัลส์ด้านทางออกของมาตรวัดปริมาตรของเหลวโดยกำหนดค่าของสัญญาณพัลส์ที่ขาดหายไป ณ ตำแหน่งเริ่มและสิ้นสุดรอบการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัด ด้วยการกระทำ

- ใช้ frequency multipliers หรือ pulse multiplication กับสัญญาณทางเข้า หรือ
- ใช้ pulse timing หรือ Timing methods ซึ่งแบ่งออกเป็น double-timing or Double chronometry กับ Quadruple-timing

แต่เทคนิคที่นิยมใช้มากที่สุดคือ double chronometry pulse interpolation ซึ่งถูกพัฒนาโดยประเทศฝรั่งเศส เริ่มต้นด้วยการสอบเทียบมาตรวัดเทอร์ไบน์เทียบกับ conventional pipe prover จนเป็นที่ยอมรับมากขึ้น

1.) **Double chronometry pulse interpolation** เป็นเทคนิคในการเพิ่มความละเอียด (resolution) ของสัญญาณพัลส์ด้านทางออกของมาตรวัดปริมาตรของเหลวในระดับทศนิยม โดยตัว Quartz-

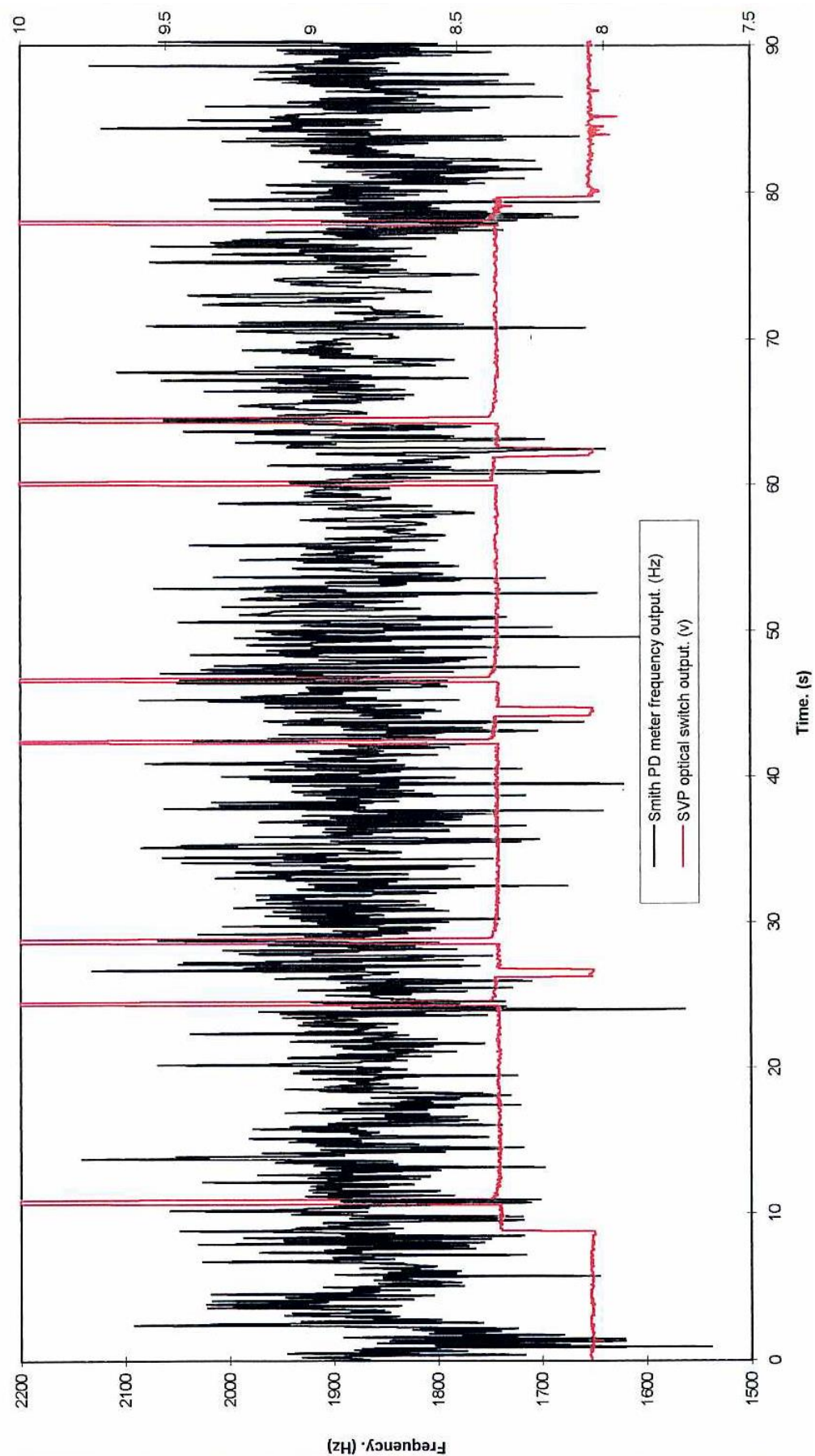
Crystal ทำหน้าที่เป็นนาฬิกาความเที่ยงสูง (high precision clock) ซึ่งใช้ควบคุมสัญญาณนาฬิกา (clock pulses) ที่มีความเที่ยงด้วยความถี่สูงประมาณ 150,000 Hz ถือเป็นเวลามาตรฐาน (time measurement standard) ส่งผลให้เพิ่มความละเอียดแม่นยำของเวลาสูงถึง 0.000001 ต่อวินาที หรือ 1 ใน 100,000 ส่วน ในการทำงานร่วมตัวนับสัญญาณรวมจากมาตรวัด 1 ตัวกับตัวนับสัญญาณ (counter) 2 ตัว เพื่อประเมินเศษส่วนของสัญญาณพัลส์ซึ่งสูญเสียหรือได้มา (loss or gained pulses) ณ ตำแหน่งเริ่มต้นและสิ้นสุดรอบการสอบเทียบ เราพิจารณารูปที่ 9-32 ได้ว่า



รูปที่ 9-32 Double Chronometry Pulse Interpolation

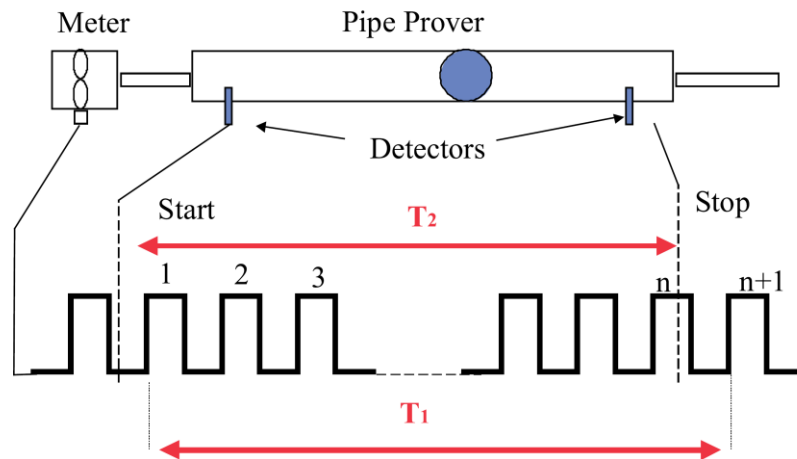
ตัวนับสัญญาณ (pulse counter) ตัวที่ 1 เริ่มนับสัญญาณพัลส์เมื่อตัวตรวจจับตัวกวาด (detector) ตัวที่ 1 ถูกกระตุ้นทำงาน (trigger) และตัวนับสัญญาณตัวที่ 2 จะเริ่มนับสัญญาณพัลส์หลังจากตัวนับสัญญาณตัวที่ 1 ทำงาน โดยเริ่มที่จุดเริ่มต้นของสัญญาณพัลส์แรกสุดของมาตรวัดของเหลวหลังจากตัวนับสัญญาณตัวที่ 1 ทำงาน (“0”) เมื่อเวลาผ่านไปตัวนับสัญญาณตัวที่ 1 ถูกให้หยุดทำงานลงเมื่อตัวตรวจจับตัวกวาด (detector) ตัวที่ 2 ถูกกระตุ้นทำงาน มีระยะเวลาเท่ากับ Time “A” หรือ T_2 ผลตามมาทำให้ตัวนับสัญญาณตัวที่ 2 หยุดนับสัญญาณพัลส์ทันทีหลังจากตัวนับสัญญาณตัวที่ 1 หยุดทำงาน ณ ที่จุดเริ่มต้นของสัญญาณพัลส์แรกสุดของมาตรวัดของเหลวหลังจากตัวนับสัญญาณตัวที่ 1 หยุดทำงาน (“4”) มีระยะเวลาเท่ากับ Time “B” หรือ T_1 เราสามารถดูลักษณะตัวอย่างจริงๆ ของสัญญาณพัลส์ของมาตรวัด PD เทียบกับ Small Volume Prover (SVP) ดังในรูปที่ 9-33 โดยสัญญาณจากตัวนับสัญญาณตัวที่ 1 และ 2 เป็นพัลส์โดดๆ ติดกันในการเริ่มต้นและสิ้นสุดการนับ

Figure 21. Smith Positive Displacement meter.
SVP optical measurement switch tests.



รูปที่ 9-33 ตัวอย่างสัญญาณพัลส์ของมาตรวัด PD เทียบกับ Small Volume Prover (SVP) (NEL)

จากรูปที่ 9-34 สัญญาณพัลส์ที่นับได้เป็นจำนวนเต็มจะถูกนับไว้ก่อน n พัลส์ และจำนวนเต็มของสัญญาณพัลส์ซึ่งนับได้นี้จะถูกคูณด้วย “interpolation factor” สำหรับ interpolation factor นั้นหาได้จากอัตราส่วนระหว่างระยะเวลาระหว่างตัวตรวจจับตัวกวาด (detector) 2 ตัว (T_2) เทียบกับระยะเวลาระหว่างพัลส์ตัวแรกหลังจากตัวตรวจจับตัวกวาดตัวแรกเริ่มทำงานกับพัลส์ตัวแรกหลังจากตัวตรวจจับตัวกวาดตัวสุดท้ายหรือตัวที่ 2 ทำงาน (T_1)



รูปที่ 9-34 การนับระยะเวลาใน Double Chronometry Pulse Interpolation เทียบกับ CPP

$$n' = n \times \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad (\text{Eq.9-2})$$

- เมื่อ n' = Interpolated' pulse count (ค่ามีเศษเป็นทศนิยม ต้องปัดให้เหลือทศนิยม 5 ตำแหน่งตาม ISO 7278/3)
- n = จำนวนสัญญาณพัลส์ที่นับได้เป็นจำนวนเต็มทั้งหมดของมาตรวัด
- T_2 = ระยะเวลาระหว่างระหว่างตัวตรวจจับตัวกวาดตัว 2 ตัว
- T_1 = ระยะเวลาระหว่างพัลส์ตัวแรกหลังจากตัวตรวจจับตัวกวาดตัวแรกเริ่มทำงานกับพัลส์ตัวแรกหลังจากตัวตรวจจับตัวกวาดตัวสุดท้ายหรือตัวที่ 2 ทำงาน

โดยมีเงื่อนไข

ดังนั้น

$$\frac{n}{f_m} \geq \frac{20,000}{f_C}$$

และ

$$f_C \geq \frac{20,000}{n} f_m$$

- เมื่อ T_C = คาบเวลาอ้างอิง (reference period) ของสัญญาณนาฬิกา ซึ่งส่วนกลับของ T_C เป็นค่าความถี่นาฬิกา f_C
- f_m = ความถี่ทดสอบสูงสุดของมาตรวัดปริมาตรของเหลว
- f_C = ความถี่สัญญาณนาฬิกา เช่น 150,000 Hz

เมื่อใช้อัตราส่วนเวลาตัวนับสัญญาณตัวที่ 1 เทียบกับเวลาตัวนับสัญญาณตัวที่ 2 จะทำให้การนับเศษส่วนของสัญญาณของมาตรวัดของเหลวแม่นยำสูงมาก ดังสมการ Eq.9-2 ซึ่งเราจะได้ค่าจำนวนสัญญาณพัลส์ละเอียดระดับจุดทศนิยมละเอียดถึง 5 ตำแหน่ง (n') และนำไปสู่การหาค่า เค-แฟคเตอร์ (K-factor) ของมาตรวัดตามนิยามได้ว่า

$$K = \frac{n'}{BV_p} = \frac{\text{Time "A" or } T_2}{\text{Time "B" or } T_1} \times \frac{n}{BV_p} \quad (\text{Eq.9-3})$$

เมื่อ	K	คือ	K-Factor ของมาตรวัดปริมาตรของเหลว (flowmeter), pulses/ลิตร
	A or T ₂	คือ	ระยะเวลาระหว่างระหว่างตัวตรวจจับตัวกวาดตัว 2 ตัว
	B or T ₁	คือ	ระยะเวลาระหว่างพัลส์ตัวแรกหลังจากตัวตรวจจับตัวกวาดตัวแรกเริ่มทำงานกับพัลส์ตัวแรกหลังจากตัวตรวจจับตัวกวาดตัวสุดท้าย ทำงาน
	n	คือ	จำนวนสัญญาณพัลส์ที่นับได้เป็นจำนวนเต็มทั้งหมดของมาตรวัด
	BV _p	คือ	ปริมาตรระหว่างตัวตรวจจับตัวกวาดตัว 2 ตัว

เทคนิค double chronometry นี้ใช้ได้ดีต่อเมื่อความถี่ของสัญญาณพัลส์ หรือคาบของสัญญาณพัลส์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวมีค่าคงที่ แต่หากคาบของสัญญาณพัลส์แต่ละสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปมากกว่า 5-10% แล้วจะทำให้ผลการวัดได้ค่า repeatability ไม่ดี (รูปที่ 9-35) ในทางปฏิบัติเนื่องจากมาตรวัดแต่ละชนิดแต่ละผู้ผลิตมีขีดความสามารถในการจัดการสัญญาณพัลส์ที่แตกต่างกันจึงทำให้คุณภาพและรูปแบบสัญญาณพัลส์ด้านทางออกของมาตรวัดปริมาตรของเหลวแต่ละตัวมีความแตกต่างกัน สาเหตุที่ก่อให้เกิดความถี่ของสัญญาณพัลส์ หรือคาบของสัญญาณพัลส์ของมาตรวัดไม่คงที่และส่งผลให้การทำงานของ pulse interpolation ระหว่างสอบเทียบหรือตรวจสอบให้คำรับรองไม่แม่นยำมีค่าความคลาดเคลื่อนพบได้จากหลายสาเหตุ เช่น อัตราการไหลผ่านมาตรวัดและท่อทดสอบความจุขนาดเล็กไม่สม่ำเสมอ การทำงานของชิ้นส่วนกลไกไม่คงที่ เช่น ลูกปืนของโรเตอร์ในมาตรวัดเทอร์ไบน์เริ่มเสื่อม ระยะห่างระหว่างปลายใบพัดมาตรวัดเทอร์ไบน์ หรือ blade มาตรวัดปริมาตรของเหลวชนิด PD ห่างจากผนังห้องวัดไม่สม่ำเสมอเมื่อมีการหมุน เป็นต้น


Uniform Pulse Train

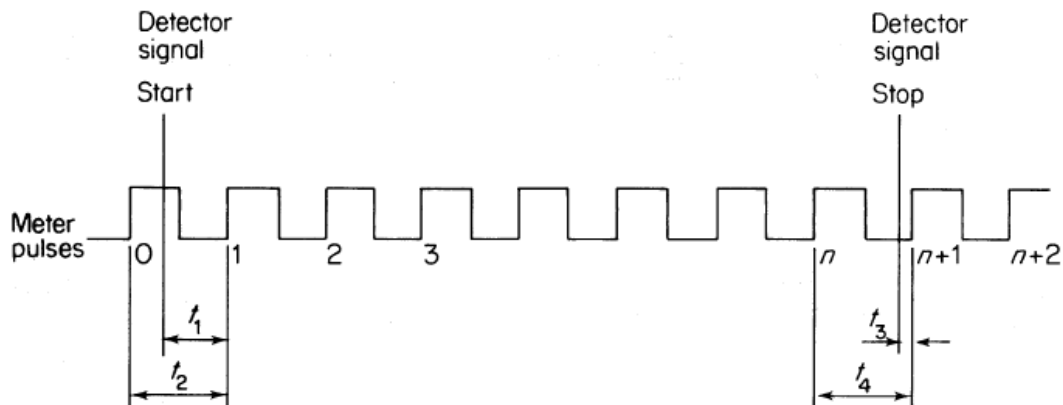

Non-uniform Pulse Train with Interpulse Deviations


Non-uniform Pulse Train with Pulse Rate Modulations


Pulse Train with Pulse Burst

รูปที่ 9-35 รูปแบบสัญญาณพัลส์ (Pulse Train Types)

2.) **Quadruple-timing pulse interpolation** เป็นเทคนิคที่มีการทำงานที่ซับซ้อนมากกว่า Double chronometry pulse interpolation ดูรูปที่ 9-36



รูปที่ 9-36 การนับระยะเวลาใน Quadruple-timing pulse interpolation

$$n' = n + \left(\frac{t_1}{t_2} \right) - \left(\frac{t_3}{t_4} \right) \quad (\text{Eq.9-4})$$

- เมื่อ n' = Interpolated' pulse count (มีเศษเป็นทศนิยม)
 n = จำนวนสัญญาณพัลส์ที่นับได้เป็นจำนวนเต็มทั้งหมดของมาตรวัด
 t_1 = ระยะเวลาระหว่างตัวตรวจจับตัวกวาดตัวแรกเริ่มทำงานจนถึงพัลส์ตัวแรกของมาตรวัด
 t_2 = ระยะเวลาระหว่างพัลส์ตัวแรกก่อนตัวกวาดตัวแรกทำงาน
 t_3 = ระยะเวลาระหว่างตัวตรวจจับตัวกวาดตัวที่ 2 ทำงานจนถึงพัลส์ตัวแรกหลังจากตัวตรวจจับตัวกวาดตัวที่ 2 ทำงาน
 t_4 = ระยะเวลาระหว่างพัลส์ตัวสุดท้ายของมาตรวัดก่อนตัวกวาดตัวที่ 2 ทำงาน

โดยมีเงื่อนไข

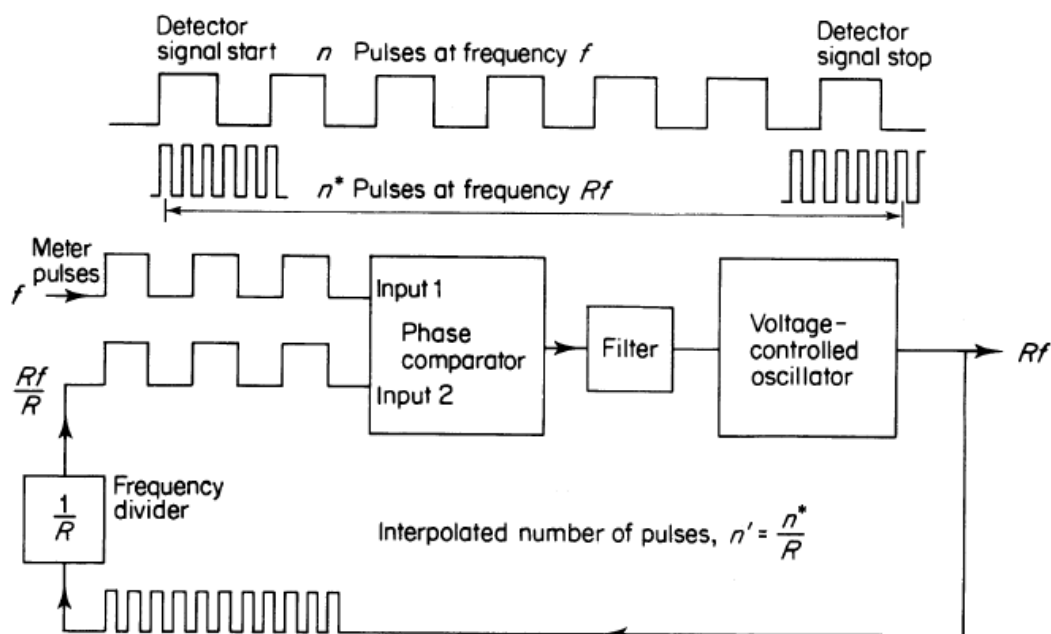
ดังนั้น
$$\frac{n}{f_m} \geq \frac{40,000}{f_C}$$

และ
$$f_C \geq \frac{40,000}{n} f_m$$

- เมื่อ T_C = คาบเวลาอ้างอิง (reference period) ของสัญญาณนาฬิกา ซึ่งส่วนกลับของ T_C เป็นค่าความถี่นาฬิกา f_C
 f_m = ความถี่ทดสอบสูงสุดของมาตรวัดปริมาตรของเหลว
 f_C = ความถี่สัญญาณนาฬิกา

3.) **Pulse multiplication** สัญญาณจากมาตรวัดถูกส่งเข้าไปยังขา A ของ phase comparator ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะผลิตแรงดันไฟฟ้า (voltage) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างค่าความถี่ที่ป้อนเข้ามาอีกขาข้างหนึ่งคือขา B (ดูรูปที่ 9-37) แรงดันไฟฟ้าต้องผ่าน Filter ก่อนถูกส่งไปยัง Voltage controlled oscillator (VCO) ส่งผลให้ผลิตค่าความถี่ที่เป็นสัดส่วนกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามา สัญญาณด้านทางออกจาก VCO จะถูก

ส่งป้อนย้อนกลับไปยังตัว Frequency divider ไปยัง ขา B ของ phase comparator ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าจากการทำงานของ phase comparator เปลี่ยนไปจนกระทั่งผลต่างค่าความถี่ที่ป้อนเข้ามาทั้ง 2 ขาตรงกัน แพลคเตอร์ที่ได้จากตัว Frequency divider จะเป็น multiplication factor ของระบบ ในการเลือกความถี่ของตัว Frequency divider จึงเป็นการหา pulse interpolation divisor นั้นเอง ถ้าอ่านไม่เข้าใจก็เปิด google นะ



รูปที่ 9-37 การทำงานของ Pulse multiplication หรือ Phase-locked-loop method

ค่าเค - แพลคเตอร์ (K - Factor)

เนื่องจากมาตรวัดที่สามารถนำมาสอบเทียบด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก, เทียบกับมาตรวัดแบบมาตรา, หรือเทียบกับท่อทดสอบความจุขนาดเล็กหรือท่อทดสอบความจุ (pipe prover) เป็นแบบมาตรวัดดังกล่าวนี้ต้องเป็นมาตรวัดปริมาตรของเหลวซึ่งมีหลักการทำงานให้ผลการแสดงค่าการวัดโดยใช้การแปลงสัญญาณพัลส์จากมาตรวัดปริมาตรของเหลวเปลี่ยนเป็นค่าปริมาตรที่วัดได้ ดังนั้นการปรับแปลงค่าการแสดงค่าที่วัดได้ของมาตรวัดจึงจำเป็นต้องทำการปรับค่าการแปลงสัญญาณพัลส์ของมาตรวัดนั้นๆ ก็คือ ค่าเค - แพลคเตอร์ (K - Factor) นั้นเอง แต่ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าเค - แพลคเตอร์ของมาตรวัดซื้อขายที่ตามมาก็คือทำให้ผลการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองครั้งนั้นได้ค่ามิเตอร์แพลคเตอร์ค่าใหม่ต่างจากค่าเดิม ด้วยเหตุนี้ในส่วนการคำนวณผลการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองจึงเป็นการหาค่า K - Factor ที่ถูกต้องเพื่อนำไปปรับค่า K - Factor ซึ่งทางบริษัทผู้ผลิตได้ให้มาประจำตัวมาตรวัดจากโรงงานก่อนหน้านี้ เพื่อให้ได้ค่ามิเตอร์แพลคเตอร์ (meter factor; MF) ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายถูกต้องใกล้เคียง 1.0000

เมื่อนับสัญญาณพัลส์ซึ่งมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายสร้างขึ้นขณะที่ของเหลวไหลผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรมาตรฐาน (base volume) ของท่อทดสอบความจุ (pipe prover) หรือของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (compact prover) หรือของมาตรวัดแบบมาตรา (Master Flowmeter) หลังทำการปรับค่าปริมาตรไปยังสภาวะมาตรฐานหรือสภาวะอ้างอิง ก็จะได้ค่าเค - แพลคเตอร์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่สภาวะอ้างอิง

จากนิยามของค่าเค - แฟคเตอร์

$$K - \text{Factor} = \frac{n'}{V_m} \quad (\text{Eq.9-5})$$

เมื่อ n' = Interpolated' pulse count (มีเศษเป็นทศนิยม)

V_m = ปริมาณของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายในขณะเดียวกัน
ได้จากแบบมาตรา เช่น ท่อทดสอบความจุ (Pipe Prover), ท่อทดสอบความจุ
ขนาดเล็ก (Compact Prover) หรือมาตรวัดแบบมาตรา (Master Flowmeter)

