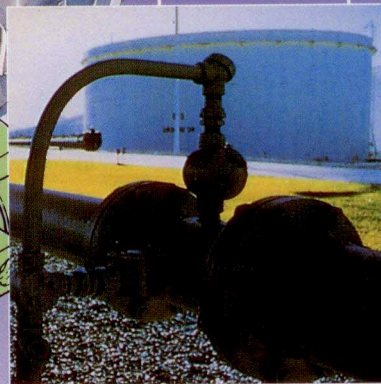
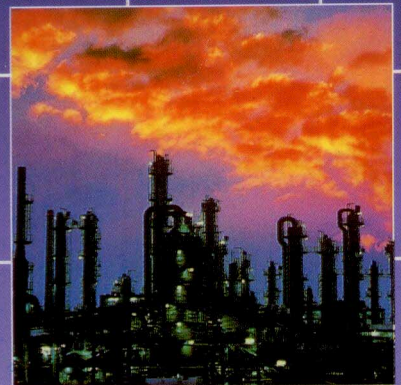
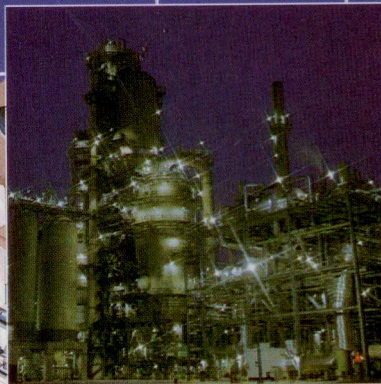
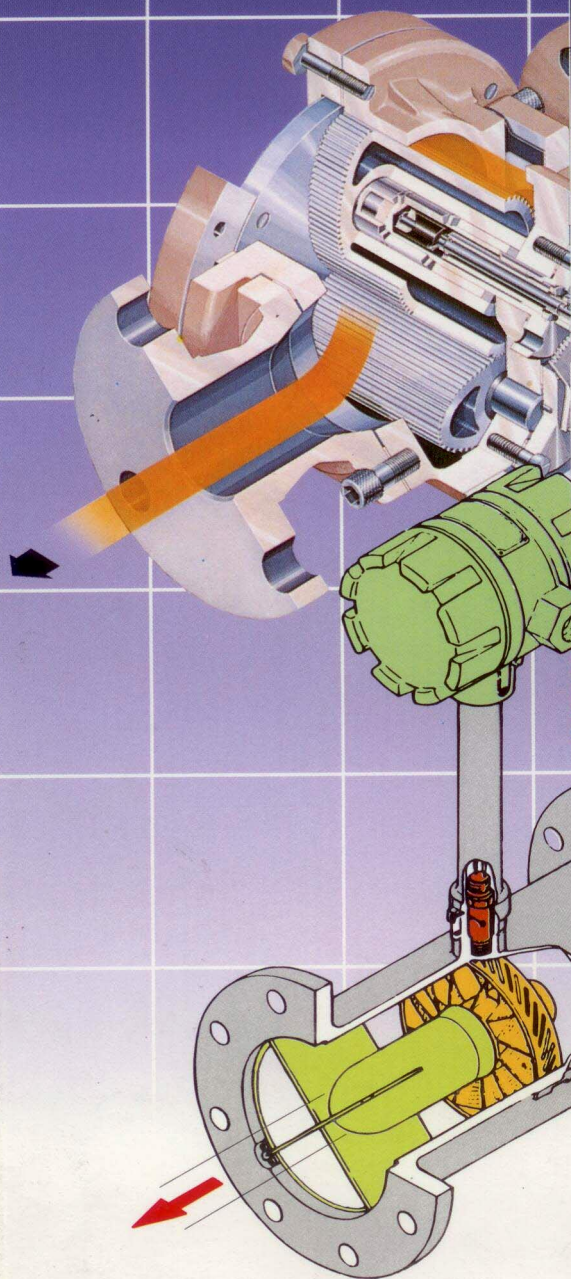


หลักการทำงานและสมรรถนะ

TURBINE & POSITIVE DISPLACEMENT METERS



สำนักงานกลางมาตรฐานชั่งตวงวัด
Central Bureau of Weights & Measures
กรมทะเบียนการค้า

หลักการทำงานและสมรรถนะของมาตรวัด

เทอร์โมมิเตอร์และมาตรวัด P.D.

เรียบเรียงโดย

นายพงษ์ศักดิ์ อำไพพรรณ

นายณรงค์ สร้อยทอง

นายสาธิต ชูสุวรรณ

สำนักงานกลางชั่งตวงวัด

CENTRAL BUREAU OF WEIGHTS & MEASURES

กระทรวงพาณิชย์

MINISTRY OF COMMERCE

คำนำ

การซื้อขายผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม หรือผลิตภัณฑ์ของเหลวอื่นๆที่มีปริมาณมากๆนั้น นิยมนำเอามาตรวัด มาใช้วัดปริมาณเพื่อการซื้อขาย โดยเฉพาะมาตรวัดชนิดเทอร์ไบน์มิเตอร์ (TURBINE METERS) และมาตรวัดชนิด P.D. มิเตอร์ (POSITIVE DISPLACEMENT METER)

ดังนั้นหากต้องการให้มาตรวัดมีการแสดงผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำ จึงควรจะเข้าใจ ถึงลักษณะการทำงาน การติดตั้ง และวิธีการใช้ที่ถูกต้อง ตลอดจนวิธีการสอบเทียบมาตรวัดแต่ละชนิด ด้วย ซึ่งในส่วนของหนังสือเล่มนี้ จะอธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานการทำงานของมาตรวัดชนิดเทอร์ไบน์มิเตอร์ และชนิด PD มิเตอร์ ว่าเป็นอย่างไร ก่อนจะทำการสอบเทียบ(CALIBRATE หรือ PROVING) ให้เหมาะสมกับชนิดของมาตรวัดนั้นๆ

หวังว่าหนังสือเล่มนี้ คงจะเป็นประโยชน์ต่อเจ้าหน้าที่ของกองชั่งตวงวัดและผู้ที่เกี่ยวข้องทั่วไป และช่วยให้การปฏิบัติงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น


(นายวีระศักดิ์ วิสุทธารธรรม)
ผู้อำนวยการกองชั่งตวงวัด

สารบัญ

คำนำ

จะเลือกมาตรวัดอย่างไร (How to Select A Flowmeter)	1
ตารางสมรรถนะของมาตรวัด	5
ชนิดมาตรวัดมาตรฐาน	9
Head meter Orifice Flow nozzle Venturi Pitot tube	
Drag body Capillary type Variable-area meter Positive-displacement meter	
Diaphragm type Reciprocating piston Revolving drum	
Rotating piston Nutating disk Lobed-impeller Axial flowmeter	
Gyroscopic type Magnatic flow meter Sonic velocity flowmeter	
Thermal meter Turbine flowmeter Radial flowmeter	
Magnus-effect flowmeter Flow-acceleration meter	
ทฤษฎีเทอร์ไบน์มิเตอร์ (Turbine Meter Theory)	35
ทฤษฎีการไหลพื้นฐานภายในท่อ (Elementary Flow Theory for the Study of Pipes)	35
สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)	47
ไดอะแกรมเวกเตอร์ความเร็วของเทอร์ไบน์มิเตอร์ (The Turbine Meter Velocity Diagram)	50
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (flowrate) กับ ความเร็วเชิงมุม (angular velocity)	54
กราฟคุณสมบัติของเทอร์ไบน์มิเตอร์ (The Turbine Meter Characteristic Curve)	55
การออกแบบและการติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์ (Turbine Meters-Design and Installation)	57
การบันทึกค่าปริมาณ (Volume Registration)	57
วิธีการสร้างพัลส์ (Pulse Generation)	60
การรักษาความปลอดภัยของสัญญาณพัลส์ (Pulse Security)	63
ค่าความละเอียดการวัด (Pulse/Volume Resolution)	65
การติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์ (Installation)	67
การติดตั้งระบบท่อ (Piping Installation)	74
การติดตั้งชุดเทอร์ไบน์มิเตอร์ (Typical Installation in Banks)	84
การสอบเทียบมาตรวัด (Meter Proving)	85