ด้วยเหตุนี้ในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายด้วยวิธีนี้จึงเหมาะสมกับมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายซึ่งสามารถผลิตสัญญาณพัลส์ขณะทำการวัดปริมาตรแล้วส่งสัญญาณพัลส์ดังกล่าวไปประมวลผลแปลงสัญญาณพัลส์เป็นปริมาตรของเหลวที่วัดได้ หากมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายซึ่งมีการแสดงผลการวัดปริมาตรเป็นแบบกลไกจึงไม่เหมาะที่จะใช้วิธีสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายด้วยท่อทดสอบความจุ, ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก หรือมาตรวัดแบบมาตรา ต้องปรับเปลี่ยนวิธีการไปใช้สอบเทียบด้วยถังตวงแบบมาตราแทน เป็นต้น

ในบทนี้เราจะพิจารณาการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวเทียบกับมาตรวัดแบบมาตรา (Master Flowmeter) และ ท่อทดสอบความจุ (Pipe Prover), ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Compact Prover) ดังนี้

การสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวเทียบกับมาตรวัดแบบมาตรา (Master Meter Comparison)

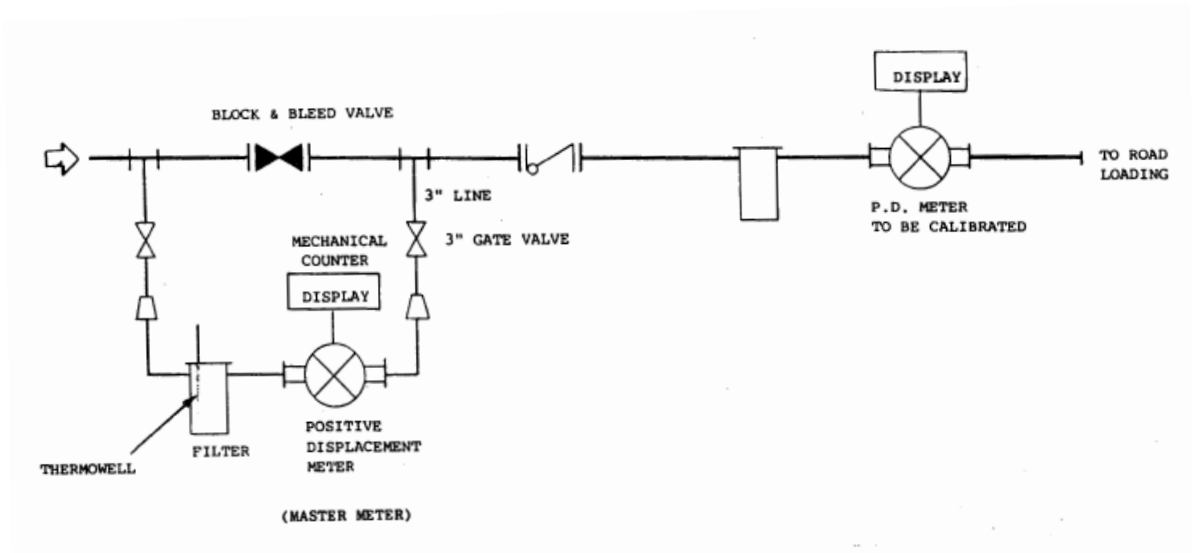
1. การเตรียมการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลว

1.1. ก่อนที่เริ่มดำเนินการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายควรตรวจสอบ strainer หรือ filters ซึ่งอยู่ตำแหน่งก่อนทางเข้ามาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายว่ามีความสะอาดพอที่ไม่ไปลดอัตราการไหลผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายตามที่กำหนดไว้ ตรวจสอบได้จากความดันตกคร่อม (pressure drop) ของตัว strainer, ตรวจสอบความดันและอุณหภูมิภายในระบบท่อและระบบมาตรวัด (meter run) ว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าซึ่งมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายทำงานปกติหรือไม่, ตรวจสอบระบบป้องกันไฟฟ้าสถิต, สายกราวด์ของทั้งมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายและมาตรวัดแบบมาตราเพื่อป้องกันการระเบิดที่อาจมีขึ้นได้, ตลอดจนการรั่วไหลของระบบท่อ ตามข้อต่อ ข้องอ หน้าแปลน เป็นต้น

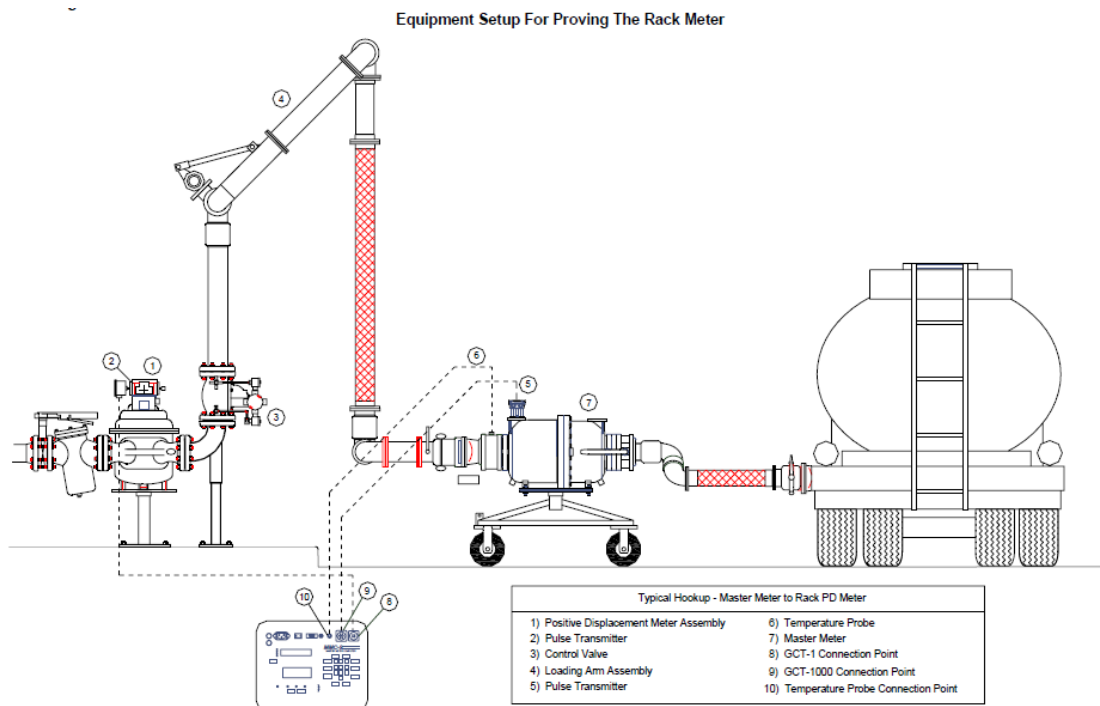
1.2. การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายด้วยมาตรวัดแบบมาตราควรมีลักษณะการติดตั้งแบบอนุกรม โดยมาตรวัดแบบมาตราติดตั้งทางด้าน downstream ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ต้องการตรวจสอบ แต่ถ้าหากมีความจำเป็นต้องอยู่ทางด้าน upstream ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ต้องการตรวจสอบก็ต้องจัดหาอุปกรณ์ควบและอุปกรณ์เสริมให้เช่นเดียวกับของมาตรวัดปริมาตรของเหลวนั้นๆ ด้วย เช่น Strainer ดังรูปที่ 9-38 โดยควรทำ wet run ก่อนการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองจริง กับมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายและมาตรวัดแบบ

มาตราด้วยปริมาตรของเหลวโดยประมาณ 220 - 450 ลิตร เพื่อตรวจสอบสภาวะการทำงานคล้ายใกล้เคียง สภาวะการใช้งานจริงหรือไม่ โดยตรวจ

- 1.2.1. อัตราการไหล (flow rate)
- 1.2.2. ความดันภายในระบบท่อ (line pressure) และระบบมาตรวัด
- 1.2.3. อุณหภูมิภายในระบบท่อ
- 1.2.4. การรั่วไหลของระบบท่อ
- 1.2.5. ให้ทำการระบายอากาศและไอของเหลวจากระบบให้หมด



รูปที่ 9-38 หากจำเป็นต้องติดตั้ง master meter ทางด้าน Upstream ต้องจัดให้มี gas eliminator, strainer ก่อนทางเข้าและ Check valve หลังทางออก



รูปที่ 9-39 ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวประจำ Truck Loading ด้วยมาตรวัดแบบมาตรา

1.3. ในทางปฏิบัติพบว่า มาตรฐานวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายควรได้รับการพิจารณารับการซ่อมแซมหากพบค่าผลผลิต (error) เกินมากกว่าค่า $\pm 0.3\%$ (ตัวมาตรฐานวัด ไม่ใช่ระบบการวัดปริมาตรของเหลว) หรือมีค่าช่วงความสามารถทำซ้ำได้ (repeatability) เกินกว่า 0.1% ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสาเหตุของกลไกการสีกหรือทำงานผิดพลาดภายในตัวมาตรฐานวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย

1.4. สำหรับมาตรฐานวัดแบบมาตรา (master meter) นั้นก่อนที่จะนำมาใช้เพื่อสอบเทียบมาตรฐานวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายควรได้รับการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองด้วยของเหลวตัวกลางชนิดเดียวกับที่ใช้กับมาตรฐานวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายด้วยถังตวงแบบมาตรา (prover tank) จึงจะให้ผลการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรฐานวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่มีความแม่นยำถูกต้อง

1.5. เนื่องจากการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรฐานวัดปริมาตรของเหลวเป็นการตรวจสอบมาตรฐานวัดปริมาตรของเหลวอื่นๆ ว่ายังคงมีสมรรถนะในการวัดเป็นไปหรือใกล้เคียงกับสมรรถนะของมาตรฐานวัดที่ได้รับการออกแบบไว้ ดังนั้นการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองจึงเป็นการเปรียบเทียบกับ Performance Curve ของมาตรฐานวัดปริมาตรของเหลวที่ต้องการสอบเทียบ หรือตรวจสอบให้คำรับรองเทียบกับ Performance Curve ของมาตรฐานวัดแบบมาตรานั้นเอง ด้วยเหตุนี้ค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) ของมาตรฐานวัดแบบมาตราจึงต้องทราบค่าครอบคลุมช่วงอัตราการไหลการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรฐานวัดปริมาตรของเหลวดังกล่าว เพราะในขั้นตอนการคำนวณเราทำการคูณ meter factor ของมาตรฐานวัดแบบมาตราเข้ากับผลการวัดได้ของมาตรฐานวัดแบบมาตรา นั้นหมายถึงมาตรฐานวัดแบบมาตรามีค่าผลผลิต (meter error) เท่ากับศูนย์ เราจึงยอมให้มาตรฐานวัดปริมาตรของเหลวมีผลผลิตตามขั้นความเที่ยง 0.5 เมื่อเทียบกับมาตรฐานวัดแบบมาตรา

2. การคำนวณผลการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรฐานวัดปริมาตรของเหลว

2.1. พิจารณาตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{tw} , C_{ts} , C_{ps} , C_{tl} , และ C_{pl}

เนื่องจากการซื้อขายผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมจะคิดปริมาตรที่ความดันบรรยากาศ (P_{atm}) และอุณหภูมิอ้างอิง (T_0) จึงจำเป็นต้องทำการแก้ไขปรับค่าปริมาตรที่อ่านได้ทั้งจากมาตรฐานวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (flowmeter) และมาตรฐานวัดแบบมาตรา (master meter) ไปที่สถานะมาตรฐานหรืออ้างอิงของการซื้อขายผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ณ อุณหภูมิอ้างอิง T_0 และ ความดันบรรยากาศ P_{atm} เดียวกันจึงจะสามารถเปรียบเทียบปริมาตรกันได้

2.1.1. เมื่ออุณหภูมิของมาตรฐานวัดแบบมาตรา (master meter) ไม่เท่ากับอุณหภูมิของมาตรฐานวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (flowmeter) ($T_{MM} \neq T_m$)

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{ts}

- C_{tsm} สามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากตัวเรือนมาตรฐานวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (flowmeter) มีการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิน้อยมาก
- C_{tsMM} สามารถตัดทิ้งได้ เพราะว่าตัวเรือนมาตรฐานวัดแบบมาตรา (master meter) ขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิน้อยมาก

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{tl}

- C_{tlm} นำมาพิจารณา

- C_{dMM} นำมาพิจารณา เนื่องจากของเหลวตัวกลางที่ใช้ในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดทั้งสองเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{tw}

- C_{tw} ไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากของเหลวตัวกลางสำหรับการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ไม่ใช่ น้ำบริสุทธิ์

2.1.2. เมื่อความดันภายในมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (flowmeter) ไม่เท่ากับ ความดันภายในมาตรวัดแบบมาตรา อีกทั้งความดันภายในมาตรวัดทั้ง 2 มีค่าไม่เท่ากับ ความดันอ้างอิงซึ่งมีค่า เท่ากับความดันไอสมดุล ณ อุณหภูมิที่วัดได้ของเหลวภายในมาตรวัดทั้งสองขณะทำการวัด (equilibrium vapor pressure at the measurement temperature of the liquid being measured) สำหรับผลิตภัณฑ์ ปิโตรเลียมค่าความดันไอสมดุลดังกล่าวมีค่าเท่ากับ ความดันบรรยากาศ P_{atm} นั้นเอง ($P_m \neq P_{MM} \neq P_{atm}$)

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{ps}

- C_{psm} สามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากตัวเรือนมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (flowmeter) มีการขยายตัวเนื่องจากความดันน้อยมาก
- C_{psMM} สามารถตัดทิ้งได้ เนื่องจากตัวเรือนมาตรวัดแบบมาตรา (master meter) มีการขยายตัวเนื่องจากความดันน้อยมาก

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{pl}

- C_{plm} นำมาพิจารณาเพราะความดันซึ่งกระทำต่อของเหลวมีผลต่อปริมาตร
- C_{plMM} นำมาพิจารณาเหตุผลเช่นเดียวกัน

∴ สิ่งที่จะต้องนำมาคิดคำนวณทั้งหมดคือ

$$\frac{C_{plMM}}{C_{plm}} \frac{C_{dMM}}{C_{dlm}}$$

2.2. การคำนวณหาค่าปริมาตรของมาตรวัดปริมาตรของเหลวและมาตรวัดแบบมาตรา

เมื่อทราบถึงตัวแปรแก้ไขปริมาณที่มีผลต่อปริมาตรของเหลวที่อ่านค่าได้จากทั้งมาตรวัดปริมาตรของเหลว ที่ใช้ซื้อขายและมาตรวัดแบบมาตรา จากนั้นทำการแปลงค่าปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดแบบมาตรา V_{MMr} และมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย V_{mr} (indicated volume) ที่สภาวะทำงานจริง (operating condition) ไปเป็นค่าปริมาตรของเหลวที่ค่าสภาวะอ้างอิง (T_0 , P_{atm})

• สำหรับมาตรวัดแบบมาตรา (Master Meter)

แปลงค่าปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดแบบมาตรา (master meter); V_{MMr} ที่อุณหภูมิ T_{MM} และความดัน P_{MM} ไปเป็นค่าปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง T_0 ขณะมีความดัน P_{MM} อันเนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลต่อ ของเหลวตัวกลางที่ใช้ในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง แต่เนื่องจากมาตรวัดแบบมาตรามี มิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor; MF_{MM} ; at standard condition) ติดมากับมาตรวัดแบบมาตราอยู่แล้วต้อง ทำการปรับค่าปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดแบบมาตราด้วยค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ จึงทำให้

$$V_{0MM} = V_{MMr} \times MF_{MM} \times C_{dMM} \quad (Eq.9-6)$$

จากนั้นแปลงค่าปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง T_0 และความดัน P_{MM} ไปเป็นค่าปริมาตรที่ความดันบรรยากาศ P_{atm} และที่อุณหภูมิอ้างอิง T_0 ด้วย

$$V_{0MM} = V_{0PMM} \times C_{plMM} \quad (\text{Eq.9-7})$$

ดังนั้นแทนค่าสมการ (Eq-9-6) ลงในสมการ (Eq-9-7)

$$V_{0MM} = V_{MMr} \times MF_{MM} \times (C_{dMM} \times C_{plMM}) \quad (\text{Eq.9-8})$$

● สำหรับมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (Flowmeter)

แปลงค่าปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย V_{mr} เมื่ออุณหภูมิภายในมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายเป็น T_m และความดันภายในมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย P_m ไปเป็นค่าปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง T_0 ขณะที่มีความดัน P_m ด้วย

$$V_{0Pm} = V_{mr} \times C_{dmm} \quad (\text{Eq.9-9})$$

ในที่นี้เราจะเห็นว่าไม่ได้ทำการคูณค่าปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายด้วยมิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดเนื่องจากเรายังไม่ทราบค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ดังกล่าว ดังนั้นเพื่อจะหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายตามค่านิยาม จึงต้องทำการปรับค่าปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายไปยังสภาวะอ้างอิงเสียก่อน

หลังจากนั้นจึงทำการแปลงค่าปริมาตรจากที่อ่านได้จากมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายอุณหภูมิ T_0 ความดัน P_m ไปเป็นค่าปริมาตรของเหลวที่ความดันบรรยากาศ P_{atm} และที่อุณหภูมิ T_0 ด้วยสมการ

$$V_{0m} = V_{0Pm} \times C_{plm} \quad (\text{Eq.9-10})$$

ดังนั้นปริมาตรของของเหลวสารตัวกลางที่ใช้ในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง จะไหลผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (flowmeter) เมื่ออุณหภูมิ T_0 และความดัน P_{atm} หรือสภาวะอ้างอิงหรือสภาวะมาตรฐาน คือ

$$V_{0m} = V_{mr} \times C_{dmm} \times C_{plm} \quad (\text{Eq.9-11})$$

3. การหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (Meter factor)

ในทางปฏิบัติ การหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่ทำการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองกับมาตรวัดแบบมาตรานั้น เราทำการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายดังกล่าวที่สภาวะใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานจริงของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายให้มากที่สุด เพื่อให้ได้ค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายนั้นสำหรับแสดงค่าการวัดปริมาตรที่ให้ค่าความแม่นยำมากที่สุด

แต่พบว่าระหว่างทำการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง (proving) อุณหภูมิและความดันภายในมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายและแบบมาตรามีผลกระทบอย่างมากต่อการคำนวณหามิเตอร์แฟค

เตอร์ ดังนั้นเพื่อให้เป็นมาตรฐานการปฏิบัติเดียวกันจึงให้ค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่สภาวะอ้างอิงหรือสภาวะมาตรฐาน @T₀, P_{atm} ดังนี้

$$MF = \frac{V_{pc}}{V_{mc}} \quad (\text{Eq.9-12})$$

เมื่อ MF = มิเตอร์แฟคเตอร์มาตรฐาน (standard meter factor) หรือ Mechanical meter factor

V_{pc} = ปริมาตรของเหลวภายในแบบมาตราแก้ไขค่าไปยังสภาวะมาตรฐาน (30°C, 0.0 psig)

V_{mc} = ปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดแก้ไขค่าไปยังสภาวะมาตรฐาน (30 °C, 0.0 psig)

ด้วยเหตุนี้ค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (flowmeter) ที่ @T₀, P_{atm} จึงมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} MF_m(@T_0, P_{atm}) &= \frac{V_{0MM}}{V_{0m}} \\ &= \frac{V_{MMr} \times MF_{MM} \times (C_{dMM} \times C_{plMM})}{V_{mr} \times (C_{dIm} \times C_{plm})} \end{aligned} \quad (\text{Eq.9-13})$$

หรือพูดอีกนัยหนึ่งว่าที่สภาวะอ้างอิงปริมาตรของเหลวซึ่งไหลผ่านมาตรวัดแบบมาตรามีค่าเท่ากับปริมาตรของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายคูณด้วยค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย

$$V_{0m} \times MF_m = V_{0MM} \quad (\text{Eq.9-14})$$

การแสดงค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ MF_m ควรแสดงค่า **ทศนิยม 4 ตำแหน่ง** แต่มีการขอให้แสดงค่าทศนิยม 5 ตำแหน่งโดยให้เหตุผลว่าต้องการทราบว่าทศนิยมตำแหน่งที่ 4 นั้นเป็นค่าอ่อนหรือค่าแก่ เช่น 0.99936 หรือ 0.99944 ซึ่งจะถูกปัดทศนิยมเป็น 0.9994 ดังนั้นซึ่งดวงวัดจึงขอรายงานเป็น 5 ทศนิยมก็แล้วกัน

แต่หากต้องการค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่สภาวะการทำงานหรือสภาวะการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองที่ @T_m, P_m ซึ่งไม่จำเป็นต้องทำการปรับค่าปริมาตรที่อ่านได้ด้วยตัวแปร C_{dIm}, C_{plm} แต่อย่างไรก็ตามหาได้จาก

$$MF_{m(oc)}(@T_m, P_m) = \frac{V_{0MM}}{V_{mr}} \quad (\text{Eq.9-15})$$

เมื่อ MF_{m(oc)} = มิเตอร์แฟคเตอร์มาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย ณ สภาวะการทำงานจริง

V_{0MM} = ปริมาตรจริงที่ผ่านมาตรวัดแบบมาตรา ณ.สภาวะอ้างอิง หรือสภาวะมาตรฐาน

V_{mr} = ปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย ที่สภาวะการทำงาน
ของมาตรวัด

ด้วยเหตุนี้เมื่อนำมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายไปใช้งานที่สภาวะการทำงานจริง หลังจากอ่านค่าปริมาตรจริงที่มาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายวัดได้มีค่าเท่ากับ V_{mr(oc)} เราสามารถหาปริมาตรจริงที่ไหลผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย ณ สภาวะอ้างอิงหรือสภาวะมาตรฐาน จึงมีค่าเท่ากับ

$$V_{0m} = MF_{m(oc)} \times V_{mr(oc)} \quad (\text{Eq.9-16})$$

แต่ก็ต้องระมัดระวังด้วยว่ามาตรวัดปริมาณของเหลวที่ใช้ซื้อขายได้ทำงานที่สภาวะใกล้เคียงจริงๆ กับสภาวะที่ทำการหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ อีกทั้งได้ทำการวัดของเหลวชนิดเดียวกับที่ใช้เป็นของเหลวตัวกลางในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาณของเหลวที่ใช้ซื้อขายดังกล่าวด้วย ดังนั้นการใช้สมการ (Eq.9-15) และสมการ (Eq.9-16) จำเป็นต้องระมัดระวังด้วยในทางปฏิบัติ แต่แนะนำสมการ (Eq.9-1) ถึงแม้ในทางหลักการแล้วค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ไม่ควรเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม

4. การหาค่าผลผิดของมาตรวัดปริมาณของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (Meter Error)

โดยปกติการแสดงค่าผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อนของการวัดปริมาณของมาตรวัดปริมาณของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (flowmeter) จะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์เทียบกับแบบมาตรา ดังนั้นเราสามารถหาค่าได้จาก

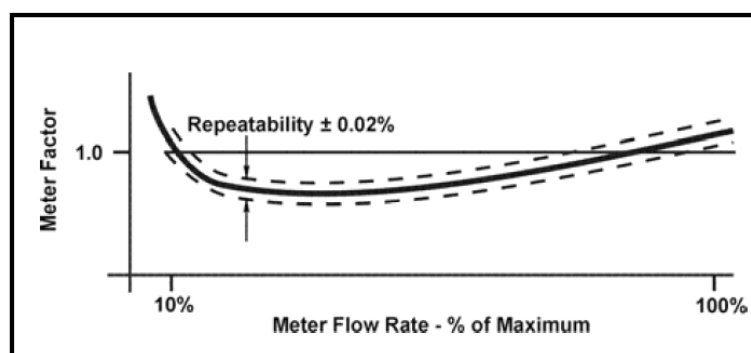
$$\begin{aligned}\% \text{Error} (@ T_0, P_{\text{atm}}) &= \frac{V_{0m} - V_{0MM}}{V_{0MM}} \times 100 \% \\ &= \left(\frac{V_{0m}}{V_{0MM}} - 1 \right) \times 100 \% \\ &= \left(\frac{1}{MF} - 1 \right) \times 100 \% \quad (\text{Eq.9-17})\end{aligned}$$

5. ค่าความสามารถทำซ้ำได้ (Repeatability)

เกณฑ์การตัดสินว่ามาตรวัดปริมาณของเหลวที่ใช้ซื้อขายให้ค่าปริมาตรที่อ่านได้มีความแม่นยำถูกต้องพอที่จะนำไปใช้งานได้หลังจากสอบเทียบกับมาตรวัดแบบมาตรา (master meter) แล้วให้ค่า

$$\text{Repeatability} = \frac{MF_{\text{max}} - MF_{\text{min}}}{\left(\frac{MF_{\text{max}} + MF_{\text{min}}}{2} \right)} \times 100\% \quad (\text{Eq.9-18})$$

$$\text{Repeatability} \leq 0.05 \% \quad (\text{Eq.9-19})$$



รูปที่ 9-40 Repeatability ที่แต่ละค่าอัตราการไหล

หากการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาณของเหลวที่ใช้ซื้อขายด้วยมาตรวัดแบบมาตราแล้วให้ค่า Repeatability สูงกว่า 0.05% จะต้องดำเนินการใหม่ ทั้งนี้อาจเกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอน

ปฏิบัติการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองหรือความพร้อมของเครื่องมืออุปกรณ์ ตลอดจนการรั่วไหลตามบริเวณข้อต่อหรือหน้าแปลนท่อ หรือในบางกรณีที่ใช้ท่ออย่าง (flexible hose) ซึ่งมีอัตราการยืดหดตัวที่แตกต่างกันเมื่ออยู่ภายใต้ความดันที่แตกต่างกันซึ่งอาจเนื่องจากการเลือกท่ออย่าง (flexible hose) ไม่เหมาะสมกับความดันขณะทำการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง หรือการวัดอุณหภูมิคลาดเคลื่อน หรือมีอากาศในระบบไม่ได้ถูกจำกัดออกไปเช่นไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์กำจัดไอ (Air/Gas Eliminator) ทำให้มาตรวัดปริมาตรของเหลวไม่ได้ทำการวัดของเหลวสถานะเดียว แต่เป็นการวัดของไหล 2 สถานะแล้วมันจะวัดปริมาตรได้ถูกต้องกันอย่างไร เป็นต้น ซึ่งต้องทำการวิเคราะห์แก้ไขปัญหให้ได้ขึ้นอยู่กับประสบการณ์ในการทำงาน

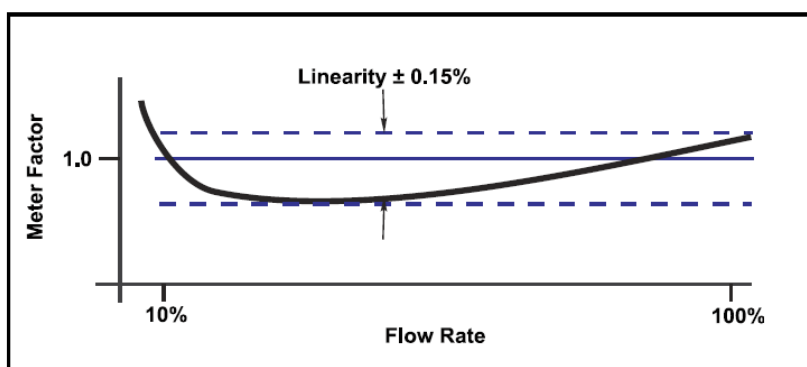
6. ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

ความเป็นเชิงเส้นเป็นการบ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างค่ามิเตอร์แฟคเตอร์กับค่าอัตราการไหลตลอดช่วงการวัดได้ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวครอบคลุมตั้งแต่ Q_{min} ถึง Q_{max} ตามที่ระบุไว้โดยผู้ผลิต ค่าความเป็นเชิงเส้นของมาตรวัดปริมาตรของเหลวเป็นตัวชี้วัดและสะท้อนถึงความถูกต้องเที่ยงตรงของมาตรวัดว่ามาตรวัดปริมาตรของเหลวให้ผลการวัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาตรจริงที่วัดได้ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของเครื่องมือวัด ค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวจึงไม่ควรมีค่าเกิน $\pm 0.1\% - \pm 0.15\%$

เมื่อนำค่า MF ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่หาได้แต่ละอัตราการไหลมาเขียนกราฟแล้วทำการหาค่า Linearity ของมาตรวัดตลอดช่วงอัตราการไหลที่พิจารณา จะได้ว่า

$$\text{Linearity} = \frac{MF_{Q_{max}} - MF_{Q_{min}}}{\left(\frac{MF_{Q_{max}} + MF_{Q_{min}}}{2} \right)} \times 100\% \quad (\text{Eq.9-20})$$

$$\text{Linearity} \leq \pm 0.1\% - \pm 0.15\% \quad (\text{Eq.9-21})$$



รูปที่ 9-41 Linearity ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวตลอดช่วงอัตราการไหลการวัดได้

ในบางครั้งเราอาจทดสอบมาตรวัดปริมาตรของเหลวไม่สามารถครอบคลุมตั้งแต่ Q_{min} ถึง Q_{max} ตามที่ระบุไว้โดยผู้ผลิต แต่พออนุโลมได้หากทดสอบที่อัตราการไหลครอบคลุมช่วง 70-80% ของช่วงอัตราการไหลดังกล่าว แต่ยอมรับไม่ได้หากทดสอบช่วงอัตราการไหลแคบๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของมาตรวัดปริมาตรเพื่อไม่ให้มีค่าเกิน $\pm 0.1\% - \pm 0.15\%$ แล้วนำมาสนับสนุนว่ามาตรวัดปริมาตรยังคงสภาพดีถูกต้องอยู่

7. สำหรับในกรณีที่อุณหภูมิอ้างอิงของมาตรวัดแบบมาตรา (master meter) ต่างจากอุณหภูมิอ้างอิงของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (flowmeter) สามารถคำนวณค่ามิเตอร์แฟคเตอร์มาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย ได้ดังนี้

กรณี 1 อุณหภูมิอ้างอิงประจำมาตรวัดแบบมาตรา $T_{0MM} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} อุณหภูมิอ้างอิงประจำมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย $T_{0m} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm}

ดังนั้นเราจำเป็นต้องทำการปรับปริมาตรของมาตรวัดแบบมาตราจากอุณหภูมิอ้างอิงประจำมาตรวัดแบบมาตรา $T_{0MM} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} ไปยังค่าปริมาตรที่ $T_0 = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} เพื่อที่จะสามารถทำการเปรียบเทียบปริมาตรที่สภาวะเดียวกันระหว่างปริมาตรของมาตรวัดแบบมาตรา กับมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายได้

$$\begin{aligned} MF_{30C} &= \frac{V_{MMr} \times MF_{MM} \times (C_{tMM} \times C_{plMM})}{V_{mr} \times (C_{tIm} \times C_{plIm})} \\ &= \frac{V_{MMr} \times MF_{MM} \times \left\{ \frac{e^{(-\alpha T \times (T_{MM} - 15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (T_{MM} - 15)))}}{e^{(-\alpha T \times 15 \times (1 + 0.8 \times 15 \times \alpha T))}} \times \left[\frac{1}{(1 - P_{MM}) \times F_{MM}} \right] \right\}}{V_{mr} \times \left\{ \frac{e^{(-\alpha T \times (T_m - 15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (T_m - 15)))}}{e^{(-\alpha T \times 15 \times (1 + 0.8 \times 15 \times \alpha T))}} \times \left[\frac{1}{(1 - P_m) \times F_m} \right] \right\}} \end{aligned} \quad (\text{Eq.9-22})$$

กรณี 2 อุณหภูมิอ้างอิงประจำมาตรวัดแบบมาตรา $T_{0MM} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} อุณหภูมิอ้างอิงประจำมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย $T_{0m} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm}

ดังนั้นเราจำเป็นต้องทำการปรับปริมาตรของมาตรวัดแบบมาตราจากอุณหภูมิอ้างอิงประจำมาตรวัดแบบมาตรา $T_{0MM} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} ไปยังค่าปริมาตรที่ $T_0 = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} เพื่อที่จะสามารถทำการเปรียบเทียบปริมาตรที่สภาวะเดียวกันระหว่างปริมาตรของมาตรวัดแบบมาตรา กับมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายได้

$$\begin{aligned} MF_{15C} &= \frac{V_{MMr} \times MF_{MM} \times (C_{tMM} \times C_{plMM})}{V_{mr} \times (C_{tIm} \times C_{plIm})} \\ &= \frac{V_{MMr} \times MF_{MM} \times \left\{ e^{(-\alpha T \times (T_{MM} - 15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (T_{MM} - 15)))} \times \left[\frac{1}{(1 - P_{MM}) \times F_{MM}} \right] \right\}}{V_{mr} \times \left\{ e^{(-\alpha T \times (T_m - 15) \times (1 + 0.8 \times \alpha T \times (T_m - 15)))} \times \left[\frac{1}{(1 - P_m) \times F_m} \right] \right\}} \end{aligned} \quad (\text{Eq.9-23})$$

ตัวอย่าง การตรวจสอบมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายโดยใช้มาตรวัดแบบมาตรา

ทำการสอบเทียบมาตรวัดปริมาตรของเหลวหรือมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายเทียบกับมาตรวัดแบบมาตรา (Master Flowmeter) โดยใช้ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมสำเร็จรูป ดีเซล เป็นของเหลวตัวกลางสอบเทียบ โดยมาตรวัดแบบมาตรามีมิเตอร์แฟคเตอร์ เท่ากับ 0.998545 เมื่อทำการตรวจสอบผลปรากฏดังตาราง

สอบเทียบครั้งที่	อัตราการไหล (ลิตร/นาที่)	มาตรวัดแบบมาตรา (Master Flowmeter)			มาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (Flowmeter)		
		ปริมาตรที่อ่านได้ (V_{MMr}) (ลิตร)	อุณหภูมิ (T_{MM}) (°C)	ความดัน (P_{MM}) (KPag)	ปริมาตรที่อ่านได้ (V_{mr}) (ลิตร)	อุณหภูมิ (T_m) (°C)	ความดัน (P_m) (KPag)
1	2000.00	983.15	31.40	275.00	1000.35	31.00	274.00
2	2000.00	2997.62	31.40	275.00	2999.02	31.00	272.00
3	2000.00	3004.81	31.40	275.00	3000.98	31.45	271.00
4	2000.00	3004.58	31.40	275.00	3001.01	31.00	275.00
5	2000.00	3004.85	31.50	275.00	3000.95	31.50	274.00
Slip Test	450	3004.22	31.50	30.00	2997.77	31.50	150.00

สอบเทียบครั้งที่ 1-2 วิ่งทดสอบระบบ และสอบเทียบครั้งที่ 3-5 เป็นการทดสอบระบบจริง

พิจารณาการสอบเทียบครั้งที่ 3 ที่อัตราการไหล 2,000 ลิตร/นาที่

มาตรวัดแบบมาตรา

มีค่า MF_{MM} ของดีเซลที่มีความหนาแน่น 0.8347 g/cm^3 เท่ากับ 0.998545
 เมื่อทำการทดสอบอ่านค่าปริมาตรได้ 3004.81 ลิตร
 วัดอุณหภูมิ 31.4 °C
 ความดัน 275 Kpa

มาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย

อ่านค่าปริมาตรได้ 3000.98 ลิตร
 วัดอุณหภูมิ 31.45 °C
 ความดัน 271 Kpa

สารตัวกลาง

ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมดีเซล มีความหนาแน่นที่ 15 °C 0.8347 กรัม/ลบซม.

วิธีคำนวณ

คูณค่า MF กับค่าปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดแบบมาตรรา จากนั้นทำการแก้ไขปรับค่าปริมาตรไปที่สภาวะอ้างอิงแล้วเพื่อหาปริมาตรที่ไหลผ่านมาตรวัดแบบมาตรราที่สภาวะดังกล่าว

$$V_{oMM} = V_{MMr} \times MF_{MM} \times (C_{dMM} \times C_{plMM})$$

เมื่อ

$$V_{MMr} = 3004.81$$

$$MF_{MM} = 0.998545$$

หาค่า C_{plMM}

$$C_{plMM} = \frac{1}{1 - (P - P_e)F}$$

เมื่อ

$P_e = 0$ เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมความดันไอสมดุลเป็นศูนย์

$P = 275$ Kpa

$F =$ ค่า compressibility factor ของน้ำมัน สามารถเปิดจากตาราง API chapter 11.2.1 เพื่อหาค่า F ความหนาแน่น 0.8347 กรัม/ซม³ ที่อุณหภูมิ 31.4 °C หรือคำนวณจาก

$$\begin{aligned} F &= e^{(-1.6208 + 0.00021592T + \frac{0.87096}{P_{15}^2} + \frac{0.0042092T}{P_{15}^2})} \times 10^{-6} \\ &= e^{(-1.6208 + (0.00021592 \times 31.4) + \frac{0.87096}{0.8347^2} + \frac{(0.0042092 \times 31.4)}{0.8347^2})} \times 10^{-6} \\ &= 0.842 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่า compressibility factor ของน้ำมันเท่ากับ 0.842×10^{-6}

$$\begin{aligned} C_{plMM} &= \frac{1}{1 - (275 - 0)0.842 \times 10^{-6}} \\ &= 1.000231 \end{aligned}$$

หาค่า C_{dMM} เพื่อปรับค่าปริมาตรของของเหลวไปเป็นปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง 30 °C

$$C_{dMM} = \frac{e^{(-\alpha_{15}(T-15)(1+0.8\alpha_{15}(T-15)))}}{e^{(-\alpha_{15}(30-15)(1+0.8\alpha_{15}(30-15)))}}$$

เมื่อความหนาแน่นเท่ากับ 834.7 กิโลกรัม/ลิตร จะได้ค่า

$$K_0 = 594.5418$$

$$K_1 = 0$$

$$K_2 = 0$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}\alpha_{15} &= \frac{K_0}{\rho_{15}^2} + \frac{K_1}{\rho_{15}} \\ &= \frac{594.5418}{834.7^2} + \frac{0}{834.7} \\ &= 0.0008533\end{aligned}$$

แทนค่า α_{15} ในสมการ C_{dMM}

$$\begin{aligned}C_{dMM} &= \frac{e^{(-0.0008533(31.4-15)(1+(0.8 \times 0.0008533(31.4-15)))}}{e^{(-0.0008533(30-15)(1+(0.8 \times 0.0008533(30-15)))}} \\ &= 0.998780\end{aligned}$$

แทนค่า C_{dMM} , C_{plMM} เพื่อหาปริมาตรที่สภาวะอ้างอิง (T_{30} P_{atm})

$$\begin{aligned}V_{0MM} &= 3005.18 \times (0.998545 \times 1.000231 \times 0.99878) \\ &= 3005.18 \times 0.99756 \\ &= 2997.469\end{aligned}$$

สำหรับมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย

อ่านค่าปริมาตรน้ำมันที่ผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย 3000.98 ลิตร

$$\begin{aligned}V_{0m} &= V_{mr} \times C_{dmm} \times C_{plm} \\ V_{0m} &= 3000.98 \times (0.998737 \times 1.000228) \\ &= 3000.98 \times 0.99896 \\ &= 2997.874\end{aligned}$$

หาค่า MF_m

$$\begin{aligned}MF_m (@ T_0, P_{atm}) &= \frac{V_{0MM}}{V_{0m}} \\ &= \frac{V_{MMr} \times MF_{MM} \times (C_{dMM} \times C_{plMM})}{V_{mr} \times (C_{dmm} \times C_{plm})} \\ &= \frac{2997.469}{2997.874} = 0.9999\end{aligned}$$

ดังนั้น

ค่า Meter factor ของการสอบเทียบครั้งที่ 1 เท่ากับ 0.9999

ทำการสอบเทียบต่อไปอีก 2 รอบ และคำนวณเหมือนเดิมจะได้

ค่า Meter factor ของการสอบเทียบครั้งที่ 2 เท่ากับ 0.9994

ค่า Meter factor ของการสอบเทียบครั้งที่ 3 เท่ากับ 0.9998

ดังนั้นค่า Meter factor เฉลี่ย 0.9997

หาค่า *Repeatability*

$$\text{Repeatability} = \frac{MF_{\max} - MF_{\min}}{\left(\frac{MF_{\max} + MF_{\min}}{2} \right)} \times 100\%$$

$$\begin{aligned}\text{Repeatability} &= \left(\frac{0.9999 - 0.9994}{0.99965} \right) \times 100 \% \\ &= 0.05 \%\end{aligned}$$

โดยต้องมีค่า *Repeatability* **ไม่เกิน 0.05 %** ถ้าเกินต้องดำเนินการทดสอบให้ หากยังเกินต้องทำการซ่อมมาตรวัดเสียก่อน เนื่องจากให้ผลขาดความแม่นยำและน่าเชื่อถือ

หาค่า Meter Error

$$\begin{aligned}\% \text{Error (@ } T_0, P_{\text{atm}}) &= \frac{V_{0m} - V_{0MM}}{V_{0MM}} \times 100 \% \\ &= \left(\frac{V_{0m}}{V_{0MM}} - 1 \right) \times 100 \% \\ &= \left(\frac{1}{MF} - 1 \right) \times 100 \% \\ &= \left(\frac{1}{0.9997} - 1 \right) \times 100 \% = 0.03 \%\end{aligned}$$

ผลผิดของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (Meter Error) ต้องไม่มากกว่า $\pm 0.5 \%$ สำหรับมาตรวัดปริมาตรของเหลวชั้นความเที่ยง 0.5

สามารถดูรายงานการตรวจสอบในหน้าถัดไป โดยค่าต่างที่นำมาคำนวณหาค่า Repeatability คือรอบที่ 3-5

หาค่า Linearity

ในที่นี้ยกตัวอย่างมาที่อัตราการไหลเดียว หากทำที่ หลายอัตราการไหล เช่นที่ $0.2Q_{\text{max}}$, $0.4Q_{\text{max}}$, $0.6Q_{\text{max}}$, $0.8Q_{\text{max}}$, และ Q_{max} , เราก็สามารถหาค่า Linearity ของมาตรวัดได้ไม่ควรเกิน 0.1%

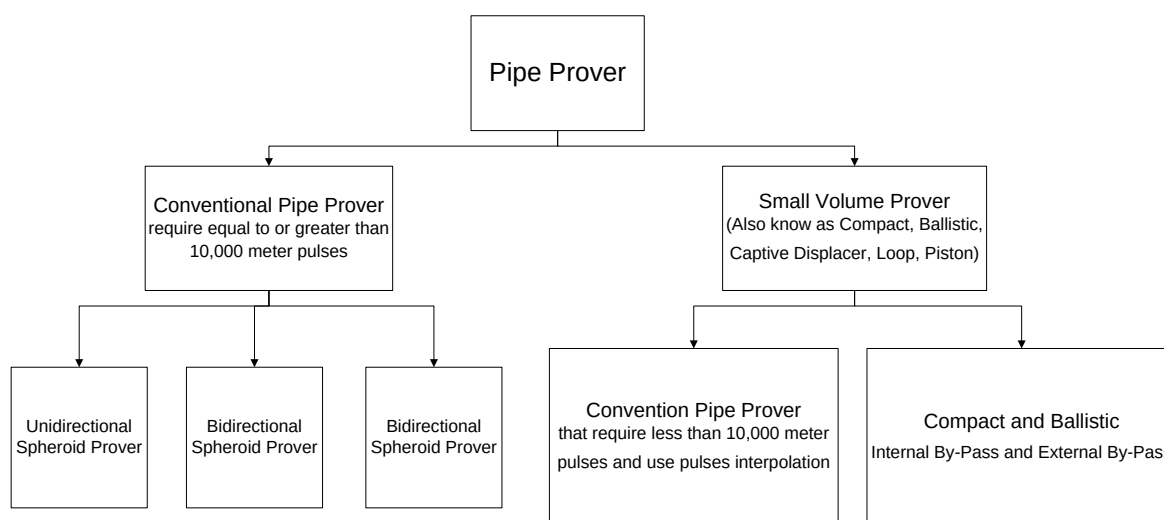
$$\text{Linearity} = \frac{MF_{Q_{\text{max}}} - MF_{Q_{\text{min}}}}{\left(\frac{MF_{Q_{\text{max}}} + MF_{Q_{\text{min}}}}{2} \right)} \times 100 \%$$

ANS

Meter-Master Meter (SI)

การสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (Flowmeter) ด้วยท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Compact Prover)

จากบทที่ผ่านมาเราได้จำแนกท่อทดสอบความจุ มีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 9-43 ด้วยเหตุนี้การสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายด้วยท่อทดสอบความจุทั้งแบบ Convention Pipe Prover และ ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Small Volume Prover หรือ Compact Prover) จึงมีลักษณะและการคำนวณอยู่บนพื้นฐานที่ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก เพื่อให้เป็นการรวบรัดจึงขอพูดไปพร้อมๆ กันในส่วนนี้ไปเลยและเพื่อป้องกันความสับสนในส่วนนี้จะใช้คำกลางๆ เพื่อให้ครอบคลุมทั้ง Convention Pipe Prover และ Small Volume Prover หรือ Compact Prover ว่า “ท่อทดสอบความจุ (pipe prover)”



รูปที่ 9-43 โครงสร้าง Pipe Prover และ Small Volume Prover

1. การเตรียมการสอบเทียบ และ/หรือตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลว

1.1. การสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายด้วยท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (compact prover) จำเป็นต้องการผู้ทำงานที่มีทักษะในการควบคุมการทำงานท่อทดสอบความจุขนาดเล็กซึ่งก็มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับการควบคุมท่อทดสอบความจุ แบบ conventional pipe provers

1.2. ในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองต้องมั่นใจว่าวาล์วทุกตัวในระบบมาตรวัดซึ่งอยู่ระหว่างมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (flowmeters) กับท่อทดสอบความจุ (pipe prover) อยู่ในตำแหน่งที่ไม่ก่อให้เกิดการเบี่ยงเบนการไหลของเหลวที่จะทำการวัดออกจากระบบมาตรวัดหรือมีของเหลวนอกระบบมาตรวัดไหลเข้ามารวมกับของเหลวที่ต้องการวัด อีกทั้งวาล์วทุกตัวต้องได้รับการตรวจสอบและมีวิธีการตรวจสอบที่แน่ชัดเพื่อให้แน่ใจว่าวาล์วเหล่านั้นไม่มีการรั่วไหลแต่อย่างใด

1.3. ก่อนที่เริ่มดำเนินการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายควรทำการตรวจสอบ strainer หรือ filters ซึ่งอยู่ตำแหน่งก่อนทางเข้ามาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายว่ามีความสะอาดพอที่ไม่ไปลดอัตราการไหลผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายตามที่กำหนดไว้, ทำการ

ตรวจสอบความดันและอุณหภูมิภายในระบบท่อและระบบมาตรวัด (meter run) ว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าซึ่งมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายทำงานปกติหรือไม่, ตรวจสอบระบบป้องกันไฟฟ้าสถิต, สายกราวด์ของทั้งมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายและมาตรวัดแบบมาตราเพื่อป้องกันการระเบิดที่อาจมีขึ้นได้, ตลอดจนการรั่วไหลของระบบท่อ ตามข้อต่อ ข้ออ หน้าแปลน เป็นต้น

1.4. ในระบบท่อซึ่งประกอบด้วยมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายและท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (compact prover) จะต้องจัดให้มีเครื่องวัดอุณหภูมิอย่างน้อย 1 ชุดติดตั้งถัดจากมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่จะทำการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองเพื่อวัดอุณหภูมิของเหลวที่ใช้เป็นตัวกลางในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย และอย่างน้อยอีก 1 ชุดสำหรับติดตั้งถัดจากท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก นอกจากนี้จะต้องทำการติดตั้งเครื่องวัดความดันในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถวัดความดันที่มาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายและท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

1.5. สำหรับการเตรียมระบบการวัดปริมาตรของเหลวจำเป็นต้องไล่อากาศหรือไอน้ำภายในท่อระบบการวัดปริมาตรของเหลว โดยต้องจัดให้มีท่อ Vent ไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้แน่ใจว่าได้ไม่มีไอน้ำและอากาศตกค้างอยู่ภายในระบบการวัดปริมาตรของเหลวก่อนที่จะเริ่มดำเนินการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง

1.5.1. ถ้าของเหลวที่ใช้เป็นตัวกลางสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมีค่าความดันไอต่ำ (ระเหยกลายเป็นไอยาก) เช่น น้ำ เมื่อเตรียมระบบต้องทำการไล่อากาศ และ/หรือ ไอน้ำ ออกจากระบบให้หมด

1.5.2. ถ้าของเหลวที่ใช้เป็นตัวกลางสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมีค่าความดันไอสูง (ระเหยกลายเป็นไอง่าย) เช่น Propane, LPG เมื่อเตรียมระบบอากาศ และ/หรือ ไอน้ำ จะถูกอัดเข้ากับของเหลวดังกล่าว ดังนั้นการทดสอบก่อนใช้ค่าจริง 2-3 รอบจึงควรกระทำ