ระบบการสอบเทียบมาตรวัด (Meter Proving System)	86
สมรรถนะของเทอร์ไบน์มิเตอร์และปัจจัยผลกระทบต่อสมรรถนะ (Turbine Meter Performance and Factors Affecting Turbine Meter Performance)	89
ศัพท์ที่ใช้เกี่ยวกับสมรรถนะการทำงาน (Performance Terminology)	89
ข้อมูลสมรรถนะเทอร์ไบน์มิเตอร์ที่ควรรู้	92
ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเทอร์ไบน์มิเตอร์	97
อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลหรือความเร็วของเหลว	97
อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของความหนืด	99
อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ	104
อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น	104
อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของความดัน	104
อิทธิพลของการสึกหรอและความเสียหายของมาตรวัด	106
อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของสภาวะการไหล (flow conditions)	110
อิทธิพลการเกิด cavitation	114
มาตรวัด P.D. (Positive-Displacement Meter)	115
ประเภทของมาตรวัด (Type of Meters)	115
การออกแบบและการสร้าง	132
ตัวชดเชยอุณหภูมิอัตโนมัติ (Automatic Temperature Compensator)	140
ตัวกรอง (Filters or Strainers)	143
ตัวแยกอากาศ / ไอน้ำ (Air / Vapour Separator)	144
วาล์วควบคุมการไหล (Flow Control Valves)	147
อุปกรณ์เสริม	157
สมรรถนะมาตรวัด P.D. (P.D. Meter Performance)	161
ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของมาตรวัด P.D.	162
1. อุณหภูมิของเหลว (Liquid Temperature)	
2. ความดันภายในระบบท่อ (Line Pressure)	
3. ความเสียหายเนื่องจากการสึกหรอและบกร่องทางกล (Wear and mechanical damage)	
4. อิทธิพลของความหนืดของเหลว (Liquid viscosity effects)	
5. อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิกับความหนืดต่อมิเตอร์แฟกเตอร์ (Meter factor)	
6. สภาวะการไหลไม่อุดมคติ (Non-ideal flow conditions)	
7. การไหลเล็ดลอดผ่านช่องว่าง (Slippage though clearances)	

การเลือกและการติดตั้งมาตรวัด P.D.

169

1. ขนาดมาตรวัด (Meter size)
2. ความดัน (Pressure)
3. คุณสมบัติการเข้ากันได้ของเหลวกับวัสดุที่ใช้ทำมาตรวัด (Product compatibility)
4. อุณหภูมิ (Temperature)
5. ความหนืด (Viscosity)
6. ความโน้มถ่วง (Gravity)
7. คุณภาพการหล่อลื่นของเหลว (Product lubrication qualities)
8. สิ่งแปลกปลอมปนในของเหลว (Product contamination)
9. ทิศทางการหมุนของมาตรวัด (orientation)
10. ลักษณะการติดตั้ง (Installation)

เอกสารอ้างอิง (Bibliography)

173

จะเลือกมาตรวัดอย่างไร (How to Select A Flowmeter)