1.6. ในขณะเดียวกันก็ต้องทำให้ของเหลวภายในระบบการวัดปริมาตรของเหลวต้องมี**อัตราการไหลอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้อุณหภูมิและความดันภายในระบบการวัดปริมาตรของเหลวมีค่าคงที่**เสียก่อนที่จะเริ่มสอบเทียบเช่นกัน โดยให้ทดสอบระบบให้ของเหลวไหลผ่านทั้งท่อทดสอบความจุขนาดเล็กและมาตรวัดปริมาตรของเหลวจนกระทั่งอุณหภูมิและความดันเสถียรอยู่ภายในช่วง $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ และ $\pm 50\text{ kPa}$ หากไม่เช่นนั้นแล้วอาจจะส่งผลให้การสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายได้ค่าความสามารถทำซ้ำได้สูงจนไม่น่าเชื่อถือ แต่อย่างไรก็ตามขณะที่ปล่อยให้ของเหลวซึ่งใช้เป็นตัวกลางไหลอยู่ภายในระบบท่อก็ต้องคำนึงถึงความดันย้อนกลับ (back pressure) ณ ตำแหน่งมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่ต้องการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองและท่อทดสอบความจุว่ามีค่ามากพอที่จะไม่ทำให้ของเหลวภายในมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายและท่อทดสอบความจุกลายเป็นไอ ซึ่งหากเป็นเช่นนั้นแล้วผลการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองที่ได้ก็จะไม่น่าเชื่อถือ ปัจจัยที่มีผลต่อความดันย้อนกลับ ยกตัวอย่างเช่น ความเร็วของเหลวภายในท่อระบบการวัดปริมาตรของเหลว, ความดันไอของเหลว (fluid vapor pressure), อุณหภูมิและความดันของเหลวขณะทำงาน (operating temperature and pressure)

1.7. สำหรับท่อทดสอบความจุขนาดเล็กก็ควรได้รับการตรวจสอบด้วยว่าซีลของตัวกวดภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็กกว่ามีการรั่วหรือไม่โดยให้ทำการตรวจสอบตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต สำหรับท่อทดสอบความจุขนาดใหญ่ก็ทำการตรวจสอบขนาดของลูกบอลและแรงดันภายในเป็นไปตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต (รูปที่ 9-44)

1.8. นอกจากนี้ควรทำการตรวจสอบตัวมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่ต้องการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองก่อนดำเนินการด้วยว่ามีการส่งสัญญาณพัลส์ (pulses) สม่าเสมอหรือไม่ ตรวจสอบชุดอุปกรณ์บันทึกค่าการวัดได้ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายซึ่งต่อรวมกันอยู่นั้น ยังสามารถทำงานได้ถูกต้องตามความต้องการหรือไม่ และที่สำคัญเครื่องนับสัญญาณใดๆ รวมทั้ง pulse-interpolation ซึ่งถูกใช้ในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองก็ควรได้รับการตรวจสอบจากหน่วยงานของรัฐเสียก่อน ในกรณีที่ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กเป็นแบบชนิดอัตโนมัติซึ่งประกอบด้วย microprocessor computer sequence control, pulse interpolation, data acquisition และ data reduction ก็จำเป็นต้องได้รับการตรวจสอบก่อนที่จะนำไปทำการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง โดยระบบดังกล่าวควรมีระบบตรวจสอบระบบภายในตัวเองอัตโนมัติว่าชุดอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถทำงานได้ถูกต้องตามต้องการซึ่งบริษัทผู้ผลิตควรจัดหาไว้ หรือเรียกหาเอกสารการได้รับตรวจสอบต้นแบบจากหน่วยงานของรัฐประเทศผู้ผลิต

เมื่อเตรียมการระบบการวัดปริมาตรของเหลวถูกต้องเป็นที่น่าพอใจแล้วก็ให้ทำการตรวจสอบสภาวะแวดล้อม เช่นต้องไม่มีสิ่งใดที่จะมารบกวนการส่งสัญญาณพัลส์

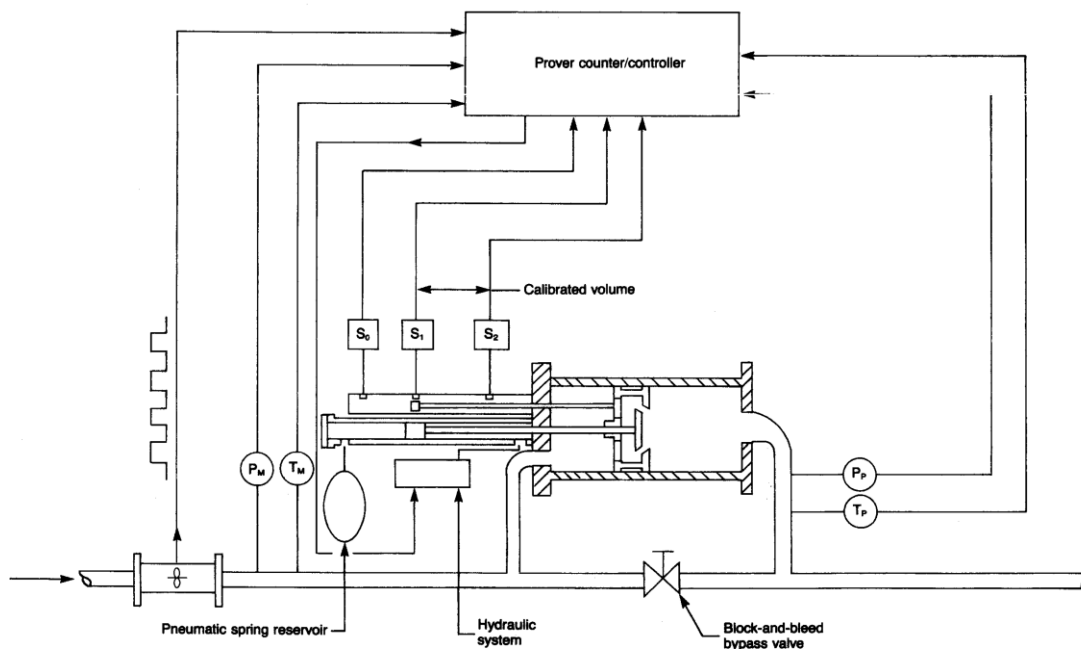


รูปที่ 9-44 ลูกบอลใน Conventional pipe prover ที่ไปดัน Detector และแบ่งของเหลว

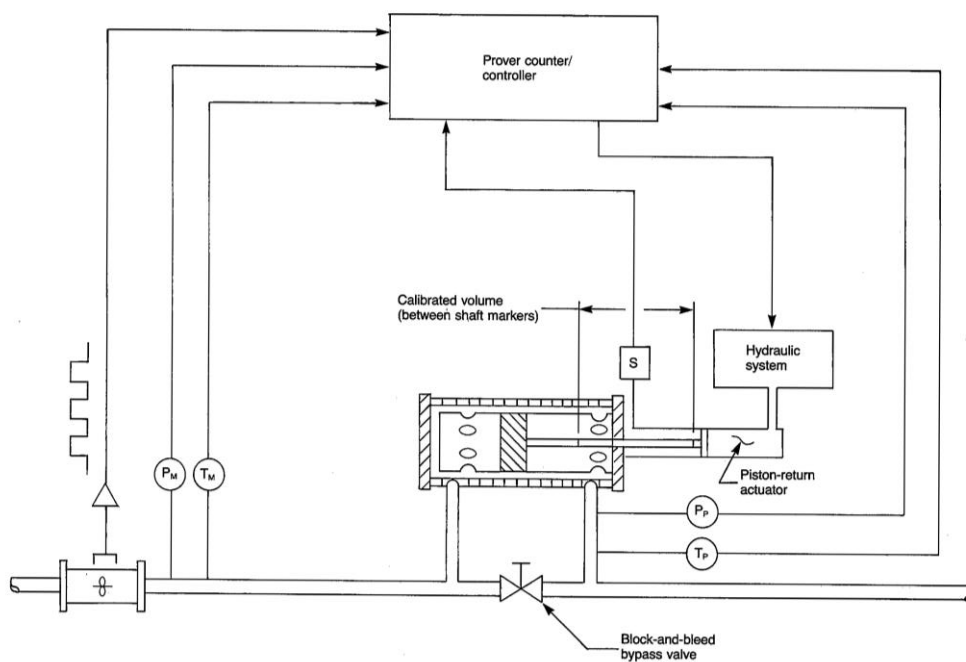
1.9. ระบบการวัดปริมาตรของเหลวของมาตรวัดปริมาตรของเหลวเทียบกับท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก โดยปกติงานด้านซึ่งตวงในเชิงกฎหมาย เราวางตำแหน่งแบบมาตรอยู่ทางด้านปลายน้ำ (Downstream) ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวเสมอ ดังนั้นจึงจัดวางมาตรวัดของเหลวเทียบกับท่อทดสอบความจุขนาดเล็กดังรูปที่ 9-45, รูปที่ 9-46 และ รูปที่ 9-47 แต่อย่างไรก็ตามหากจำเป็นก็อาจจัดให้แบบมาตรอยู่ด้านต้นน้ำ (Upstream) ของมาตรวัดแบบมาตราได้

1.9.1. กรณีมาตรวัดปริมาตรของเหลวซึ่งติดตั้งก่อน (Upstream) ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (รูปที่ 9-45) ในการคำนวณ Meter Error ให้ใช้ค่าปริมาตรที่วัดได้โดยมาตรวัดเทียบกับ Upstream Base Volume ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก เพราะของเหลวที่ผ่านมาตรวัดจะไหลเข้าท่อทดสอบความจุขนาดเล็กทางด้าน Upstream

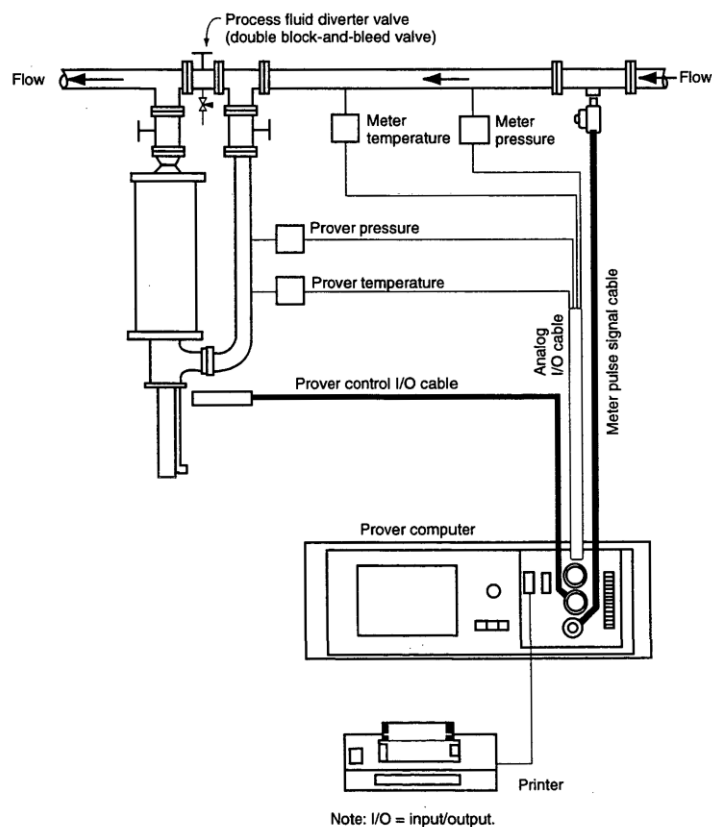
1.9.2. กรณีมาตรวัดปริมาตรของเหลวซึ่งติดตั้งหลัง (Downstream) ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (รูปที่ 9-47) ในการคำนวณ Meter error ให้ใช้ค่าปริมาตรที่วัดได้โดยมาตรวัดเทียบกับ Downstream Base Volume ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก เพราะของเหลวที่ผ่านท่อทดสอบความจุขนาดเล็กทางด้าน Downstream จะไหลเข้ามาตรวัด



รูปที่ 9-45 ระบบการวัดปริมาตรของเหลวมาตรวัดด้วย Piston Type Prover with Shaft and Optical Switches (API MPMS Chapter 4 Section3)



รูปที่ 9-46 ระบบการวัดปริมาตรของเหลวมาตรวัดด้วย Internal Bypass Porting with External Valve (API MPMS Chapter 4 Section3)



รูปที่ 9-47 องค์ประกอบระบบคำนวณผลสอบเทียบมาตรวัดเทียบกับท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

1.10. ระหว่างการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง ระบบต้องมีอัตราการไหลอย่างสม่ำเสมอผ่านทั้งท่อทดสอบความจุขนาดเล็กและมาตรวัดปริมาตรของเหลว ต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 2\%$ ของค่าอัตราการไหลเฉลี่ย เนื่องจากจะมีผลต่อการทำงานของ Pulse Interpolation ในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง

1.11. ระบบสอบเทียบ/ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวเทียบกับ Conventional Pipe Prover

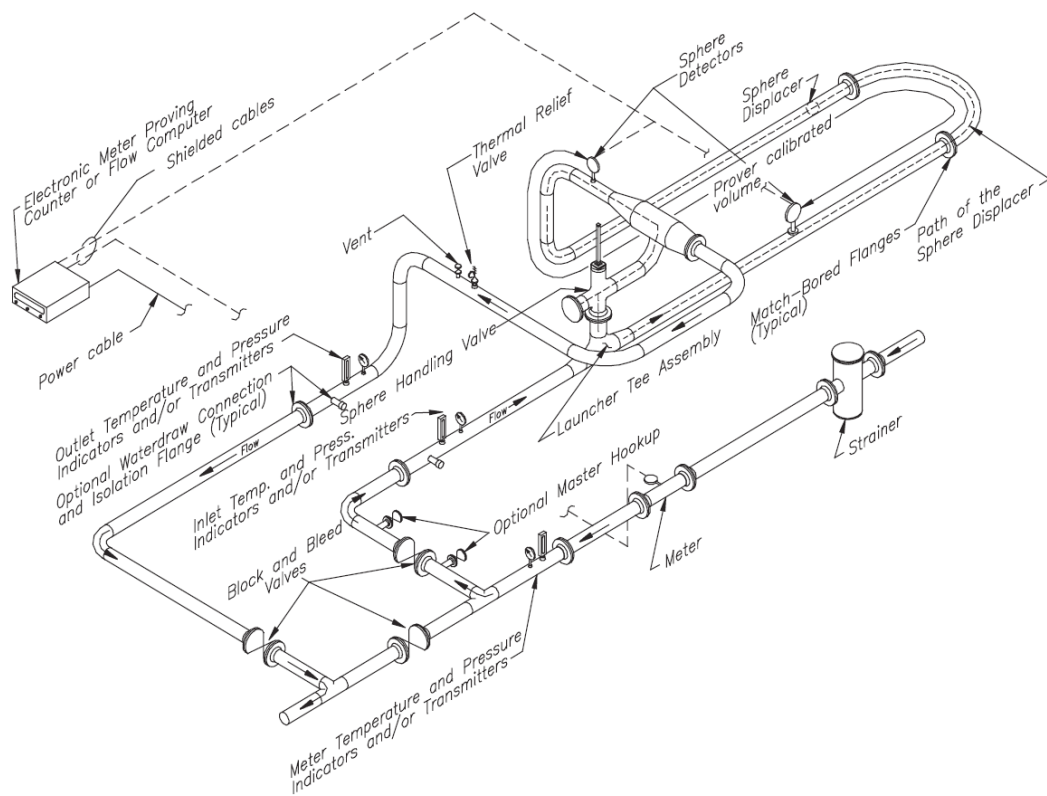
1.11.1. ขนาดของท่อทดสอบความจุ Conventional Pipe Provers ที่จะใช้ในการตรวจสอบมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายได้ควรมีปริมาตรมาตรฐาน (Base Volume) ณ สภาวะมาตรฐาน เพียงพอที่จะทำให้จำนวนสัญญาณพัลส์จากมาตรวัดปริมาตรของเหลวได้ไม่น้อยกว่า 10,000 Pulses

1.11.2. ความแตกต่างของความดันระหว่างมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายกับท่อทดสอบความจุ แบบ Conventional Pipe Provers ต้องมีค่าไม่เกิน 1 bar $\Delta P = P_M - P_P \leq 1 \text{ barg}$

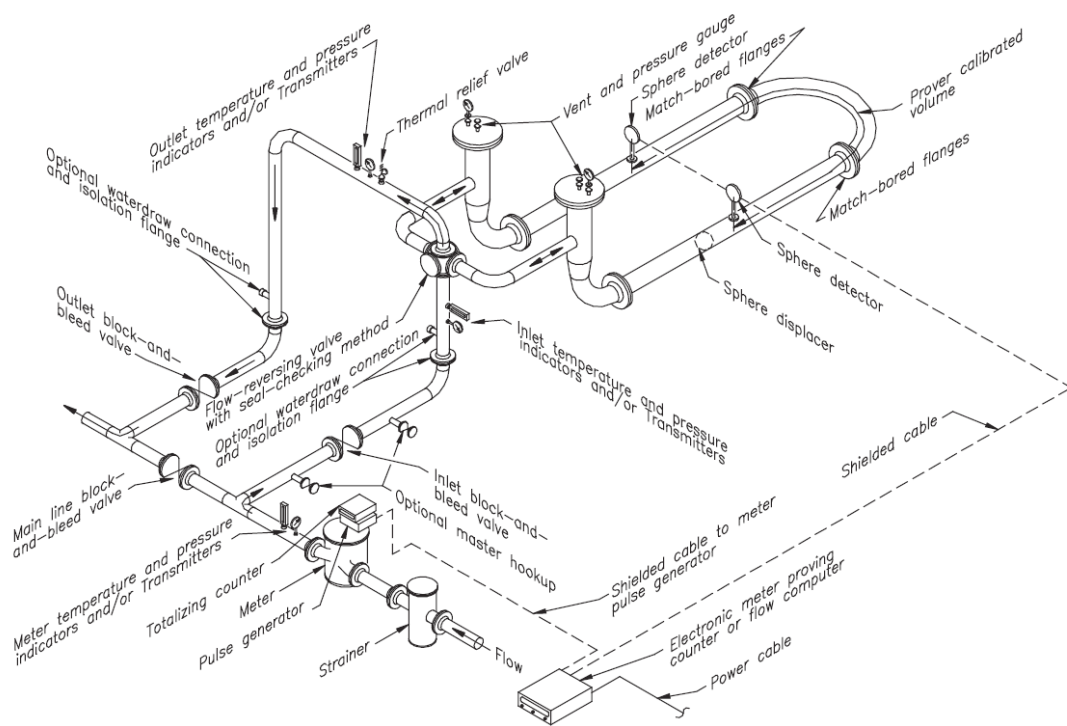
1.11.3. ความแตกต่างของสัญญาณพัลส์ที่นับได้ (Δpulse) ของแต่ละรอบการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง (run) ที่ติดกันของท่อทดสอบความจุ แบบ Conventional Pipe Provers ต้องไม่เกิน 5 pulses

1.11.4. ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายในมาตรวัดปริมาตรของเหลวกับภายในท่อทดสอบความจุ Conventional Pipe Provers ต้องไม่แตกต่างกันเกินกว่า 0.1°C ($\Delta T = T_M - T_P \leq 0.1^\circ\text{C}$)

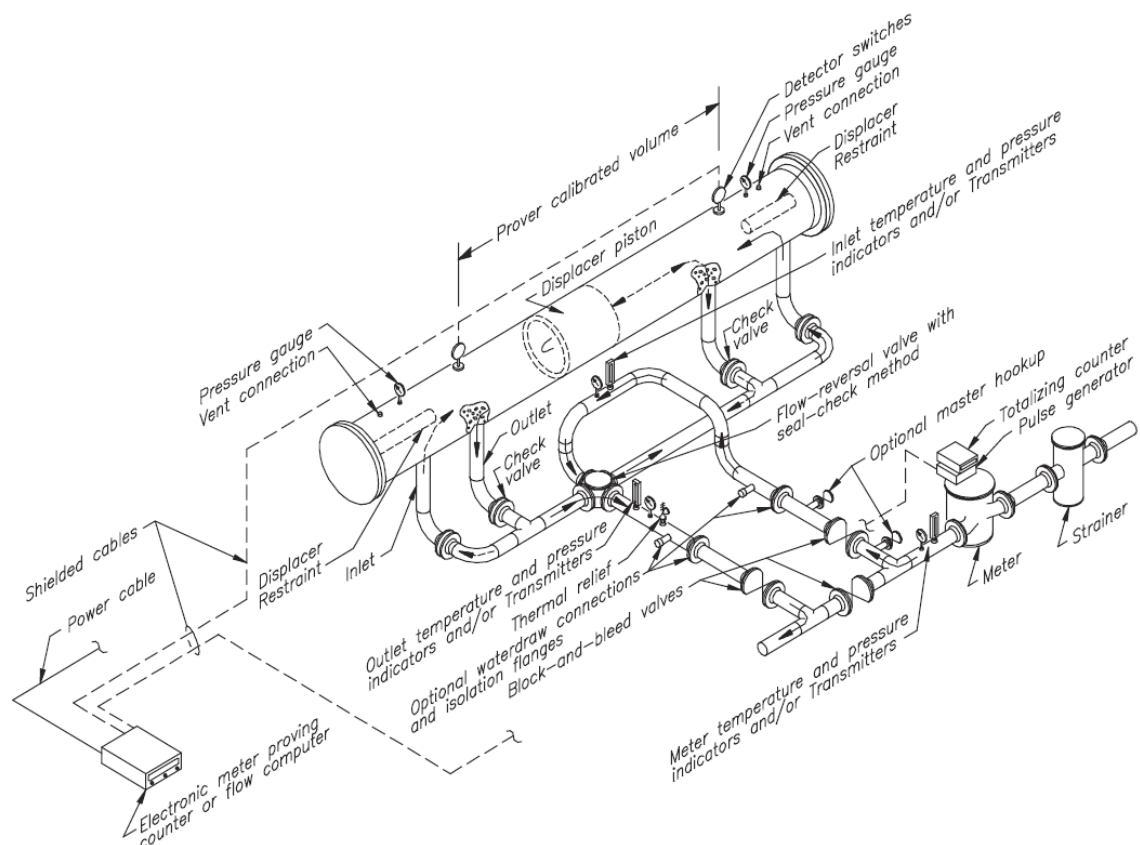
1.12. ค่าเค-แฟคเตอร์ (K-factor) ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวต้องได้ค่าความสามารถทำซ้ำได้ (repeatability) $< 0.05\%$ ที่อัตราการไหลปกติ (Normal Flow)



รูปที่ 9-48 Typical Unidirectional Return-type Prover System (API MPMS Chapter 4, Section3)



รูปที่ 9-49 Typical Bidirectional U-type Sphere Prover System (API MPMS Chapter 4, Section3)



รูปที่ 9-50 Typical Bidirectional Straight-type Piston Prover System (API MPMS Chapter 4, Section3)

2. การคำนวณผลการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลว

2.1. พิจารณาตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{tw} , C_{ts} , C_{ps} , C_{tl} , และ C_{pl}

2.1.1. เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ทดสอบความจุขนาดเล็ก (compact prover), T_{CP} และอุณหภูมิมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย, T_m พบว่าอุณหภูมิทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน ($T_{CP} \neq T_m$)

ตัวแก้ไขปรับค่าปริมาณ C_{ts}

- C_{tsCP} นำมาพิจารณา ท่อทดสอบความจุ (pipe prover) มีการขยายและหดตัวเมื่ออุณหภูมิของเหลวภายในเปลี่ยนแปลงขณะวัด
- C_{tsd} นำมาพิจารณา เนื่องจากขณะสอบเทียบบางส่วนของ Invar rod ของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กสัมผัสกับของเหลวที่วัดอยู่ทำให้มีการขยายตัวหรือหดตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของของเหลว เว้นเสียแต่ว่าท่อทดสอบความจุนั้นมีขนาดสั้นมากและวัสดุที่ใช้ทำแทน Invar rod เป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นน้อยมากจนสามารถตัดค่า C_{tsd} ที่ทิ้งได้

เทอมนี้จะหายไปหากเป็นท่อทดสอบความจุแบบ Conventional Pipe Prover

- C_{tsm} สามารถตัดทิ้งได้ เพราะว่า โครงสร้างของตัวมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (flowmeter) ไม่ขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ

ตัวแก้ไขรับค่าปริมาณ C_u

- C_{uCP} นำมาพิจารณา
- C_{uIm} นำมาพิจารณา
เนื่องจากของเหลวตัวกลางที่ใช้ในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้
คำรับรอง เป็นของเหลวผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

ตัวแก้ไขรับค่าปริมาณ C_{tw} ไม่นำมาพิจารณา

2.1.2. ขณะสอบเทียบความดันภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็กไม่เท่ากับความดันไอสมดุล ณ อุณหภูมิที่วัดได้ของเหลวขณะทำการวัดอุณหภูมิภายในท่อทดสอบความจุหรือมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ P_{atm} นั้นเอง (สำหรับของเหลวซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม) ($P_{CP} \neq P_{atm}$) และความดันภายในมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายไม่เท่ากับความดันไอสมดุลซึ่งเท่ากับความดันบรรยากาศเช่นกัน ($P_m \neq P_{atm}$)

ตัวแก้ไขรับค่าปริมาณ C_{ps}

- C_{psCP} นำมาพิจารณา
- C_{psm} พิจารณาตัดทิ้งได้ เนื่องจากโครงสร้างของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (flowmeter) ไม่ขยายตัวเนื่องจากความดัน หรือถ้าหากมีก็ถือว่าน้อยมาก