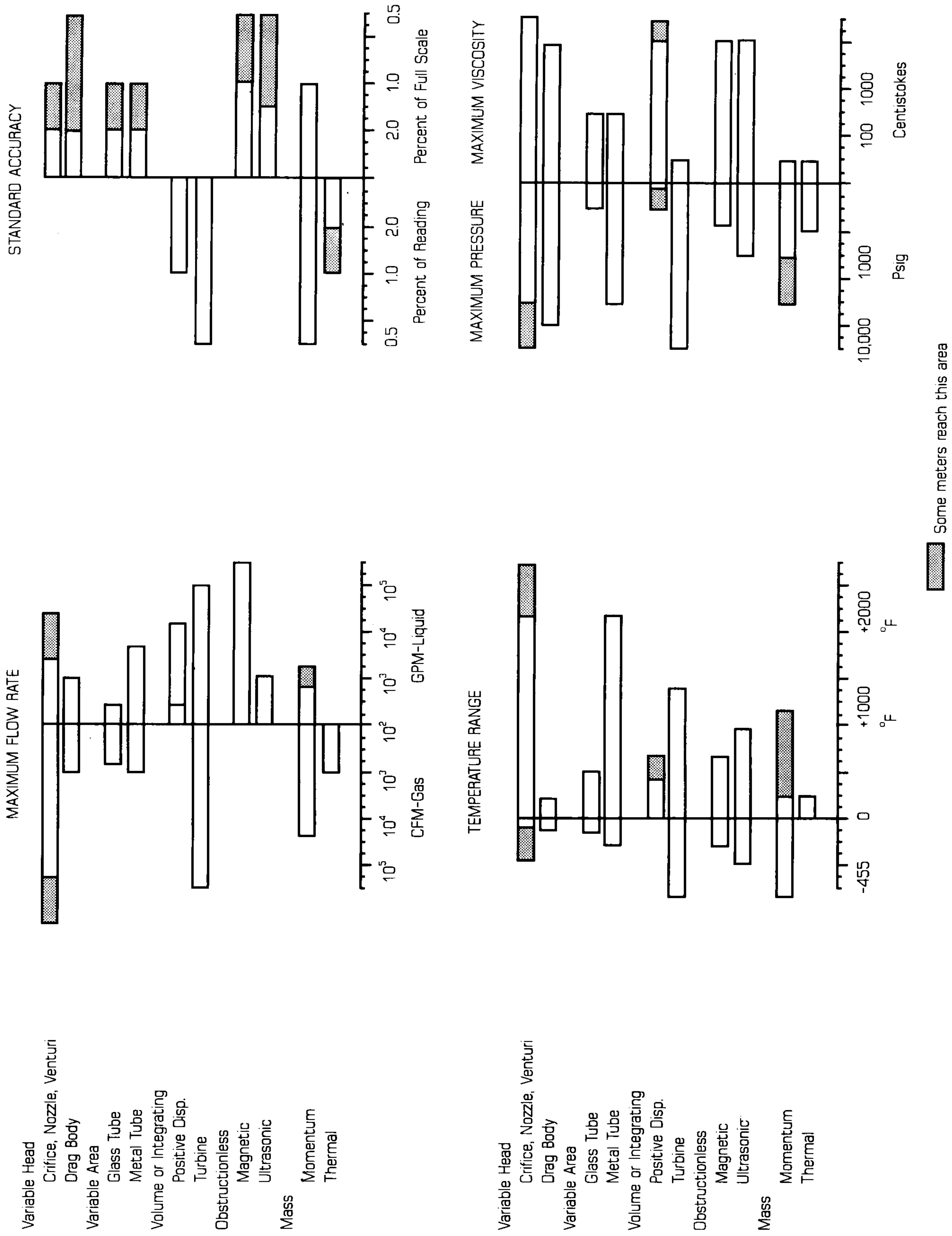
หากเรามีความจำเป็นและต้องการวัดการไหลของของไหลและจำเป็นต้องเลือกมาตรวัด (flowmeter) สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่เราต้องรู้เสียก่อนที่จะเลือกชนิดของมาตรวัดนั้นก็คือ เราจะวัดของเหลวประเภทใด ก๊าซ (gas) หรือของเหลว (liquid) ปัจจัยอื่นๆ ที่มีความสำคัญและต้องรู้อีกเช่นกันได้แก่ อัตราการไหล, ความแม่นยำ (accuracy) , ช่วงอุณหภูมิ (temperature range) , ความดันสูงสุด (maximum pressure) และ ความหนืดสูงสุด (maximum viscosity) ของการไหลนั้น

ข้อพิจารณาพิเศษอื่นๆ ก็ควรคำนึงถึงเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการวัดการไหลแบบ laminar flow ในตำแหน่งที่ของไหลไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่มาก เช่น ช่องลม (wind tunnel) มาตรวัดชนิด pitot tube จะเหมาะสมสำหรับการวัด หรือหากเราต้องการวัดน้ำมันเชื้อเพลิงและต้องการข้อมูลอัตราการไหลของมวล (mass flows) และอัตราการไหลของน้ำหนัก (weight-flow) เพื่อศึกษาและคำนวณกำลังแรงม้า mass flowmeter จะเป็นอุปกรณ์วัดที่เหมาะสมถึงแม้ว่ามาตรวัดชนิด inferential meter หรือ volume meter จะสามารถปรับใช้วัดอัตราการไหลมวลได้ด้วยอุปกรณ์เสริมเพื่อแปลงค่าปริมาตรที่อ่านได้ไปเป็นค่ามวลได้ก็ตาม

ณ. ที่นี้เราจะแสดงวิธีการเลือกมาตรวัดโดยง่าย ๆ มีอยู่ด้วย 2 ขั้นตอน **ขั้นตอนที่ 1** เมื่อต้องการเลือกมาตรวัดโดยมีหนึ่งปัจจัยหรือหลายปัจจัยเป็นปัจจัยวิกฤตให้ดูกราฟแท่ง (รูป 1) เราก็พอจะสามารถประมาณความเหมาะสมชนิดของมาตรวัดอย่างคร่าวๆ ได้ จากนั้น**ขั้นตอนที่ 2** ก็ดูในรายละเอียดลึกลงไปอีกจากตารางสมรรถนะของมาตรวัด (ตาราง 1) โดยทำการเปรียบเทียบในแต่ละชนิดของมาตรวัดที่เราได้ทำการเลือกโดยคร่าวๆ หลังจากจบ 2 ขั้นตอนแล้วเราก็จะสามารถตัดสินใจเลือกมาตรวัดได้ จากนั้นก็ติดต่อสอบถามหาข้อมูลเพิ่มเติมในท้องตลาดว่ามีชนิดและประเภทเป็นไปตามที่เรากำหนดเลือกหรือไม่ หากเรามีปัญหาในการเลือกมาตรวัด โดยใช้กราฟแท่ง (bar graph) หรือข้อจำกัดเพียงปัจจัยเดียวในการเลือกเช่นช่วงอุณหภูมิ (temperature range) การใช้งาน การเลือกมาตรวัดก็จะไม่มีปัญหามากนัก ยกตัวอย่างเช่น หากเราต้องการวัดอัตราการไหลของของเหลวที่อัตราไหลสูง เราพบว่ามาตรวัดชนิด magnetic จะมีคุณสมบัติเด่นเป็นพิเศษ ตามด้วยมาตรวัดแบบเทอร์ไบน์มิเตอร์ (turbine meter) และชนิด variable head จากนั้นเราก็ไปดูตารางสมรรถนะของมาตรวัด เพื่อทำการเปรียบเทียบปัจจัยที่สำคัญอื่นๆอีกต่อไป เช่น ราคาของมาตรวัด หรือ เงื่อนไขคุณสมบัติของของเหลวที่จะทำการวัดโดยมาตรวัด

แต่ถ้าเรามีข้อจำกัดหรือปัจจัยในการเลือกมาตรวัดมากกว่าปัจจัยหรือข้อจำกัดเดียว การเลือกมาตรวัดก็จะค่อนข้างซับซ้อนและจำเป็นต้องผ่อนปรนประนีประนอมข้อจำกัดดังกล่าวให้มีความเหมาะสม เพื่อให้ได้มาตรวัดที่สามารถทำงานได้ในระดับหนึ่ง ตัวอย่างเช่น เราต้องการวัดก๊าซ(gas)