ตัวแก้ไขรับค่าปริมาณ C_{pl}

- C_{plCP} นำมาพิจารณา
- C_{plm} นำมาพิจารณา
เนื่องจากสารตัวกลางที่ใช้ในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำ
รับรอง เป็นของเหลวผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

∴ สิ่งที่ต้องนำมาคิดคำนวณคือ

$$\frac{C_{tsCP}}{C_{tIm}} \frac{C_{tsd}}{C_{plm}} \frac{C_{psCP}}{C_{plm}} \frac{C_{uCP}}{C_{plm}} \frac{C_{plCP}}{C_{plm}}$$

2.2. การคำนวณ

- สำหรับท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (compact prover) และท่อทดสอบความจุแบบ Conventional Pipe Prover

ในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กโดยให้ตัวกวาด (displacer) เคลื่อนที่ไประหว่างตัวตรวจจับตัวกวาด (detector) ทั้ง 2 เนื่องจากเราต้องการหาค่าปริมาตรมาตรฐานของเหลวในท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก BV_{CP} ที่สภาวะมาตรฐาน พบว่าตัวท่อทดสอบความจุขนาดเล็กและ invar rod หรือเพลลาที่ต่อเชื่อมกับตัวกวาด (displacer) จะมีการขยายตัวหรือหดตัวเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ดังนั้นในขณะที่ทำการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองค่าอุณหภูมิที่ท่อทดสอบความจุขนาดเล็กซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิทางด้านเข้ากับอุณหภูมิทางด้านออกจากท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก T_{CP} ส่วน invar rod หรือเพลลาที่ต่อเชื่อมกับตัวกวาด (displacer) มีอุณหภูมิวัดได้เท่ากับ T_d ดังนั้นทำการปรับค่า

ปริมาตรมาตรฐานของของเหลวในท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก BV_{CP} ที่สภาวะมาตรฐาน ซึ่งสามารถหาค่านี้ได้จาก nameplate ติดมากับท่อทดสอบความจุขนาดเล็กโดยผู้ผลิตให้มา ไปยังค่าปริมาตรท่อทดสอบความจุขนาดเล็กที่อุณหภูมิขณะทำการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง (T_{CP}) อันเนื่องจากการขยายตัวหรือหดตัวของ invar rod และตัวท่อทดสอบความจุขนาดเล็กโดยได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิ จะได้ว่า

$$V_{TPCP1} = BV_{CP} \times C_{tsCP} \times C_{tsd} \quad (Eq.9-24)$$

จากนั้นแก้ไขค่าปริมาตรเนื่องจากการขยายตัวหรือหดตัวของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กซึ่งได้รับผลเนื่องจากความดันที่เปลี่ยนไปจากสภาวะมาตรฐาน เป็นค่าปริมาตรท่อทดสอบความจุขนาดเล็กที่สภาวะอุณหภูมิและความดันขณะทำการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง (T_{CP} และ P_{CP})

$$V_{TPCP2} = V_{TPCP1} \times C_{psCP} \quad (Eq.9-25)$$

แล้วทำการปรับค่าปริมาตรของเหลวภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็กที่อุณหภูมิวัดได้ T_{CP} และความดันเฉลี่ยภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก P_{CP} ไปยังค่าปริมาตรของเหลวที่สภาวะอุณหภูมิมาตรฐาน (T_0)

$$V_{0PCP} = V_{TPCP2} \times C_{tlCP} \quad (Eq.9-26)$$

และทำการปรับค่าปริมาตรของเหลวของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็กที่อุณหภูมิมาตรฐานและความดัน P_{CP} ไปยังค่าปริมาตรของเหลวที่สภาวะมาตรฐาน (T_0 และ P_{atm})

$$V_{0CP} = V_{0PCP} \times C_{plCP} \quad (Eq.9-27)$$

ดังนั้นจะได้ค่าปริมาตรมาตรฐาน (Base Volume) ของของเหลวที่สภาวะมาตรฐานหรือสภาวะอ้างอิง (T_0 , P_{atm}) ภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก จึงมีค่าเท่ากับ

$$V_{0CP} = BV_{CP} \times C_{tsCP} \times C_{tsd} \times C_{psCP} \times C_{tlCP} \times C_{plCP} \quad (Eq.9-28)$$

สำหรับท่อทดสอบความจุแบบ Conventional Pipe Prover ค่าปริมาตรมาตรฐาน (Base Volume) ของของเหลวภายในท่อทดสอบความจุที่สภาวะมาตรฐานหรือสภาวะอ้างอิง (T_0 , P_{atm}) มีค่าเท่ากับ

$$V_{0P} = BV_P \times C_{tsP} \times C_{psP} \times C_{tlP} \times C_{plP} \quad (Eq.9-29)$$

● สำหรับมาตรวัดปริมาตรของเหลว

ทำการแปลงค่าปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย V_{mr} เมื่ออุณหภูมิภายในมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายเป็น T_m และความดันภายในมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย P_m ไปเป็นค่าปริมาตรที่อุณหภูมิอ้างอิง T_0 ขณะที่มีความดัน P_m

$$V_{0Pm} = V_{mr} \times C_{dlm} \quad (Eq.9-30)$$

หลังจากนั้นจึงปรับค่าปริมาตรที่ความดัน P_m ไปเป็นค่าปริมาตรของเหลวที่ความดันไอสมดุล ณ อุณหภูมิที่วัดได้ของเหลวขณะทำการวัดอุณหภูมิภายในท่อทดสอบความจุหรือมีค่าเท่ากับ ความดันบรรยากาศ P_{atm} นั้นเอง (สำหรับของเหลวซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม) และที่อุณหภูมิอ้างอิง T_0 ด้วยสมการ

$$V_{0m} = V_{0Pm} \times C_{plm} \quad (\text{Eq.9-31})$$

ปริมาตรของเหลวที่สภาวะมาตรฐานหรือสภาวะอ้างอิงของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายซึ่งวัดได้ จึงมีค่าเท่ากับ

$$V_{0m} = V_{mr} \times C_{dlm} \times C_{plm} \quad (\text{Eq.9-32})$$

3. การหามิเตอร์แฟคเตอร์ (Meter Factor) ของมาตรวัดปริมาตรของเหลว

พบว่าปริมาตรของเหลวที่ไหลผ่านทั้งมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายและท่อทดสอบความจุขนาดเล็กมีค่าเท่ากันเนื่องจากทั้งมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายและท่อทดสอบความจุขนาดเล็กต่อเชื่อมด้วยท่อ ซึ่งเป็นระบบปิด ดังนั้นหลังจากได้ทำการแก้ไขปรับค่าของปริมาตรที่วัดได้ทั้งจากมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายและท่อทดสอบความจุขนาดเล็กไปยังค่าปริมาตรที่สภาวะมาตรฐาน (T_0 , P_{atm})

ดังนั้นเราสามารถหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่สภาวะมาตรฐาน (T_0 , P_{atm}) จากนิยามมิเตอร์แฟคเตอร์ได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} MF(@T_0, P_{atm}) &= \frac{V_{0CP}}{V_{0m}} \\ &= \frac{BV_{CP} \times (C_{tsCP} \times C_{tsd} \times C_{psCP} \times C_{dlCP} \times C_{plCP})}{V_{mr} \times (C_{dlm} \times C_{plm})} \end{aligned} \quad (\text{Eq.9-33})$$

ถ้าใช้ท่อทดสอบความจุแบบ Conventional Pipe Prover เป็นแบบมาตรา ก็จะได้ค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่สภาวะมาตรฐาน (T_0 , P_{atm}) ได้เท่ากับ

$$MF(@T_0, P_{atm}) = \frac{BV_P \times C_{tsP} \times C_{psP} \times C_{dlP} \times C_{plP}}{V_{mr} \times C_{dlm} \times C_{plm}} \quad (\text{Eq.9-34})$$

เนื่องจากขณะทำการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองก่อนที่ทำการบันทึกค่าจริง จำเป็นต้องปล่อยให้ของเหลวไหลผ่านทั้งท่อทดสอบความจุขนาดเล็กและมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายด้วยอัตราการไหลใช้งานจริง (operating flow rate) จนกระทั่งอุณหภูมิและความดันภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็กและมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายมีค่าเท่ากัน ดังนั้น C_{dlCP} C_{plCP} จึงหักล้างกับ C_{dlm} C_{plm} ได้ ค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายในสมการข้างบนจึงเหลือ

$$MF = \frac{BV_{CP} \times (C_{tsCP} \times C_{tsd} \times C_{psCP})}{V_{mr}} \quad (\text{Eq.9-35})$$

หรือ

$$MF = \frac{BV_P \times C_{tsP} \times C_{psP}}{V_{mr}} \quad (\text{Eq.9-36})$$

แต่ถ้าค่าอุณหภูมิและความดันภายในมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายและท่อทดสอบความจุมีค่าต่างกัน เราก็ไม่สามารถใช้สมการของมิเตอร์แฟคเตอร์ในสมการข้างบนนี้ได้

ค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (MF) ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่ได้นั้นจึงเป็นค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ที่สภาวะมาตรฐานหรือสภาวะอ้างอิงของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย ดังนั้นเมื่อใช้มาตรวัดปริมาตร

ของเหลวที่ใช้ซื้อขายไปวัดปริมาณของของเหลวจึงสามารถคูณค่าปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายโดยตรง V_{mr} ด้วยค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (MF) ก็จะได้ปริมาตรของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายและวัดได้ ณ สภาวะมาตรฐาน หรือสภาวะอ้างอิง

แต่ถ้าค่าอุณหภูมิภายในมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายและท่อทดสอบความจุขนาดเล็กมีค่าไม่เท่ากัน ก็ไม่สามารถใช้สมการของมิเตอร์แฟคเตอร์ในสมการ (Eq.9-35) ได้ ดังนั้นจำเป็นต้องระมัดระวังในการใช้ค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ให้ถูกต้องกับสภาวะเงื่อนไขในแต่ละกรณีไป

4. ค่าเค-แฟคเตอร์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลว

มาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่สามารถนำมาสอบเทียบด้วยท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (compact prover) ควรเป็นมาตรวัดซึ่งมีหลักการทำงานให้ผลการแสดงค่าการวัดโดยใช้การแปลงสัญญาณพัลส์จากมาตรวัดเปลี่ยนเป็นค่าปริมาตรที่วัดได้ ดังนั้นการปรับแปลงค่าการแสดงผลที่วัดได้ของมาตรวัดจึงจำเป็นต้องทำการปรับค่าการแปลงสัญญาณพัลส์ของมาตรวัดนั้นๆ ด้วยค่าเค - แฟคเตอร์ (K - Factor) นั้นเอง แต่ผลจากการเปลี่ยนแปลงค่าเค - แฟคเตอร์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่ตามมาก็คือทำให้ผลการสอบเทียบและ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองครั้งนั้นได้ค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (MF) ค่าใหม่ซึ่งต่างจากค่าเดิม ด้วยเหตุนี้ในส่วนการคำนวณจึงต้องการหาค่า K - Factor ที่จะทำให้ได้ค่า MF ใกล้เคียง 1.000 หรือให้ได้ค่า Meter error เข้าใกล้ 0.000 % มากที่สุดเพื่อนำไปปรับค่า K - Factor ซึ่งทางบริษัทผู้ผลิตได้ให้มากับมาตรวัดจากโรงงานก่อนหน้านี้หรือเป็นค่า K - Factor ที่ได้รับการสอบเทียบก่อนหน้านี้ ดังนั้นในระหว่างดำเนินการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองจึงเป็นการตรวจสอบจำนวนสัญญาณพัลส์ซึ่งนับได้จากมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายตั้งแต่ตัวกวาด (displacer) เคลื่อนที่กระแทกสวิทช์ตรวจจับตัวกวาดตัวแรกจนถึงตัวที่สองของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กมีค่าเท่ากับ N ขณะอุณหภูมิภายในมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายเป็น T_m และความดันภายในมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย P_m

วิธีการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายด้วยท่อทดสอบความจุขนาดเล็กมีหลักการทำงานในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองที่ใกล้เคียงกับการสอบเทียบและ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายด้วยท่อทดสอบความจุแบบ Conventional Pipe Prover แต่จะต่างกันตรงที่ว่าในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายด้วยท่อทดสอบความจุ ปริมาตรมาตรฐาน (base volume) ของท่อทดสอบความจุแบบ Conventional Pipe Prover ต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้ของเหลวไหลผ่านมาตรวัดและมาตรวัดส่งสัญญาณพัลส์ออกมาอย่างน้อย 10,000 พัลส์ แต่ในกรณีการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายด้วยท่อทดสอบความจุขนาดเล็กนั้นไม่จำเป็นต้องให้มาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายส่งสัญญาณพัลส์ออกมามากกว่าหรือเท่ากับ 10,000 พัลส์ ทั้งนี้เนื่องจากท่อทดสอบความจุขนาดเล็กได้ใช้สวิทช์ตรวจจับตัวกวาดที่มีความไวสูง อีกทั้งยังใช้เทคนิค pulse interpolation ร่วม ทำให้ผลการทำงานมีความแม่นยำสูงขึ้นในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรอง

เมื่อนับสัญญาณพัลส์ซึ่งมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายสร้างขึ้นขณะที่ของเหลวไหลผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรมาตรฐาน (base volume) ของท่อทดสอบความจุ (pipe

prover) หลังทำการปรับค่าปริมาตรไปยังสภาวะมาตรฐานหรือสภาวะอ้างอิง ก็จะได้ค่าเค - แฟคเตอร์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่สภาวะอ้างอิง

จากนิยามค่าเค - แฟคเตอร์ (K - Factor)

$$K - Factor = \frac{N}{V_m} \quad (Eq.9-37)$$

เมื่อ N = จำนวนสัญญาณพัลส์ที่นับจากมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย (Pluses Count)

V_m = ปริมาณของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายในขณะเดียวกัน

ค่าเค - แฟคเตอร์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่สภาวะขณะทำการสอบเทียบ และ/หรือตรวจสอบให้คำรับรอง (@ T_m , P_m) เมื่อนับจำนวนสัญญาณพัลส์จากมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายและปริมาณของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายขณะนั้นมีค่าเท่ากับปริมาตรของเหลวไหลผ่านท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก ดังนั้น

$$K - Factor(@T_m, P_m) = \frac{\text{Pulses}}{V_{mr}} \quad (Eq.9-38)$$

แต่ค่าเค - แฟคเตอร์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่สภาวะอ้างอิงหรือสภาวะมาตรฐาน (@ T_0 , P_{atm}) จำเป็นต้องทำการปรับค่าปริมาตรของเหลวภายในท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (small volume prover) ไปยังสภาวะอ้างอิงเสียก่อน จึงมีค่าเท่ากับ

$$K - Factor_{CP}(@T_0, P_{atm}) = \frac{\text{Pulses}}{BV_{CP} \times C_{tsCP} \times C_{tsd} \times C_{psCP} \times C_{dlCP} \times C_{plCP}} \quad (Eq.9-39)$$

สำหรับท่อทดสอบความจุแบบ Conventional Pipe Prover

$$K - Factor_P(@T_0, P_{atm}) = \frac{\text{Pulses}}{BV_P \times C_{tsP} \times C_{psP} \times C_{dlP} \times C_{plP}} \quad (Eq.9-40)$$

5. การปรับค่าเค - แฟคเตอร์ (K - Factor) และค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (Meter Factor; MF) ของมาตรวัดปริมาตรของเหลว

ภายหลังจากการคำนวณแล้วค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (MF) ค่าใหม่ซึ่งต่างจากค่าเดิม หากค่า MF ที่ได้มีค่าไม่ใกล้เคียง 1.000 และได้ค่า Meter error มากกว่า 0.3% (กรณีเฉพาะตัวมาตรวัด) หรือ 0.5% (กรณีระบบการวัดปริมาตรของเหลว) ให้คำนวณหาค่า K - Factor ใหม่ที่จะทำให้ได้ค่า MF ใกล้เคียง 1.000 และได้ค่า Meter error เข้าใกล้ 0.0 % มากที่สุด จากนั้นปรับค่า K - Factor ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวเพื่อหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายใหม่

	K-Factor			
เริ่มต้น	KF_0			
ปรับค่าครั้งที่ 1 MF_1		$KF_1 = KF_0 / MF_1$		
ปรับค่าครั้งที่ 2 MF_2			$KF_2 = KF_1 / MF_2$	
ปรับค่าครั้งที่ 3 $MF_3 = 1.0000$				$KF_3 = KF_2$

6. ค่าผลผิดของมาตรวัดปริมาตรของเหลว (Meter Error)

เราสามารถหาค่าผลผิดของมาตรวัดปริมาตรของเหลวซึ่งโดยปกติแล้วมักนิยมบอกเป็นค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ หรืออาจหาได้จากค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) ดังนี้คือ

$$\begin{aligned}\%Error (@T_0, P_{atm}) &= \frac{V_{0m} - V_{0CP}}{V_{0CP}} \times 100 \% \\ &= \left(\frac{V_{0m}}{V_{0CP}} - 1 \right) \times 100 \% \\ &= \left(\frac{1}{MF} - 1 \right) \times 100 \% \quad (Eq.9-41)\end{aligned}$$

ผลผิดของมาตรวัดปริมาตรของเหลว (Meter Error) ต้องไม่มากกว่า $\pm 0.5 \%$ สำหรับระบบการวัดปริมาตร หรือ $\pm 0.3\%$ สำหรับตัวมาตรวัดปริมาตรของเหลวของมาตรวัดปริมาตรของเหลวชั้นความเที่ยง 0.5

7. ค่าความสามารถทำซ้ำได้ (repeatability)

ในการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายด้วยท่อทดสอบ ความจุขนาดเล็กควรมีค่าความสามารถทำซ้ำ (repeatability) ของการสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองติดต่อกัน 5 ครั้งแล้วมีค่าไม่เกิน 0.05% ที่อัตราการไหลเดียวกัน

$$\text{Repeatability} = \frac{MF_{\max} - MF_{\min}}{MF_{\text{avg}}} \times 100 \% \quad (Eq.9-42)$$

$$\text{Repeatability} \leq 0.05 \% \quad (Eq.9-43)$$

8. ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามิเตอร์แฟคเตอร์กับค่าอัตราการไหลตลอดในช่วงการวัดได้ของมาตรวัด โดย ส่วนของช่วงอัตราการไหลวัดได้ของมาตรวัดครอบคลุมตั้งแต่ $Q_{\min}$ ถึง $Q_{\max}$ ตามที่ระบุไว้โดยผู้ผลิต ค่าความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของมาตรวัดปริมาตรไม่ควรเกินมีค่าเกิน $\pm 0.1\% - \pm 0.15 \%$

เมื่อนำ MF ของมาตรวัดที่หาได้จากแต่ละอัตราการไหลมา plot curve แล้วทำการหาค่า Linearity ของมาตรวัดตลอดช่วงอัตราการไหลที่พิจารณา

$$\text{Linearity} = \frac{MF_{Q_{\max}} - MF_{Q_{\min}}}{\left(\frac{MF_{Q_{\max}} + MF_{Q_{\min}}}{2} \right)} \times 100 \% \quad (Eq.9-44)$$

$$\text{Linearity} \leq \pm 0.1\% - \pm 0.15 \% \quad (Eq.9-45)$$

9. สำหรับในกรณีที่อุณหภูมิอ้างอิงของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (compact prover) ต่างจากอุณหภูมิอ้างอิงของมาตรวัดปริมาตรของเหลว (Flowmeter) สามารถคำนวณค่ามิเตอร์แฟคเตอร์มาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย ได้ดังนี้

กรณี 1 อุณหภูมิอ้างอิงของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก $T_{0CP} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิอ้างอิงประจำมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย $T_m = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

ดังนั้นเราจำเป็นต้องทำการปรับปริมาตรของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กจากอุณหภูมิอ้างอิงประจำท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก $T_{0CP} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} ไปยังค่าปริมาตรที่ $T_0 = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} เพื่อที่จะสามารถทำการเปรียบเทียบปริมาตรที่สถานะเดียวกันระหว่างปริมาตรของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กกับมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายได้

$$MF_{30} = \frac{BV_{CP} \times (C_{tsCP} \times C_{tsd} \times C_{psCP} \times C_{dlCP} \times C_{plCP})}{V_{mr} \times (C_{dlm} \times C_{plm})}$$

$$= \frac{BV_{CP} \times \left\{ [1 + \gamma(T_{CP} - 15)] \times [1 + \gamma(T_{sd} - 15)] \times \left[1 + \frac{P_{CP} \times D}{E \times t} \right] \times \left(\frac{e^{(-\alpha T \times (T_{CP} - 15) \times (1 + 0.8 \alpha T \times (T_{CP} - 15)))}}{e^{(-\alpha T \times 15 \times (1 + 0.8 \times 15 \times \alpha T))}} \right) \times \left(\frac{1}{(1 - P_{CP}) \times F_{CP}} \right) \right\}}{V_{mr} \times \left(\frac{e^{(-\alpha T \times (T_m - 15) \times (1 + 0.8 \alpha T \times (T_m - 15)))}}{e^{(-\alpha T \times 15 \times (1 + 0.8 \times 15 \times \alpha T))}} \right) \times \left(\frac{1}{(1 - P_m) \times F_m} \right)}$$

(Eq.9-46)

สำหรับท่อทดสอบความจุแบบ Conventional Pipe Prover

$$MF_{30C} = \frac{BV_P \times C_{tsP} \times C_{psP} \times C_{dlP} \times C_{plP}}{V_{mr} \times C_{dlm} \times C_{plm}}$$

$$= \frac{BV_P \times (1 + \gamma(T_P - 15)) \times \left(1 + \frac{P \times D}{E \times t} \right) \times \left(\frac{e^{(-\alpha T \times (T_P - 15) \times (1 + 0.8 \alpha T \times (T_P - 15)))}}{e^{(-\alpha T \times (15) \times (1 + 0.8 \times (15) \times \alpha T))}} \right) \times \left(\frac{1}{(1 - P_P) \times F_P} \right)}{V_{mr} \times \left(\frac{e^{(-\alpha T \times (T_m - 15) \times (1 + 0.8 \alpha T \times (T_m - 15)))}}{e^{(-\alpha T \times (15) \times (1 + 0.8 \times (15) \times \alpha T))}} \right) \times \left(\frac{1}{(1 - P_m) \times F_m} \right)}$$

(Eq.9-47)

กรณี 2 อุณหภูมิอ้างอิงของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก $T_{0CP} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิอ้างอิงประจำมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย $T_m = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

ดังนั้นเราจำเป็นต้องทำการปรับปริมาตรของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กจากอุณหภูมิอ้างอิงประจำท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก $T_{0CP} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} ไปยังค่าปริมาตรที่ $T_0 = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, P_{atm} เพื่อที่จะสามารถทำการเปรียบเทียบปริมาตรที่สถานะเดียวกันระหว่างปริมาตรของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กกับมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายได้

$$MF_{15} = \frac{BV_{CP} \times (C_{tsCP} \times C_{tsd} \times C_{psCP} \times C_{dlCP} \times C_{plCP})}{V_{mr} \times (C_{dlm} \times C_{plm})}$$

$$= \frac{BV_{CP} \times \left\{ [1 + \gamma(T_{CP} - 30)] \times [1 + \gamma(T_{sd} - 30)] \times \left[1 + \frac{P_{CP} \times D}{E \times t} \right] \times \left(e^{(-\alpha T \times (T_{CP} - 15) \times (1 + 0.8 \alpha T \times (T_{CP} - 15)))} \right) \times \left(\frac{1}{(1 - P_{CP}) \times F_{CP}} \right) \right\}}{V_{mr} \times \left(e^{(-\alpha T \times (T_m - 15) \times (1 + 0.8 \alpha T \times (T_m - 15)))} \right) \times \left(\frac{1}{(1 - P_m) \times F_m} \right)}$$

(Eq.9-48)

สำหรับท่อทดสอบความจุแบบ Conventional Pipe Prover

$$MF_{15} = \frac{BV_P \times C_{tsP} \times C_{psP} \times C_{dlP} \times C_{plP}}{V_{mr} \times C_{dlm} \times C_{plm}}$$

$$= \frac{BV_P \times (1 + \gamma(T_P - 30)) \times \left(1 + \frac{P \times D}{E \times t} \right) \times \left(e^{(-\alpha T \times (T_P - 15) \times (1 + 0.8 \alpha T \times (T_P - 15)))} \right) \times \left(\frac{1}{(1 - P_P) \times F_P} \right)}{V_{mr} \times \left(e^{(-\alpha T \times (T_m - 15) \times (1 + 0.8 \alpha T \times (T_m - 15)))} \right) \times \left(\frac{1}{(1 - P_m) \times F_m} \right)}$$

(Eq.9-49)