รูป 1 กราฟแท่งแสดงปัจจัยการเลือกมาตรวัด



ที่มีอัตราการไหลสูงจะเห็นได้ว่า orifice meter จะค่อนข้างเหมาะสม แต่ถ้าเราต้องการความแม่นยำของมาตรวัดชนิด drag body ด้วย เมื่อเรานำความต้องการดังกล่าวมารวมกันและพิจารณาแล้ว เราจะได้ว่าเทอร์ไบน์มิเตอร์ (turbine meter) ค่อนข้างจะเหมาะสมตามเงื่อนไขมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามราคาของเทอร์ไบน์มิเตอร์ก็แพงกว่าและจำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น

ตารางสมรรถนะของ Flowmeter

จะเห็นได้ว่ามาตรวัด (flowmeter) ในตารางสมรรถนะได้แบ่งออก 5 ชนิดใหญ่ๆ และแต่ละชนิดใหญ่ๆก็แบ่งย่อยลงไปอีก ดังนี้

1. มาตรวัดใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความดัน (Variable Head)

- Orifice
- Flow-Nozzle
- Venturi
- Drag Body

2. มาตรวัดใช้หลักการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด (Variable Area)

- Glass Tube Rotameter
- Metal Tube Rotameter

3. มาตรวัดใช้หลักการวัดปริมาตรเป็นจำนวนที่แน่นอนแต่ละครั้ง (Volume or Integrating)

- Reciprocating Piston
- Rotary Piston
- Nutating Disk
- Diaphragm
- Turbine or Propeller

4. มาตรวัดใช้หลักการคลื่นหรือสนามแม่เหล็กขวางทางเดินการไหลของไหล

(Obstructionless)