ตัวอย่าง การสอบเทียบมิเตอร์ซื้อขายโดยใช้ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Compact Prover)

ข้อมูลของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Compact Prover)

ขนาดความจุที่อุณหภูมิอ้างอิงและความดันบรรยากาศ	59.493 ลิตร
วัสดุ	17-4 Stainless Steel
Modulus of Elasticity for Stainless Steel	196,500,660 Kpa
อุณหภูมิอ้างอิง	15 °C
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน D	12.250 นิ้ว
ความหนา, t	0.8750 นิ้ว
สัมประสิทธิ์การขยายตัวของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก(Flow Tube Coeff.)	0.0000216 /°C

Invar rod ของ ท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก

สัมประสิทธิ์การขยายตัวของ invar rod (Invar rod Linear Coeff.)	0.00000144 /°C
---	----------------

ข้อมูลมิเตอร์ซื้อขาย

Turbine Meter ขนาด 4 นิ้ว	
อัตราการไหลขณะใช้งาน (Normal Flow)	2500 ลิตรต่อนาที

ของเหลวตัวกลาง

เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม	
ซึ่งมีความหนาแน่นที่ 15 °C	0.8489 g/cm ³

วิธีคำนวณ

คำนวณหาปริมาตรมาตรฐานของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กกับค่าปริมาตรที่อ่านได้จากมิเตอร์ซื้อขายโดยแปลงไปที่สภาวะอ้างอิงเพื่อหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์

$$MF = \frac{BV_{CP} \times (C_{tsCP} \times C_{tsd} \times C_{psCP} \times C_{tlCP} \times C_{plCP})}{V_{mr} \times (C_{tln} \times C_{pln})}$$

เมื่อ ค่า Base Volume; BV_{CP} = 59.493 ลิตร

เมื่อวัดอุณหภูมิของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก 28.6 °C (หากเครื่องวัดอุณหภูมิซึ่งได้รับการสอบเทียบจากหน่วยงานของรัฐ จำเป็นต้องปรับค่า ก็ต้องปรับค่าเสียก่อน)

$$\begin{aligned} C_{tsCP} &= 1 + \gamma(T_{CP} - 15) \\ &= 1 + 0.0000216(28.6 - 15) \\ &= 1.0003 \\ C_{tsd} &= 1 + \gamma(T_d - 15) \\ &= 1 + 0.00000144(28.6 - 15) \\ &= 1.0000 \end{aligned}$$

หาค่าแก้ไขเนื่องจากการขยายตัวของท่อทดสอบความจุขนาดเล็กซึ่งเป็นผลจากความดันภายใน

$$\begin{aligned}
 C_{psCP} &= 1 + \frac{P_{CP}D}{ET} \\
 &= 1 + \frac{68.9 \times 12.250}{196500660 \times 0.875} \\
 &= 1.0000
 \end{aligned}$$

หาค่า C_{tlCP} คือ หาค่าแก้ไขปริมาตรน้ำมันที่ทดสอบความจุขนาดเล็ก V_{CP} ไปที่อุณหภูมิ 15 °C โดย

$$C_{tlCP} = e^{[-\alpha_{15}(t-15)(1+0.8\alpha_{15}(t-15))]}$$

เมื่อ

$$\alpha_{15} = \frac{K_0}{\rho_{15}^2} + \frac{K_1}{\rho_{15}} + K_2$$

น้ำมันโซลามีความหนาแน่น 848.9 kg/m³ ดังนั้นจะได้ค่า

$$K_0 = 186.9696$$

$$K_1 = 0.4862$$

$$K_2 = -0.0$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 \alpha_{15} &= \frac{186.9696}{848.9^2} + \frac{0.4862}{848.9} \\
 &= 0.000832
 \end{aligned}$$

แทนค่า α_{15} ลงในสมการ C_{tlCP} เมื่อ $t = 37$ °C

$$\begin{aligned}
 C_{tlP} &= e^{(-0.000832 \times (28.6-15)(1+0.8 \times 0.000832(28.6-15)))} \\
 &= 0.9886
 \end{aligned}$$

หาค่า C_{plCP}

$$\begin{aligned}
 C_{plCP} &= \frac{1}{(1-PF)} \\
 &= \frac{1}{(1-68.9 \times 0.000000789)} \\
 &= 1.0001
 \end{aligned}$$

พิจารณาที่มาตรวจวัด

พิจารณาปริมาตรน้ำมันที่มาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายอ่านได้และคำนวณหาปริมาตรที่สภาวะอ้างอิงจากผลการ

เมื่อนับจำนวน Pluses ได้ 572.993 Pluses จากมิเตอร์ขณะที่ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมไหลผ่านระหว่างสวิตช์ทั้งสองของท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก และมีเตอร์มีค่า K-factor เท่ากับ 9.6689790 Pluses/liter ดังนั้นมิเตอร์จะอ่านค่าปริมาตรได้

$$\begin{aligned}
 V_{mr} &= \frac{572.993}{9.6689790} \\
 &= 59.2610 \quad \text{ลิตร}
 \end{aligned}$$

สำหรับค่า C_{tlm} และ C_{plm} มีค่าเท่ากับท่อทดสอบความจุเนื่องจากอุณหภูมิและความดันมีค่าเท่ากัน ดังนั้น

$$C_{tlm} = 0.9886$$

$$C_{plm} = 1.0001$$

เปรียบเทียบปริมาตรที่วัดได้จากท่อทดสอบความจุขนาดเล็กกับมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย

$$\begin{aligned} MF &= \frac{V_{oCP}}{V_{0m}} \\ &= \frac{BV_{CP} \times (C_{tsCP} \times C_{tsd} \times C_{psCP} \times C_{tlCP} \times C_{plCP})}{V_{mr} \times (C_{tlm} \times C_{plm})} \\ &= \frac{59.493 \times (1.0003 \times 1.0000 \times 1.0000 \times 0.9886 \times 1.0001)}{59.2610 \times (0.9886 \times 1.0001)} \\ &= \frac{59.493 \times (1.0003 \times 1.0000 \times 0.9886 \times 1.0001)}{59.2610 \times (0.9886 \times 1.0001)} \\ &= \frac{59.493 \times (0.9890)}{59.2610 \times (0.9887)} \\ &= \frac{58.838}{58.591} \end{aligned}$$

$$MF = 1.0042$$

ค่า MF ของการสอบเทียบรอบที่ 1 มีค่า **1.0042**

เมื่อทำการสอบเทียบต่ออีกสองรอบได้ค่า MF ดังต่อไปนี้

ค่า MF ของการสอบเทียบรอบที่ 2 มีค่า **1.0045**

ค่า MF ของการสอบเทียบรอบที่ 3 มีค่า **1.0047**

ได้ค่าเฉลี่ยของ MF เท่ากับ **1.0045**

หาค่า Repeatability

$$\text{Repeatability} = \left(\frac{1.0047}{1.0042} - 1 \right) \times 100 = 0.05 \%$$

สรุปได้ว่ามาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายสามารถอ่านค่าปริมาตรผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมนี้ได้ถูกต้องแม่นยำเพียงพอที่จะยอมรับได้

ANS

Meter - Compact Prover

ตารางตรวจสอบมาตรวัดซื้อขาย (Meter) ด้วยท่อทดสอบความจุขนาดเล็ก (Compact Prover)																	
สำนักงานกลางมาตรวัด กอชั่งตวงวัด																	
วันที่ ๑๖ มกราคม ๒๕๕๐										ผู้ขอรับการตรวจสอบ บริษัท METER & COMPACT PROVER จำกัด							
Compact Prover หมายเลข 135-34										มาตราวัดหมายเลข 30-35 PD & 4							
อุณหภูมิอ้างอิง 15 °C										Model No. LF4-V1 Serial No. JG - 301356							
Base Volume @ Downstream (ลิตร) 59.493										อัตราการใช้ฐาน 1000 ลิตร/นาที่ 2500 ลิตร/นาที่							
เส้นผ่านศูนย์กลางของ Flow tube(นิ้ว) 12.250										อัตราการไหลต่ำสุด 400 ลิตร/นาที่							
ส.ป.ส.การขยายตัวตามพื้นที่ผิว (Flow Tube) 0.0000216										ความหนาแน่น (@15 °C.) 0.8489 กิโลกรัม/ลิตร (กรัม/ลบ.ซม.)							
Modulus Of Elasticity (KPa) 196,500,660										K-factor 9.66868 Pulses/Liter							
ส.ป.ส.การขยายตัวตามเส้นผ่าศูนย์กลาง (Invar Rod) 0.00000144										ความดัน 9.66868 Pulses/Liter							
ครั้งที่	อุณหภูมิ (ท.°)	ความดัน PCP (KPa)	CtsCP*Clid	CpsCP	CtiCP	CpiCP	CCFCP	ปริมาตรจริง (@ 15 °C. (ลิตร)	ปริมาตรที่อ่านได้ (ลิตร)	อุณหภูมิ (ท.°)	Pm (KPa)	Cplm	Ctlm	CCFm	ปริมาตรจริง (@ 15 °C. (ลิตร)	Meter Factor @ 15 °C. , 0 Psi.	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	
1	28.60	68.90	1.0003	1.0000	0.9886	1.0001	0.9890	58.839	59.2610	28.60	68.90	1.0001	0.9886	0.9887	58.591	1.0042	
2	28.60	68.90	1.0003	1.0000	0.9886	1.0001	0.9890	58.839	59.2457	28.60	68.90	1.0001	0.9886	0.9887	58.576	1.0045	
3	28.60	68.90	1.0003	1.0000	0.9886	1.0001	0.9890	58.839	59.2330	28.60	68.90	1.0001	0.9886	0.9887	58.564	1.0047	
Repeatability = 0.050 %										Meter Factor เฉลี่ย 1.0045							

หมายเหตุ

นายชั่งตวงวัด กอชั่งตวงวัด

ผู้ตรวจสอบ

รูปที่ 9-51 ตารางสรุปผลการคำนวณตามตัวอย่าง

ตัวอย่าง การตรวจสอบมาตรวัดน้ำมันเชื้อเพลิงเทียบกับท่อทดสอบความจุ (Pipe Prover)

ข้อมูลของท่อทดสอบความจุ (pipe prover)

ค่า Base Volume (BV) ของ Pipe prover	2.3672 m ³ ที่ 15 °C
สัมประสิทธิ์การขยายตัว, γ	0.0000335 /°C
วัสดุ	Mild steel
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, D	0.2545 เมตร
ความหนาของ Pipe Prover, t	0.0093 เมตร
Modulus of Elasticity, E	210,000,000 Kpa

ข้อมูลของมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่จะตรวจสอบ

แบบ Turbine meter -ขนาด	4 นิ้ว
อัตราการไหลขณะทำงานปกติ	1400 ลิตร/นาที

ข้อมูลของเหลวตัวกลาง

มีความหนาแน่น	778.0 กรัม/ล.บ.ชม.
---------------	--------------------

วิธีการคำนวณ

มาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย นับสัญญาณ Pulses ระหว่างที่ลูกบอลเคลื่อนที่ผ่านสวิทช์ที่ 1 ถึงสวิทช์ที่ 2 ได้ 14,721 pulses โดยมีเตอร์มีค่า K-Factor = 6,214.6 Pulse/m³
ดังนั้นค่าที่มาตรวัดอ่านได้

$$V_{mr} = \frac{14721}{6214.6} = 2.3688 \text{ m}^3 = 2368.8 \text{ ลิตร}$$

วัดอุณหภูมิภายในมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขาย	34.1 °C
ความดัน	32.89 Kpa

หาค่าแก้ไขเนื่องจากอุณหภูมิต่อของเหลว C_{tlm} เมื่อ

ความหนาแน่นของของเหลวเป็น	778.0 g/cm ³
อุณหภูมิ	34.1 °C

จะได้

$$C_{tlm} = 0.9795$$

ค่าแก้ไขปริมาตรเนื่องจากความดันมีผลต่อปริมาตรของเหลว C_{plm}

$$C_{plm} = 1.0000$$

จะได้ปริมาตรที่อ่านจากมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายที่สภาวะอ้างอิงซึ่งก็คือที่ อุณหภูมิ 15 °C ความดันบรรยากาศ (T_{15}, P_{atm})

$$V_{0m} = V_{mr} \times MF \times C_{tlm} \times C_{plm} = 2368.8 \times MF \times 0.9795 \times 1.0000$$

ขณะที่ท่อทดสอบความจุ Pipe Prover มี

อุณหภูมิ	34. °C
ความดัน	32.89 Kpa
มีปริมาตรของท่อทดสอบความจุ BV_p	2367.2 ลิตร

หาค่าแก้ไขเนื่องจากความดันกระทำต่อผนังของท่อทดสอบความจุ C_{psp} เมื่อ

เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อทดสอบความจุ, D	=	0.2545 เมตร
ความหนาของผนังท่อทดสอบความจุ, t	=	0.0093 เมตร
มีค่า Modulus of Elasticity, E	=	210,000,000 Kpa
ความดันภายในท่อทดสอบความจุ, P	=	32.89 Kpa

$$\begin{aligned}C_{psp} &= 1 + \left(\frac{P \times D}{E \times t} \right) \\&= 1 + \left(\frac{32.89 \times 0.2545}{210000000 \times 0.0093} \right) \\&= 1.0000\end{aligned}$$

หาค่า C_{isp} เมื่อ

อุณหภูมิ	34	°C
สัมประสิทธิ์การขยายตัว, γ	0.0000335	/°C

ดังนั้น

$$\begin{aligned}C_{isp} &= 1 + \gamma(T-15) \\&= 1 + 0.0000335 (34.-15) \\&= 1.0006\end{aligned}$$

จะได้ค่าปริมาตรน้ำมันที่ท่อทดสอบความจุขณะที่ทำการสอบเทียบ (T_T , P_P)

$$\begin{aligned}V_p &= BV_p \times C_{isp} \times C_{psp} \\&= 2367.2 \times 1.0006 \times 1.0000\end{aligned}$$

ต่อไปต้องทำการปรับปริมาตรที่วัดได้ขณะสอบเทียบไปเป็นปริมาตรที่สภาวะเดียวกันกับปริมาตรที่ปรับแล้วจากมาตรวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายหรือสภาวะอ้างอิงนั่นเองโดยทำการปรับปริมาตรไปที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิอ้างอิง 15 °C (T_0 , P_{atm}) โดยคูณด้วยค่าแก้ไข C_{tlp} และ C_{plp}

ค่า C_{tlp} เมื่ออุณหภูมิภายในท่อทดสอบความจุ	34	°C
ของเหลวตัวกลางมีความหนาแน่น	778.0	g/cm ³

ดังนั้น

$$C_{tlp} = 0.9796$$

ค่า C_{plp} เมื่อความดันมีค่า	32.89	Kpa
---------------------------------	-------	-----

จะได้

$$C_{plp} = 1.0000$$

จะได้ค่าปริมาตรน้ำมันที่ท่อทดสอบความจุที่สภาวะอ้างอิงซึ่งในที่นี้คือที่อุณหภูมิ 15 °C ความดันบรรยากาศ (T_{15} , P_{atm})

$$V_{op} = BV_p \times C_{tsp} \times C_{psp} \times C_{tlp} \times C_{plp}$$

$$= 2367.2 \times 1.0006 \times 1.0000 \times 0.9796 \times 1.0000$$

ดังนั้นจะได้ค่า MF จากสมการ

$$MF = \frac{BV_p \times C_{tsp} \times C_{psp} \times C_{tlp} \times C_{plp}}{V_{mr} \times C_{tlm} \times C_{plm}}$$

$$= \frac{2367.2 \times 1.0006 \times 1.0000 \times 0.9796 \times 1.0000}{2368.8 \times 0.9795 \times 1.0000}$$

$$= \frac{2367.2 \times 0.9802}{2368.8 \times 0.9795}$$

$$= \frac{2320.3}{2320.2}$$

$$= 1.0000$$

$$MF = 1.0000$$

ทำการทดสอบมาตรฐานวัดปริมาตรของเหลวที่ใช้ซื้อขายหลายๆครั้ง แล้วหาค่า Repeatability -ของค่า MF ซึ่งไม่ควรเกินกว่า 0.05%

ANS

Meter - Pipe Prover

ตารางตรวจสอบมาตรวัดซื้อขาย (Meter) ด้วยท่อสอบเทียบ (Pipe Prover)															
สำนักงานกลางมาตรวัด กอช่งตวงวัด															
วันที่ทำการตรวจสอบ				ผู้ดำเนินการตรวจสอบ											
วันที่ ๑๖ มกราคม ๒๕๔๐				บริษัท METER & PIPEPROVER จำกัด											
Pipe Prover หมายเลข				๓&๓ 458-36		Type		unidirection & 6		มาตรวัดหมายเลข		475-9		TYPE	
Base Volume (ลิตร):BV				2367.2		อุณหภูมิอ้างอิง		15 จ.		ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(นิ้ว)		4		Model No. LF4-V1	
ส.ป.ส.การขยายตัวของ Flow tube				0.0000335		วัสดุ		Mild Steel		อัตราการไหลสอบเทียบ		1200 ลิตร/นาที		Max. Flow Rate	
เส้นผ่านศูนย์กลางของ Flow tube(เมตร)				0.2545		ความหนาของ Flow tube(เมตร)		0.0093						1400 ลิตร/นาที	
Modulus Of Elasticity (KPa):Flow Tube				210,000,000						ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ตรวจสอบ		ULP		ความหนาแน่น (@15 จ.)	
														0.7780	
														กิโลกรัม/ลิตร	
														(กรัม/ลบ.ซม.)	
ครั้งที่	อุณหภูมิ	ความดัน	CtsP	CpsP	CtlP	CplP	CCFP	ปริมาตรจริง	ปริมาตรที่อ่านได้	อุณหภูมิ	ความดัน	Ctlm	Cplm	CCFm	ปริมาตรจริง
	TP (จ.)	PP KPa						@ 15 จ. (ลิตร)	(ลิตร)	(จ.)	(KPa)	@ 15 จ. (ลิตร)			@ 15 จ. (ลิตร)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
1	34.00	32.89	1.0006	1.0000	0.9796	1.0000	0.9802	2320.3	2368.8	34.10	32.89	0.9795	1.0000	0.9795	2320.2
2	34.00	32.89	1.0006	1.0000	0.9796	1.0000	0.9802	2320.3	2368.9	34.12	32.89	0.9795	1.0000	0.9795	2320.3
3	34.00	32.89	1.0006	1.0000	0.9796	1.0000	0.9802	2320.3	2369.1	34.10	32.89	0.9795	1.0000	0.9795	2320.5
				Repeatability =				0.010 %				Meter Factor เฉลี่ย			
												(@ 15 จ., 0 Psig)			
												1.0000			

หมายเหตุ

นายช่งตวงวัด กอช่งตวงวัด

ผู้ตรวจสอบ

รูปที่ 9-52 ตารางสรุปผลการคำนวณตามตัวอย่าง

Audit Trail และ Weights and Measures Control

มาตรวัดปริมาณของเหลวในปัจจุบันทันสมัยมาก โดยเฉพาะการนำระบบคอมพิวเตอร์ซึ่งนับวันราคาจะถูกลงแต่ประสิทธิภาพยิ่งสูงขึ้นมาทำงานร่วมกับระบบมาตรวัดปริมาณของเหลว ทำให้ตรวจสอบการทำงานของระบบคอมพิวเตอร์ดังกล่าวยังต้องการบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถหลากหลายสาขาวิชาชีพมากขึ้น การตรวจสอบด้านอิเล็กทรอนิกส์ของระบบคอมพิวเตอร์, การ wiring สายสัญญาณจากมาตรวัดปริมาณของเหลวไปยังส่วนประเมินผลและส่วนแสดงค่า, การ configuration ระบบคอมพิวเตอร์ให้ค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการวัดปริมาณไม่ว่าจะเป็นอัตราการไหลเป็นหน่วยมวลต่อเวลาหรือหน่วยปริมาตรต่อเวลา ตลอดจนการกำหนดค่า K-Factor หรือมิเตอร์แฟคเตอร์ (MF) ของมาตรวัด, ค่าความหนาแน่นของของเหลวซึ่งมีผลต่อการคำนวณปริมาตร ณ สถานะอ้างอิง, การปรับหน่วยวัดหรือการปรับอัตราส่วนสัญญาณทางไฟฟ้าของเครื่องวัดอุณหภูมิและความดัน หรือค่าความหนาแน่น และ ฯลฯ สิ่งเหล่านี้ถูกเรียกรวมกันว่า “Configuration Parameters” หรือ “Calibration Parameters” หรือ “Metrological Parameters” หากมีผู้ใดสามารถถึงระบบคอมพิวเตอร์ได้โดยปราศจากมาตรระบบป้องกันที่ถูกต้องและสมควรแก่เหตุจากนั้นไปทำการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ แล้วทำให้ผลการวัดผิดไปจากการสอบเทียบหรือตรวจสอบให้คำรับรองแล้ว การทำงานที่หนักและเหนื่อยที่ผ่านมาจะไม่มีผลประโยชน์ต่อการปฏิบัติงานหน้าที่ซึ่งตั้งวางวัดแต่อย่างใดเลย

เราจึงควรเรียกรายละเอียดการทำงานของระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้ร่วมกับมาตรวัดปริมาณของเหลวจากผู้ครอบครองมาตรวัดมาศึกษาให้ชัดเจน เพื่อให้ทราบวิธีการเข้าถึงรหัสการอนุญาตเปลี่ยนแปลงค่า configuration ในระบบคอมพิวเตอร์หรือที่เรียกว่า “Flowcom” หรือ “Flow Computer” ต้องดำเนินการชี้แจงเป็นลายลักษณ์อักษรก่อนที่ดำเนินการตรวจสอบให้คำรับรองมาตรวัดปริมาณของเหลวอย่างเสียไม่ได้ หรือตรวจสอบว่าระบบมาตรวัดปริมาณของเหลวนั้นได้ผ่านการตรวจสอบต้นแบบจากหน่วยงานชั่งตวงวัดของรัฐของผู้ผลิต หรือหน่วยงานที่น่าเชื่อถือก็เป็นอีกหนทางหนึ่ง

แต่สิ่งที่จะให้ความสนใจเรื่องหนึ่งสำหรับเครื่องชั่งตวงวัดที่มีการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์ นั่นก็คือ “AUDIT TRAIL” ถือเป็นรูปแบบที่ยอมรับรูปแบบหนึ่งที่เรียกว่า “Electronic Security” เพื่อป้องกันรักษาวัตถุประสงค์และคุณสมบัติทางด้านชั่งตวงวัดของเครื่องชั่งตวงวัดนั้นๆ ไม่ให้เปลี่ยนแปลงหรือมีผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำของเครื่องชั่งตวงวัด เขียนไปก็มันอยู่เหมือนกัน ก็เอาง่ายๆว่า เครื่องชั่งตวงวัดต้องได้รับการรักษาคุ้มครองและป้องกันให้เครื่องชั่งตวงวัดนั้นๆ ยังคงทำงานถูกต้องและให้ผลการชั่งตวงวัดถูกต้องตามที่ออกแบบไว้นั่นเอง

โดยปฏิบัติงานด้านชั่งตวงวัดในเชิงกฎหมาย (Legal Metrology) เริ่มตั้งแต่เครื่องชั่งตวงวัดยุคกลไกพัฒนาเข้าสู่ยุคอิเล็กทรอนิกส์ การซีลเครื่องชั่งตวงวัดก็ถูกพัฒนาตามมาเช่นกัน จนถึงยุคปัจจุบัน การซีลเครื่องชั่งตวงวัดจึงมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

- 1) **แบบที่ 1 ซีลทางกายภาพ (Physical Seals)** ได้แก่ การติดตราร้อยลวดผูกซีลตะกั่ว เช่น ตำแหน่งตัวนับสัญญาณ, กล่องรวมสัญญาณ (junction box), ส่วนแสดงค่า, ส่วนประมวลผล, Transmitters เป็นต้น และ
- 2) **แบบที่ 2 Electronic Security หรือ Sealing Electronic** ตัวอย่างหนึ่งคือ Audit Trail นั่นเอง

เครื่องซึ่งตัววัดที่มีหลักการทำงานและมีชิ้นส่วนเป็นกลไกล้วนๆ ก็ใช้ซีลแบบที่ 1 ไป แต่ในกรณีเครื่องซึ่งตัววัดมีการทำงานอิเล็กทรอนิกส์อาจมีซีลแบบที่ 1 และ/หรือ แบบที่ 2 การซีลเครื่องซึ่งตัววัดภายหลังที่ได้รับ การสอบเทียบ และ/หรือ ตรวจสอบให้คำรับรองแล้วกระทำไปเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีการเปลี่ยนคุณสมบัติทางด้านซึ่งตัววัดไม่ว่าด้วยเจตนาหรือเกิดข้อผิดพลาดในการใช้งานซึ่งจะส่งผลให้ค่าความแม่นยำถูกต้องเปลี่ยนไป การซีลเครื่องซึ่งตัววัดยังครอบคลุมคุณสมบัติทางด้านซึ่งตัววัดไปถึง “Configuration Parameters” หรือ “Calibration Parameters” อีกด้วย ซึ่งต้องพิจารณา

- ผู้ผลิตจะต้องออกแบบไม่ให้มีเครื่องมือหรืออุปกรณ์ต่อพ่วงใดเข้าไปทำการเปลี่ยนแปลงแก้ไขภายใน electronic audit trail security อย่างเด็ดขาด และ
- ต้องตรวจสอบได้ว่า audit trail security นั้นมีความจุการเก็บข้อมูลเพียงพอตลอดช่วงระยะเวลาการใช้งานเครื่องซึ่งตัววัดนั้นๆ
- มีขั้นตอนการเข้าถึงข้อมูลภายใน audit trail security อย่างชัดเจนและเหมาะสม และมีขั้นตอนการทำงานของ audit trail security ที่เหมาะสม เช่น Configuration Parameters ได้ควรถูกบันทึกและควรประกอบด้วยข้อมูลประกอบใดบ้างเพื่อใช้ในการตรวจสอบที่ไปที่มาได้
- ผลการบันทึกต้องสามารถแยกแยะและอ่านผลบันทึกได้ในแต่ละเหตุการณ์ที่ทำการบันทึก เป็นต้น

การทำงานของ Audit Trail โดยหลักการก็คือการบันทึกข้อมูลตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องซึ่งตัววัดนั้นๆ ไม่ให้สามารถทำงานหน้าที่ของมันตามที่ได้รับการออกแบบให้ทำงานอย่างอัตโนมัติ ส่วนการทำงานในรายละเอียดก็ขออนุชนรุ่นหลังศึกษาและบอกกล่าวต่อไป

ด้วยเหตุนี้ Audit Trail จึงมีประโยชน์มากกมายกับผู้ผลิตเครื่องซึ่งตัววัด, ผู้ครอบครอง และผู้บริโภคที่ใช้เครื่องซึ่งตัววัดนั้นๆ ในการตีมูลค่าสินค้าและบริการ ในส่วนของผู้ผลิตเครื่องซึ่งตัววัดถือว่าเป็นใบประกันชีวิตของผู้ผลิตที่ต้องใช้ข้อมูลใน Audit Trail เพื่อป้องกันตนเองหากพิสูจน์ได้ว่าการทำให้เครื่องซึ่งตัววัดตนเองทำการซึ่งตัววัดผิดพลาดโดยเจตนาบิดเบือนไปจากแนวทางการใช้งานที่ถูกต้องตรงตามที่ออกแบบไว้เพื่อป้องกันจากผู้ครอบครองและผู้ใช้บริโภคซึ่งใช้เครื่องซึ่งตัววัดดังกล่าวนี้ไม่สามารถเรียกร้องหรือฟ้องร้องเรียกค่าเสียหายใดๆได้ ในส่วนซึ่งตัววัดเราก็น่าจะใช้เป็นหลักฐานในการดำเนินคดีจับกุมได้เช่นกัน

ตัวอย่าง Flow Computer ยี่ห้อ FMC Smith Meter., Inc.,

ตรวจสอบเอกสารเบื้องต้นจากการตรวจสอบต้นแบบจากหน่วยงานซึ่งตรวจวัดของ Measurement Canada, An agency of Industry Canada, <http://mc.ic.gc.ca> หมายเลขเอกสาร Approval No. AV-2361 Rev 1, MAY 8 2001,

1) สำหรับ Model ALIII-*-XP-AL**-A***** ประกอบด้วย

- ACCULOADIII (6 meters) - ALQ1, ALX1, ALQ2, ALX2, ALQ3, ALX3, ALQ4, ALX4, ALX5 & ALX6 / ACCULOAD III (6 computers) - ALQ1, ALX1, ALQ2, ALX2, ALQ3, ALX3, ALQ4, ALX4, ALX5 et ALX6
- ACCULOADIII -ALS , ALS1, ALD1, ALX1 (3 meters) & ALX2 (3 meters) / ACCULOAD III -ALS , ALS1, ALD1, ALX1 (3 computers) et ALX2 (3 computers)



รูปที่ 9-53 Flow Computer ยี่ห้อ FMC Smith Meter., Inc.,

2) Model Designation:

ALIII-w-XP-yyyy-Axxxxx-z (for example ALIII-S-XP-ALS1-A10000-A)

ALIII AccuLoad III

W Housing

S - Single Position Enclosure Size

Q - Quad Position Enclosure Size - [only deals with physical size of housing.]

XP Explosion-proof housing, CENELEC, CUL, and UL approved for Division I Hazardous Areas

UG1 Upgrade Kit converts AccuLoad I electronics to AccuLoad III electronics, available with ALS or ALX1 firmware only

UG2 Upgrade Kit converts AccuLoad II electronics to AccuLoad III electronics, available with ALX1 or ALX2 firmware only

Yyyy Firmware version where:

ALS - is single arm straight product

ALS1, ALQ1 & ALX1 - is single arm (straight product, sequential and ratio blending)

ALD1, ALQ2 & ALX2 - is dual arm (straight product, sequential and ratio blending)

ALQ3 & ALX3 - is three load arms (straight product, sequential and ratio blending)

ALQ4 & ALX4 - is four load arms (straight product, sequential and ratio blending)

ALX5 - is five load arms (straight product, sequential and ratio blending)

ALX6 – is six load arms (straight product, sequential blending)

Axxxxx - Analog module options where:

Digit 1 indicates the number of RTD (Resistance Temperature Device) modules installed

Digit 2 indicates the number of 4-20 mA inputs installed

Digit 3 indicates the number of 4-20 mA output modules installed

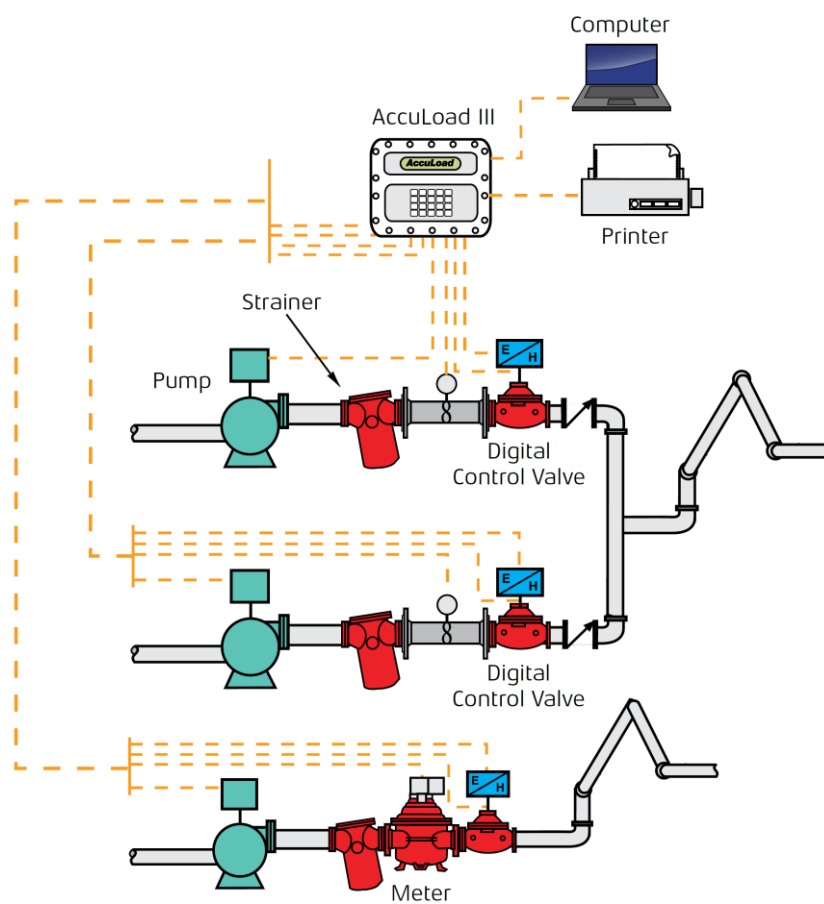
Digit 4 indicates the number of 1-5 VDC input modules installed

Digit 5 indicates the number of 1-5 VDC output modules installed

Z Hardware options, blank indicate no hardware options where:

A - AICB option for additive controls

C - CIVACON ground/overflow option



Two Arm/One Product Single/Two Products Ratio

รูปที่ 9-54 การทำงาน Flow Computer ในการควบคุมการส่งจ่าย

3) **SEALING REQUIREMENTS** การทำการซีลในส่วนของ Accuload III ด้วยการร้อยลวดผูกตะกั่ว กับสกรูยึดฝาครอบตัวเรือน Accuload III (Explosion-Proof Housing)

4) ระดับความปลอดภัย (Levels of Security) และ Security Input

การจัดระบบความปลอดภัยของโปรแกรมของ Flow Computer ยี่ห้อ FMC Smith Meter., Inc., Accuload III เป็นกรณีตัวอย่างพบว่า

4-1). การจัดระดับความปลอดภัยของโปรแกรม (Levels of Security) มีตั้งแต่ ระดับ 1 ถึงระดับ 5 ระดับ 1 เป็นระดับต่ำสุด เรียงลำดับความสำคัญขึ้นไปจนถึงระดับ 5 เป็นระดับสูงสุด ในการเลือกใช้งานอาจเลือกไว้ 3 ระดับก็ได้คือจากระดับ 1 ถึงระดับ 3

ระดับ 1 เรียกดูค่าที่ถูกตั้งไว้และมีผลอยู่ สามารถปลดการแจ้งเตือนของระบบ

ระดับ 2 สามารถแก้ไขค่าตัวแปรต่างๆได้แทบทั้งหมด

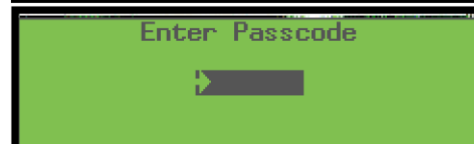
ระดับ 3 สามารถแก้ไขค่าตัวแปรต่างๆ ในงานควบคุมของซึ่งตรวจวัดในเชิงกฎหมาย, สั่งให้เครื่องทดสอบระบบ (running diagnostic), สามารถแก้ไขค่าตัวแปรต่างๆได้ทั้งหมด

4-2). รหัสการเข้าถึงระดับความปลอดภัย (security code) แต่ละระดับใช้อักษรจำนวน 4 ตัวต่อหนึ่งระดับ นั้นหมายถึงรหัสจะแตกต่างกันในแต่ละระดับความปลอดภัย และถูกกำหนดไว้โดยระดับรหัสสูงสุด

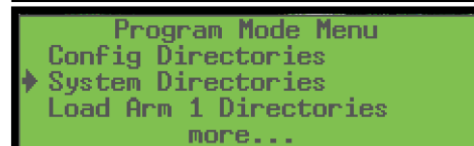
จากหน้าจอหลัก เลือก “Program Mode”



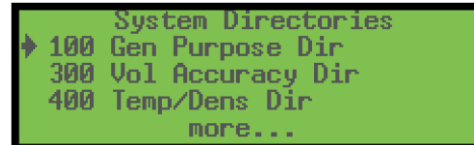
ใส่ Passcode



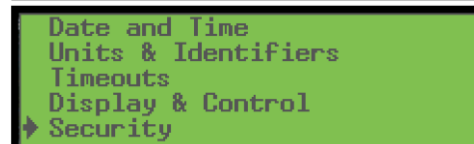
เลือก System Directories



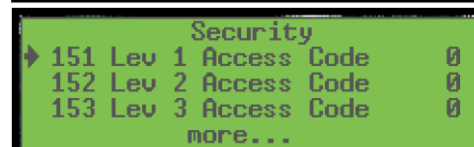
เลือก Gen Purpose Dir



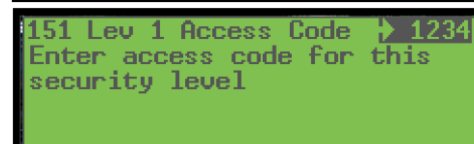
เลือก Security



เลือก Level 1 Access Code



ใส่ Passcode for Level 1



เลือกระดับชั้นความปลอดภัยให้ครบ ใน
การตั้งค่า password ที่แตกต่างกัน

Security			
151	Lev 1	Access Code	1234
▶ 152	Lev 2	Access Code	0
153	Lev 3	Access Code	0
more...			

4-3). ในส่วนตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหรือมีผลต่อความถูกต้องในการวัด (program parameters) นั้นสามารถเลือกได้ว่าให้จัดไปอยู่ระดับชั้นความปลอดภัยที่เท่าไรสามารถกำหนดได้ แต่สำหรับตัวแปรที่กำหนดไว้และมีผลต่อความถูกต้องเที่ยงตรงของมาตรวัดปริมาณของเหลวตามงานซึ่งตรวจวัดในเชิงกฎหมาย (W&M parameters) ต้องจัดไว้อยู่ในชั้นระบบความปลอดภัยสูงสุดที่ ระดับ 5 ถ้าระบบมีถึง 5 ระดับ อีกทั้งต้องถูกโปรแกรมอยู่ภายใต้ **Code 156 (Security Input Access Level)** ได้หัวข้อ System Directory ซึ่งจะป้องกันการเปลี่ยนค่าตัวแปรที่กำหนดไว้และมีผลต่อความถูกต้องเที่ยงตรงของมาตรวัดปริมาณของเหลวตามงานซึ่งตรวจวัดในเชิงกฎหมายภายใต้ “Configuration Parameters” เว้นเสียแต่ต้องทำลายซีลและปรับให้ **W&M keyswitch** เป็น “enable” ในทุกกรณี **ทั้งนี้ไม่ว่าจะกระทำเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร ณ ตำแหน่งติดตั้ง Accuload III หรือควบคุมจากระยะไกลเช่น จากห้องควบคุม Control room ผ่านระบบเชื่อมต่อ WIFI หรือ LAN หรือ ฯลฯ**

4-4). สำหรับ parameters ใดที่ไม่ได้ถูกกำหนดไว้ให้อยู่ภายใต้ **Code 156 (Security Input Access Level)** ได้หัวข้อ System Directory สามารถถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้โดยไม่ต้องทำลายซีลและปรับให้ W&M keyswitch ถูกเซตค่าให้เป็น “enable” อันนี้แหละที่เราจะเจอการเปลี่ยนแก้ไขค่า MF, K หรือ ฯลฯ ยังได้อยู่เพราะดันเอา parameters ที่สำคัญออกจากภายใต้ **Code 156 (Security Input Access Level)** แม้มี **W&M keyswitch** ใน 4-6) ก็ตาม

4-5). จัดการกำหนดให้มี Security Input ควบคุมกับลำดับความปลอดภัยของโปรแกรม (Levels of Security) ให้เลือก 2 แบบคือ AC Digital Inputs กับ DC Digital Inputs

300 DC & AC Digital Inputs	
In 1	Security 1
▶ In 2	Security 2
In 3	NA
more...	

4-6). Security Input (W&M Mode) **หรือ W&M keyswitch** เป็นการกำหนดผ่านการครบวงจรไฟฟ้าของ AC Digital Inputs กับ DC Digital Inputs (รูปที่ 9-55 ถึง รูปที่ 9-58) โดยโปรแกรมกำหนดไว้ให้เป็นฟังก์ชันผ่านภายใต้หัวข้อ Configuration Directory ดังข้อข้างบน (4-5.) ทั้งนี้การเลือกและกำหนด Security Input ต้องถูกกำหนดให้มีสถานะเป็น a parameter security level ในระดับสูงสุด โดยถือเป็น W&M parameters ตัวหนึ่งด้วย หากไม่กำหนดก็จะเกิดการ “ล๊อคไม่อยู่” นั่นคือมี Security Input (W&M Mode) หรือ W&M keyswitch แต่ไม่ว่าจะเปิดสวิตช์หรือปิดสวิตช์ก็แก้ไข parameters ต่างๆ ได้เหมือนเดิม

4-7). ถ้า Comm Link Programming ใน AccuLoad ถูกตั้งค่าระดับความปลอดภัยของโปรแกรม (Levels of Security) ไว้ที่ระดับสูงสุด จะสามารถอ่านและเขียนแก้ไขค่าตัวแปรทั้งหมดผ่านการเชื่อมต่อสื่อสารจากระยะไกลจากห้องควบคุมมายังสถานที่ติดตั้ง Accuload III ได้โดยไม่ต้องผ่าน keypad ของ AccuLoad ได้ ดังนั้นให้ตรวจสอบ code 731

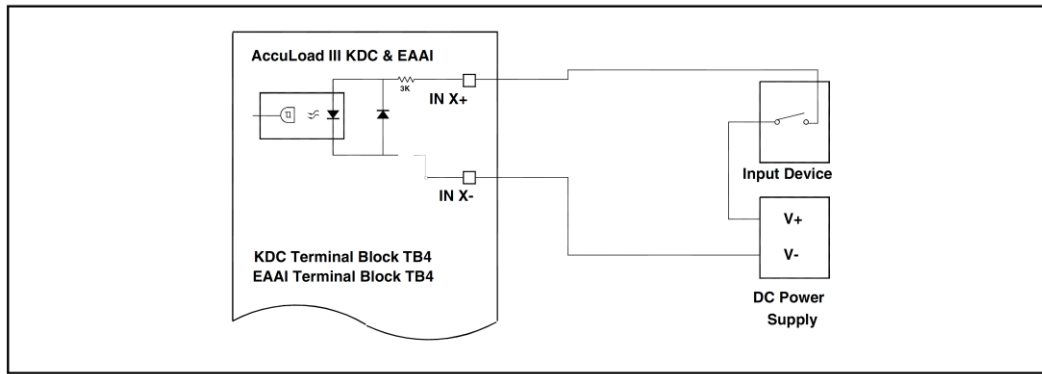
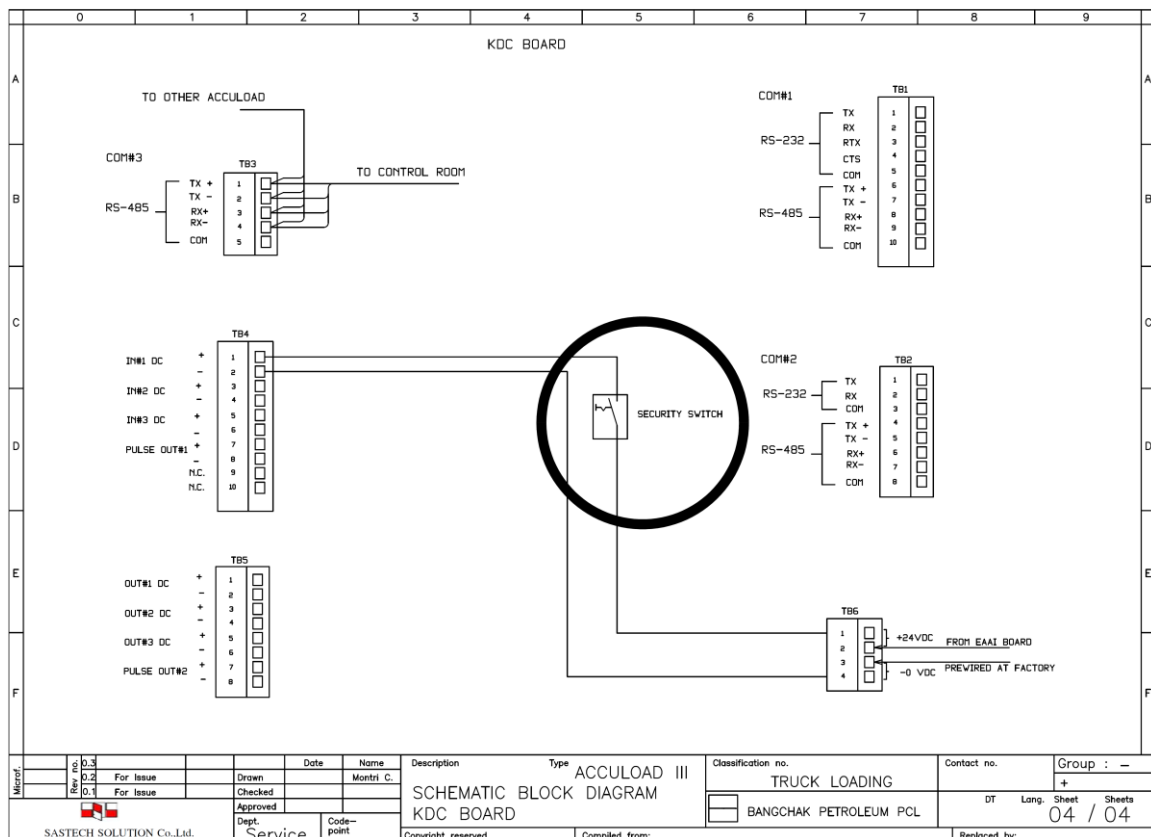


Figure 35. DC Inputs

รูปที่ 9-55 กำหนดให้ DC Digital Inputs เป็น Security Input (W&M Mode)

4-8). การป้องกันไม่ให้ตัวแปรที่มีผลต่อความถูกต้องเที่ยงตรงของมาตรวัดปริมาณของเหลวตามงานคลังตรวจวัดในเชิงกฎหมาย (W&M parameters) ถูกเข้าถึงผ่านการเชื่อมต่อสื่อสารจากระยะไกล (remote communications) ตาม 4-7) ต้องตั้งค่า code 761 for ALS firmware and code 731 for all other approved firmware ให้อยู่ในระดับชั้นความปลอดภัยต่ำกว่าระดับชั้นความปลอดภัยที่กำหนดให้กับ code 156 อย่างน้อย 1 ระดับ และการโปรแกรมให้เข้าถึง code 761/731 ได้ต้องทำลายซีลและปรับให้ *W&M keyswitch* เป็น “enable” ในทุกกรณี



รูปที่ 9-56 การ Wiring TB4 (Input DC 1&2) กับ TB6 (1&4) ของ DC Digital Inputs เป็น Security Input (W&M Mode) (SASTECH Solution Co., Ltd)

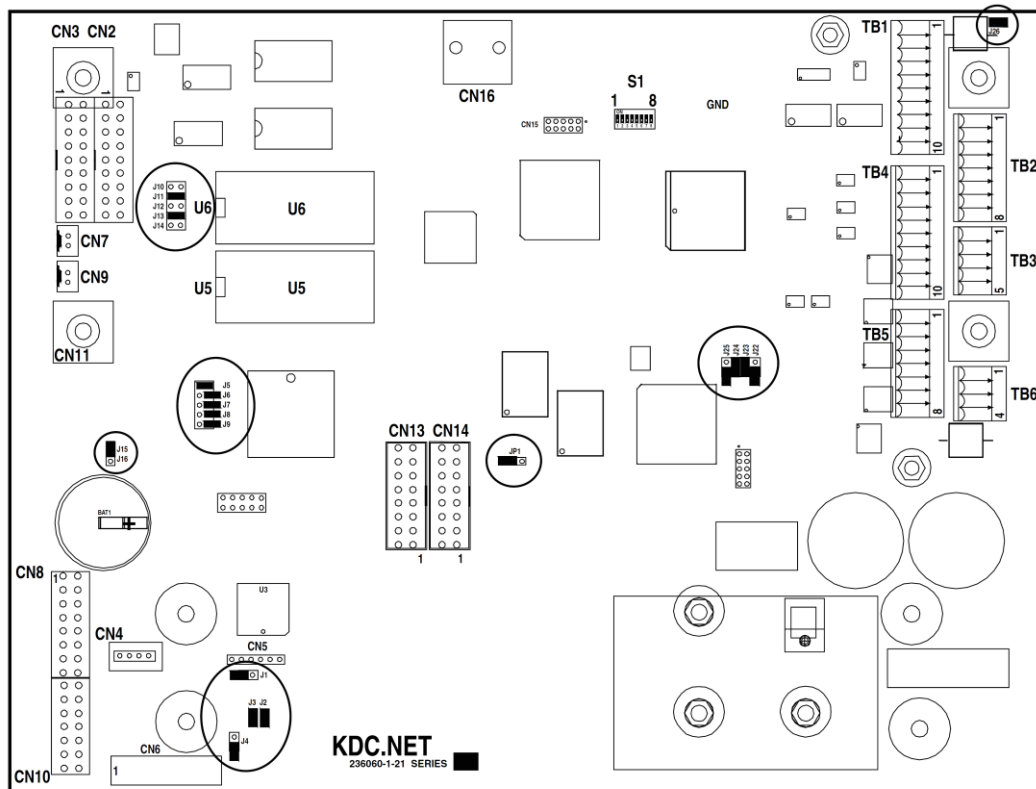
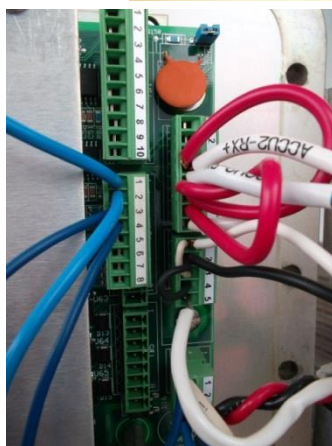
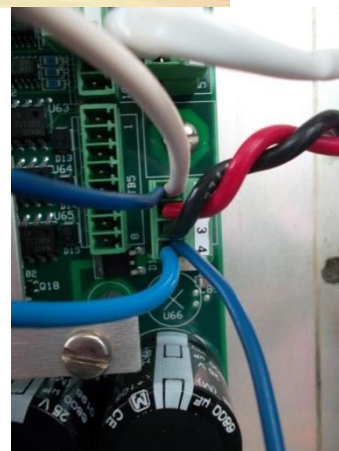


Figure 4. KDC Layout

รูปที่ 9-57 แผงวงจรของ Accuload III



TB4



TB6

รูปที่ 9-58 การ Wiring TB4 (Input DC 1&2) กับ TB6 (1&4) ของ DC Digital Inputs

4-9). เครื่อง Flowcom จากโรงงานจะไม่มีกำหนดความปลอดภัยทั้ง

1. รหัส (password) การเข้าถึงระดับความปลอดภัย (Levels of Security) แต่ละระดับ
2. ไม่มีการกำหนด Security Inputs
3. ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหรือมีผลต่อความถูกต้องในการวัด (program parameters) จัดไว้ที่ระดับความปลอดภัย ระดับ 1 ด้วยรหัส (password) “0000”

4-10). การกำหนดค่าตัวแปร Parameter Security

เลือก Parameter สำหรับป้อนค่า และกำหนดให้ parameters นั้นอยู่ในระดับความปลอดภัยที่ต้องการ

```
300 Vol Accuracy Arm 1 Mtr 1
▶ 301 K Factor 100.000
302 Error Count 0
303 Err Reset No Reset
more...
```

กดปุ่ม Stop หลังใส่ค่าตัวแปรเสร็จ

```
301 K Factor ▶ 100.000
Enter the number of pulses
required for one unit of
registration, mass or vol
based on pulse input type
```

เลือกว่าจะให้ค่าตัวแปรนี้ไปอยู่ระดับชั้นความปลอดภัยระดับใด เช่น K Factor ควรอยู่ชั้นสูงสุดหรือไม่

```
301 K Factor
Select Security Level
▶ Level 1
Level 2
```

4-11). W&M parameters รวมถึง 301, 305, 309, 313, 317, 321,325, 333, 337 or 341

5) Audit trail

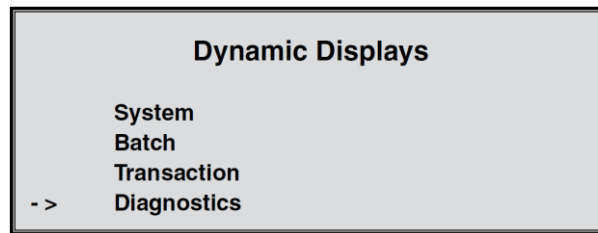
ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในเบื้องต้นถึงความสำคัญและจำเป็น ที่ต้องมีประกอบไว้ในโปรแกรมของ Flow Computer ใดๆ ที่ใช้ควบคุมการทำงานและประมวลผล แสดงผลการวัดของมาตรวัดปริมาตรของเหลว โดย Audit trail ทำหน้าที่เพื่อบันทึกตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อการทำงานของเครื่องซึ่งตัววัดนั้นหากถูกกระทำให้เปลี่ยนแปลงไปจนไม่สามารถทำงานหน้าที่ของเครื่องซึ่งตัววัดตามที่ได้รับการออกแบบให้ทำงาน เราสามารถตรวจสอบ Audit Trail ได้ 2 โหมด คือ

Ready Mode เมื่ออยู่ในโหมดนี้ ให้กดปุ่ม “CLEAR” หรือ “ENTER” ตัว firmware จะปรากฏ Main Menu ให้เลือก Diagnostic Menu

```
Main Menu

Dynamic Displays
Print Menu
Program Mode Menu
- > Diagnostics Menu
```

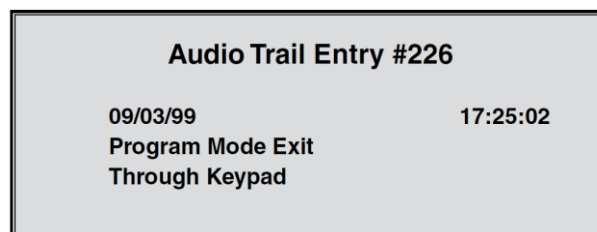
RUN Mode เมื่ออยู่ในโหมดนี้ ให้กดปุ่ม “CLEAR” หรือ “ENTER” ตัว firmware จะปรากฏ Dynamic Display ให้เลือก Diagnostic Menu



จะขึ้นรายการย่อย ดังข้างล่าง จากนั้นเลือก “AUDIT TRAIL”

• Active Alarms • Alarm History • Non-Reset Volumes • Event Log • Transaction Log • Audit Trail • Digital Inputs • Digital Outputs • Analog Inputs • Analog Input Summary	• Analog Outputs • Pulse Inputs • View Turbine Meter Data • Comm Monitor • Force Injector Auto Detect • CIVACON Overfill Monitor • Boolean Algebraic • Transaction Archive Data • Software Version • Factory Diagnostics
---	--

เราสามารถอ่านผลการบันทึกของ “Audit Trail” ได้เท่านั้น ภายหลังจากกด “ENTER” เข้าไปเครื่อง จะแสดงการบันทึกผลล่าสุดในการเข้ามาในระบบของ Accuload จะปรากฏขึ้นมา ตัวอย่างเช่น



Audit Trail Entry จะให้ข้อมูลวัน เวลา และเหตุการณ์ ของ Program Mode ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะบันทึกเฉพาะ

1. มีการเปลี่ยนใดๆ กับ parameters ซึ่งกำหนดและจัดให้อยู่ในระดับชั้นความปลอดภัย (levels of security) 2 ขั้นสูงสุดที่กำหนดไว้ เช่นกัน เช่น หากจัดระดับชั้นความปลอดภัยไว้ 3 ระดับ คือ 1, 2, และ 3 ซึ่ง ระดับชั้นความปลอดภัยสูงสุดคือชั้น 3 ดังนั้น Audit trail จะบันทึกเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลง parameters ซึ่งกำหนดและจัดให้อยู่ในระดับชั้นความปลอดภัย ชั้น 2 และชั้น 3 เท่านั้น รวมทั้ง
2. หากมีการเปลี่ยนแปลงระดับความปลอดภัยของ parameters ด้วย

หากต้องการดูรายการบันทึกเลขที่ถัดตัวต่อมาให้กดปุ่มลูกศร ขึ้น-ลง ตัวอย่างเช่นในรูป Audit Trail หมายเลข 225

Audio Trail Entry #225	
09/03/99	17:24:58
SY: 321	
1 No Security	
0 Disabled	

บรรทัดที่ 1 วัน และเวลา ที่ทำการบันทึก

บรรทัดที่ 2 program code ที่ถูกแก้ไขเปลี่ยนแปลง

SY = system parameter

บรรทัดที่ 3 1 = No Security is the old program value

บรรทัดที่ 4 0 = Disabled is the new program value

เมื่อตรวจสอบแล้วเสร็จและต้องการออกจาก Audit Trail โดยกดปุ่ม “CLEAR” เครื่องจะออกมาสู่ “Diagnostic menu”

Audio Trail Entry #224	
09/03/99	11:24:45
Program Mode Exit	
Through Keypad	

6) CONFIGURATION REQUIREMENTS โครงสร้างโปรแกรมของ Accuload ในส่วนจะมีโครงสร้าง

Main Menu

- Configuration Directories
- System Directories
- Load Arm Directories
- Meter Directories
- Product Directories
- Bay Directories
- Recipe Directories

Configuration Directories

Code	Description
000	Load Arm Configuration Directory
100	Pulse Input Directory
200	Pulse Output Directory
300	Digital Input Directory
400	Digital Input Directory
500	Digital Output Directory
600	Digital Output Directory
700	Digital Output Directory
800	Digital Output Directory
900	Analog Input and Output Directory

System Directories

Code	Description
100	General Purpose Directory
200	Flow Control Directory
300	Volume Accuracy Directory
400	Temperature/Density Directory
500	Pressure Directory
600	Alarm Configuration Directory
700	Communications Directory
800	Additive Directory

Product Directories

Code	Description
100	General Purpose Directory
200	Flow Control Directory
300	Volume Accuracy Directory
400	Temperature/Density Directory
500	Pressure Directory

Load Arm Directories

Code	Description
100	General Purpose Directory
200	Flow Control Directory
300	Volume Accuracy Directory
700	Communications Directory

Meter Directories

Code	Description
200	Flow Control Directory
300	Volume Accuracy Directory
400	Temperature/Density Directory
500	Pressure Directory

Bay Directories

Code	Description
100	General Purpose Directory
700	Communications

Recipe Directories

Recipes 01 through 50

จากเอกสารแสดงการตรวจสอบต้นแบบนั้นได้กำหนดให้มีการ configuration ตัวแปร Parameters ต่างๆ ดังนี้

Directory	Parameters	DESCRIPTION	Entry
Product/	321	Dual pulse error count	Maximum entry = 5 x "k" factor x minimum increment of registration
	323	Dual pulse flow rate cutoff	must be = to minimum rated Q
	302	Meter factors & associated flow rates	variable
	313	Meter factor % change/degree	000
	310	Master meter factor	variable
	311	Meter factor deviation	0.25 or less
	301	K Factor	variable
	312	Meter factor deviation	0= disabled
	411 for Volume	API Table & Product	21 = ASTM Table 54 22 = API Table 54A 23 = API Table 54B 24 = API Table 54C 25 = API Table 54D
	411 for Mass	API Table & Product	0= disabled
	412	Reference density	variable
	324	Pulse Security Alarm	1 = Ignore Pulses
	401	Maintenance Temperature	-999,9 = disabled

Directory	Parameters	DESCRIPTION	Entry
System	156	Security Input Access Level	0 to 5, <u>must be the highest level of security selected for the site</u> , 0 is not allowed as this is no security
	301	Volume Units	3 = liters
	401	Temperature units	2 = C Celsius
	402	Reference temperature	15.0 °C
	403	Density units	3 = kg/m ³
	501	Pressure units	0 = No pressure transducer installed
	761/731	Comm Link Programming	0 to 5, must be set one level lower than the security input access level under code 156. A "0" entry does not allow remote communications
	042	Calibration factors for analogue inputs (i.e. pressure and temperature)	variable
	045	Temperature offset	< or/ou = ± 1 °C
	002/101	Pulse transmitter type	1 Dual = dual channel

หมายเหตุ Code เหล่านี้อาจแตกต่างกันตาม Version ของ Firmware ใน Accuload III

และนี่คือเหตุผลที่เราซึ่งดวงวัดทำไมต้องเรียกเอกสารที่แสดงว่า Flow computer ที่นำมาใช้งานภายในราชอาณาจักรไทยได้รับผ่านการตรวจสอบต้นแบบมาหรือไม่ ส่วนเราจะเรียกเอกสารมาดูหรือไม่ นั่นคือปัญหา.....สาธุ

เอกสารอ้างอิง

1. **ISO 8222**, Petroleum Measurement System-Calibration Temperature, Correction for use with volumetric reference measuring system, 1st 1987, International Organization for Standardization
2. **ISO 7278-2**, Liquid Hydrocarbons-Dynamic Measurement Proving System for Volumetric Meter-Part 2 Pipe Prover, International Organization for Standardization
3. **ISO R 384**, Principal of Construction and Adjustment of Volumetric glassware, International Organization for Standardization
4. **ISO 358/1**, Laboratory Glassware – Burettes - Part1 General requirements, International Organization for Standardization
5. **ISO 835/1**, Laboratory Glassware - Graduated pipettes - General requirement, International Organization for Standardization
6. **ISO 358/1**, Laboratory glassware – One - mark volumetric flasks, International Organization for Standardization
7. **ISO 2811-1:1997**, Paints and varnishes – Determination of density – Part 1: Pyknometer method, International Organization for Standardization
8. **ISO 2811-2:1997**, Paints and varnishes – Determination of density – Part 2: Immersed body (plummet) method, International Organization for Standardization
9. **ISO 4185-1980 (E)**, Measurement of liquid flow in closed conduits -Weighing method, First edition - 1980-12-15, International Organization for Standardization
10. **ISO 4787**, Laboratory glassware - Volumetric glassware-Methods for use and testing of capacity, International Organization for Standardization
11. **ISO 8316:1987** Measurement of liquid flow in closed conduits -- Method by collection of the liquid in a volumetric tank. Technical report, NS-EN ISO, 1995.
12. **INSTRUMENT ENGINEERS' HANDBOOK Process Measurement and Analysis VOLUME I**, Fourth Edition, Bela G. Liptak EDITOR-IN-CHIEF, ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society (ISA) and CRC PRESS, 2003
13. **SOP No. 13**, Standard Operations Procedure for Calibration of Volumetric Ware, Gravimetric Method, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standard, 2006
14. **SOP No. 14**, Recommended Standard Operations Procedure for Gravimetric Calibration of Volumetric Ware Using an Electronic Balance, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standard, 2006

15. **SOP No. 18**, Standard Operations Procedure for Calibration of Graduated Neck-Type Metal Volumetric Field Standards, Volumetric Transfer Method, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standard, 2012
16. **SOP No. 19**, Standard Operations Procedure for Calibration of Graduated Neck-Type Metal Provers, (Volume Transfer Method), U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standard, 2012
17. **GLP 10**, Good Laboratory Practice for the Purity of Water, May 2012, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standard
18. **Liquid-Flowmeter Calibration Techniques** by Shafer, M. R. and Ruegg, F. W. (1958), NBS Special Publication 300, Vol. 8, Precision Measurement and Calibration, Mechanics. R. L. Bloss and Mary J. Orloski. Editors., United States Department of Commerce, National Bureau of Standards,
19. **Inter-Laboratory Comparisons of Water Flow Calibration Facilities for Wide Range Flowrate** by Noriyuki FURUICHI*1, Kar Hooi CHEONG, Yoshiya TERAOKA, Nobuyuki SUGIYAMA, Shunichiro OGAWA, Noriyuki YOSHIMURA and Seiji TANABE, Advanced Industrial Science and Technology, National Metrology Institute of Japan
20. **A Novel Approach to Improve Diverter Performance in Liquid Flow Calibration Facilities** by R. Engel, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Braunschweig, Germany and U. Klages, University of Applied Sciences at Wolfenbüttel, Germany
21. **OIML R 4; Edition 1972(E)** : Volumetric Flask (one mark) in Glass
22. **OIML R 40, First edition 1981(E)** : Standard Graduated Pipettes For Verification Officers
23. **OIML R 41, First edition 1981(E)** : Standard Burettes For Verification Officers
24. **OIML R 43; Edition 1981(E)** : Standard Graduated Flasks for Verification Officers
25. **OIML R 63; Edition 1994(E)** : Petroleum measurement tables (with reference to the ISO International Standard 91-1 : 1982 & 91-2 :1991)
26. **OIML R 111, Edition 2004(E)** : Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ and M₃ , Part 1: Metrological and technical requirements
27. **OIML R 117-1 Edition 2007(E)**, Dynamic Measuring Systems for Liquids Other Than Water; Part 1: Metrological and Technical Requirements
28. **OIML R 118, Edition 1995(E)** : Testing procedures and test report format for pattern evaluation of fuel dispensers for motor vehicles
29. **OIML R 119, Edition 1996 (E)** : Pipe provers for testing measuring systems for liquids other than water

30. **OIML R 120, Edition 2010(E)** : Standard capacity measures for testing measuring systems for liquids other than water
31. **OIML R 139-1, Edition 2014(E)** : Compressed gaseous fuel measuring systems for vehicles., Part 1: Metrological and technical requirements
32. **OIML R 139-2, Edition 2014(E)** : Compressed gaseous fuel measuring systems for vehicles., Part 2: Metrological controls and performance tests
33. **Verification Equipment for National Metrology**, OIML: Service , March 1986
34. **International Table of the Surface Tension of Water**, N.B. Vargaftik, B.N. Volkov, and L.D. Voljak, Moscow Aviation Institute, Moscow, U.S.S.R., J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 12, No.3, 1983
35. **DIN 53 217 (1991) Part 2** : Determination of density of paints, varnishes and similar coating materials by the pycnometer method
36. **DIN 53 217 (1991) Part 3** : Determination of density of paints, varnishes and similar coating materials by the displacement float method
37. **ASTM E542-01 (Reapproved 2012)**, Standard Practice for Calibration of Laboratory Volumetric Apparatus.
38. **Guidelines for the Calibration and Certification of Volumetric Standards**, Measurement Canada, An Agency of Industry Canada, 2008
39. **Flow Measurement Engineering Handbook**, Richard W. Miller, Third Edition, McGraw-Hill, 1996
40. **NIST Handbook 105-3, 2010**, Specification and Tolerances for Reference Standards and Field Standards Weights and Measures, Specification and Tolerances for Graduated Neck Type Volumetric Field Standard, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce.
41. **NIST Handbook 105-7, 1997**, Specification and Tolerances for Reference Standards and Field Standards Weights and Measures, Specification and Tolerances for Dynamic Small Volume Provers, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce.
42. **NIST Special Publication 250-72 (2003)**, NIST Calibration Services for Liquid Volume, Vern E. Bean, Pedro I. Esina, John. D. Wright, John F. Houser, Sherry D. Sheckels, and Aaron N. Johnson, Fluid Metrology Group, Processes Measurements Division, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce
43. **NBSIR 74-461, December 1974**, The Calibration of Small Volumetric Laboratory Glassware, Josephine Lembeck, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce.

44. **NIST Special Publication 250, August 2006**, NIST Calibration Services for Water Flowmeters, , Water Flow Calibration Facility, Iosif I. Shinder, Iryna V. Marfenko, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce
45. **M3003 The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement Edition 1**, UKAS (United Kingdom Accreditation Service), December 2007
46. **นานาสาระชั่งตวงวัด**, จรินทร์ สุทธนารักษ์ และ สาธิต ชูสุวรรณ, สำนักงานกลางชั่งตวงวัด, กระทรวงพาณิชย์
47. **การตรวจสอบต้นแบบเครื่องชั่งไม่อัตโนมัติ (Pattern Approval of Nonautomatic Weighting Instruments)**, วีระศักดิ์ วิสุทธาธรรม, จรินทร์ สุทธนารักษ์, โสภณ โอภาสภิตติ และ สาธิต ชูสุวรรณ, สำนักงานกลางชั่งตวงวัด, กระทรวงพาณิชย์
48. **การวัดมวล** , วีระศักดิ์ วิสุทธาธรรม และ ปัญจรี สมวงศ์ , สำนักงานกลางมาตราชั่งตวงวัด กรมทะเบียนการค้า
49. **ASTM-IP-API Table 53**, Reduction of Observed Density to Density at 15 °C
50. **PETROLEUM MEASUREMENT TABLES, Interconversion Between Volume Measures and Density Measures, VOLUME XII-Tables 21**, RELATIVE DENSITY 60/ 60°F TO API GRAVITY AT 60°F AND TO DENSITY AT. 15°F, ASTM D 1250-80
51. **ASTM-IP-API Table 54 (ASTM D1250-1952)**, Reduction of Volume to 15 °C Against Density at 15 °C
52. **API Manual of Petroleum Measurement Standard, Chapter 4 - Proving Systems, Section 3 - Small Volume Provers**, First Edition, July 1988, American Petroleum Institute.
53. **API Manual of Petroleum Measurement Standard, Chapter 4 - Proving Systems, Section 7 - Field Standard Test Measures**, Second Edition, December 1998, American Petroleum Institute.
54. **API Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 4 - Proving Systems, Section 9 - Methods of Calibration for Displacement and Volumetric Tank Provers, Part 2 - Determination of the Volume of Displacement and Tank Provers by the Waterdraw Method of Calibration**, First Edition, December 2005, American Petroleum Institute
55. **API Manual of Petroleum Measurement Standard, Chapter 5 - Metering, Section 6 - Measurement of Liquid Hydrocarbons by Coriolis Meters**, First Edition, October 2002, American Petroleum Institute.
56. **API Manual of Petroleum Measurement Standard, Chapter 7 - Temperature Determination, Section 2 - Dynamic Temperature**; 1985, American Petroleum Institute

57. **API Manual of Petroleum Measurement Standard, Chapter 11** - Physical Properties Data, **Section 2, Part 5** – A Simplified Vapor Pressure Correlation for Commercial NGLs, ASTM Technical Publication, (Stock No. PETROLTBL-TP15) GPA Technical Publication TP-15, September 2007
58. **API Manual of Petroleum Measurement Standard, Chapter 11.2.2** - Compressibility Factor for Hydrocarbons 0.350-0.637 relative density (60 °F/60 °F) and -50 °F to 140 °F Metering Temperature, 1st edition, Sept. 1981; American Petroleum Institute.
59. **API Manual of Petroleum Measurement Standard, Chapter 11.2.2M** - Compressibility Factors for Hydrocarbons: 350 - 637 Kilograms per Cubic Metre Density (15°C) and - 46°C to 60°C Metering Temperature, First Edition, October 1986
60. **API Manual of Petroleum Measurement Standard, Chapter 12:** Calculation of Petroleum Quantities, **Section 2:** Calculation of Petroleum Quantities Measured by Turbine or Displacement Meter, 1st edition, Sept. 1981; American Petroleum Institute.
61. **AGA Report No.11**, Measurement of Natural Gas by Coriolis Meter, American Gas Association,
62. **Handbook for the Quality Assurance of Metrological Measurements**, John K. Taylor and Henry V. Oppermann, NATIONAL BUREAU OF STANDARDS, 1986
63. **Applied Instrumentation in the Process Industries**, Volume I , Second edition, A Survey, W.G. Andrew , H.B. Williams, 1979
64. **Compact Prover**, Operating and maintenance instructions, Part Number: 3-9008-701, Rev. J, January 2015, Daniel Measurement and Control, Inc.,
65. **Operator Reference Manual, Bulletin MN06129**, Issue/Rev. 1.6 (10/11), Smith Meter ® AccuLoad ® III, FMC Technologies Measurement Solutions, Inc.
66. **Installation, Bulletin MN06135**, Issue/Rev. 0.6 (3/05), Smith Meter ® AccuLoad ® III with ALX Firmware, FMC Technologies Measurement Solutions, Inc.
67. **Small Volume Provers** : Identification, Terminology and Definitions, G. Diane Lee, National Institute of Standards and Technology (NIST)
68. **Petroleum Measurement Manual, Part X Meter Proving**, Section 3 Code of Practice the Design, Installation and Calibration of Pipe Provers, Terminology and Definitions, G. Diane Lee, Institute of Petroleum
69. **Inspecting Equipment with Audit Trails**, By Juana Williams, December 2003, National Institute of Standards and Technology (NIST)
70. **Good Practice Guide, The Calibration of Flow Meters**, National Measurement System, The National Engineering Laboratory (NEL), United Kingdom

71. **Flow Glossary**, Version 2 August 2011, The National Engineering Laboratory (NEL), United Kingdom
72. **Development of a New National Standard Water Flow Facility at NEL**, Report No. 2004/200, October 2004, The National Engineering Laboratory (NEL), United Kingdom
73. **Flowmeter Calibration Using a Small Volume Prover**, Report No. 014/97, October 1997, The National Engineering Laboratory (NEL), United Kingdom
74. **Operator Reference Manual, Electronic Preset Delivery System**, Bulletin MN06129, Smith Meter AccuLoad III, FMC Smith Meter., Inc.,
75. **APPROVAL No. AV-2361 Rev 1**, Measurement Canada, An agency of Industry Canada, MAY 8 2001
76. **Transactions in Measurement and control, Volume 1 – Non-Contact Temperature Measurement**, OMEGA Engineering, Inc.
77. **Transactions in Measurement and control, Volume 3 – Force-Related Measurements**, OMEGA Engineering, Inc.
78. **Transactions in Measurement and control, Volume 4 - Flow & Level Measurement**, OMEGA Engineering, Inc.
79. **Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook**, John G. Webster Editor-in-Chief, CRC Press LLC, 1999
80. **Mechanical Engineering Handbook**, Frank Kreith Editor-in-Chief, Boca Raton: CRC Press LLC, 1999
81. **WIKA Handbook, Pressure & Temperature Measurement**, U.S. Edition, 1998, WIKA Instrument Corporation
82. **ASME B40.1**, Pressure Indicating Dial Type – Elastic Element Gauges, The American Society of Mechanical Engineers, 2005
83. **ASME MFC-22**, Measurement of Liquid by Turbine Flowmeters, The American Society of Mechanical Engineers, 2007
84. **ASME PTC 19.5**, Flow Measurement, Performance Test Codes, The American Society of Mechanical Engineers, 2004
85. **A Novel Approach to Improve Diverter Performance in Liquid Flow Calibration Facilities**, R. Engel, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Braunschweig, Germany, U. Klages ,University of Applied Sciences at Wolfenbüttel, Germany
86. **Shell, DEP 31.06.11.11-Gen.**, Design and Engineering Practice Manual, Loading Facilities for Bulk Road Vehicles, July 1998