- Magnetic
- Sonic or Ultrasonic

METER TYPE		FLUID FACTORS						APPLICATION FACTORS					INSTALLATION FACTORS			
		Fluid	Range of Max. Flow: Liquid,gpm;gas,cfm	Useful Range- ability	Max. Pressure *psig.	Temp. range, °F	Max. Viscosity, Centistokes	Scale	Indication	Standard Accuracy	Construction Material	Pressure loss ,psi	Line Size, in.	Special piping Considerations	Typical Power Requirement	Relative Cost,
VARIABLE HEAD	Orifice	Liquid Gas	0.2-3500 50-100,000	5:1	6,000	-455 to 2,000	4,000	Sq rt. Rate	Remote diff.press.	1-2% full scal diff.press.	Most metals	0.1-30	1 1/2-12 &large	Straight pipe: 10 diameters upstream 3 downstream	None	1.0
	Flow Nozzle	Liquid Gas	0.5-15,00 100-500,000	5:1	1,500	-60 to 1,500	4,000	Sq rt. Rate	Remote diff.press.	1-2% full scal diff.press.	Bronze, Iron,Steel stainless stl.	0.1-20	1-24 &large	Straight pipe: 10 diameters upstream 3 downstream	None	1.4
	Venturi	Liquid Gas	0.5-15,00 100-500,000	5:1	1,500	-60 to 1,500	4,000	Sq rt. Rate	Remote diff.press.	1-2% full scal diff.press.	Bronze, Iron,Steel stainless stl.,plastic	0.1-15	1-24 &large	Straight pipe: 10 diameters upstream 3 downstream	None	1.5
	Drag Body (Var. Proce)	Liquid Gas	0.5-2,000 5-1,000	5:1	5,000	-60 to 180	1,000	Sq rt. Rate	Remote electric	1/2-2% full scal	Steel, stn.stl.	2-50	1/2-12	Vertical or horizontal	115v 60cps 20w	1.0-4.0
VARIABLE AREA	Glass tube Rotameter	Liquid Gas	5cc/min-250 400cc/min-700	10:1	250	-50 to 400	100	Linear Rate	Local or remote electric or ,pneumatic	1-2% full scal	Most metals, plastic& ceramic	0.2" H ₂ O to 10psi	1/4-4	Vertical only	None	1.0
	Metal tube Rotameter	Liquid Gas	0.5-4,000 0.6-1,000	10:1	5,000	-300 to 1,600	100	Linear Rate	Local or remote electric or ,pneumatic	1-2% full scal	Most metals, plastic& ceramic	1.0" H ₂ O to 10psi	1/2-12	Vertical only	None	1.2
VOLUME OR INTEGRATING	Reciprocating piston	Clean liquids	0.002-200,000	10:1 to 20:1	250	0 to 250	1,000	Linear Total	Local or remote ,electric	1% full scal	Bronze, Iron,Steel stainless stl.	1-20	3/4-3	Horizontal recommended	None	1.0-2.0
	Rotary Piston	Clean liquids	5-8750	10:1 to 20:1	3,000	0 to 300	2,000	Linear Total	Local or remote ,electric	1% full scal	Bronze, Iron,Steel stainless stl.	1-20	5/8-16	Horizontal recommended	None	1.0-2.0
	Nutating Disk	Clean liquids	0.25-1,000	10:1	150	0 to 300	2,000	Linear Total	Local or remote ,electric	1% full scal	Bronze, Iron,Steel ,stainless stl.	1-20	1/2-6	Horizontal recommended	None	1.0
	Diaphragm	Gas	0.25-500	20:1	100	-30 to 180	all gas	Linear Total	Local	1% full scal	Steel, aluminum, syn. rubber	1.0" H ₂ O to 1.5psi	1/4-4	Horizontal recommended	None	1.0
	Turbine or Propeller	Clean liquids	0.004-50,000 0.5-300,000	15:1 10:1	15,000	-455 to 1,000	30	Linear Total	Remote electric	1/2% reading	Aluminum, Stainless stl.	2-10	1/8-3/6	Any position	115v 60cps 50w	5.0
OBSTRUC- TIONLESS	Magnetic	Conductive liquids only	0.002-50,000	20:1	600	-200 to 360	1,000	Linear Rate	Remote electric	1/2-1% full scal	Plastic, stn.stl. with non-conduc.,tive linear	same as line	1/10-78	Any position	115v 60cps 200w	6.0
	Sonic or Ultrasonic	Liquid	0.1-800	20:1	1,500	-300 to 600	1,000	Linear Rate	Remote electric	1-1 1/2% full scal	Bronze,stell, stn.stl.	same as line	1/4-2	Any position	115v 60cps 100w	10.0
MASS	Momentum Gyroscopic	Liquid Gas	100-4,000ppm 20-600ppm	10:1	1,500	0 to 165	20	Linear Total Rate	Local or Remote electric	1% full scal	Bronze, stell, stn.stl.	1-10	1-3	Horizontal recommended	115v 60cps 50w	4.0-5.0
	Momentum Axial	Liquid Gas	40-100,000ppm 10-15,000ppm	10:1	5000	-430 to 850	20	Linear Total Rate	Remote electric	1/2% reading	Aluminum, stn.stl.	5-20	1-12	Horizontal recommended	115v 60cps 50w	6.0-8.0
	Thermal	Gas	1.0gm/min to 80ppm	20:1	600	0 to 100	all gas	Linear Total Rate	Remote electric	1-2% reading	Bronze, steel, stn.stl.	low	1/8-6	Any position	115v 60cps 10w	1.0-4.0

5. มาตรการวัดมวล (Mass)

- Momentum Gyroscopic
- Momentum Axial
- Thermal

แต่ก็มีมาตรการที่จะกล่าวถึงแต่ไม่ได้ถูกจัดแบ่งไว้ดังในตารางสมรรถนะ (ตาราง 1) ทั้งนี้เนื่องจากมาตรการดังกล่าวนี้จะไม่พบในท้องตลาดหรือไม่ก็นอกเหนือจากวัตถุประสงค์ของเนื้อหาในที่นี้

ในตารางสมรรถนะของมาตรการวัด (ตาราง 1) เราจะเห็นได้ว่าได้ทำการเปรียบเทียบมาตรการวัดทั้งหมดด้วยการพิจารณาปัจจัยหลักๆ 3 ปัจจัย

1. Fluid factors ได้ทำการเปรียบเทียบของเหลวที่จะทำการวัดออกเป็น 6 คอลัมน์ ได้แก่ คุณภาพ (quality) , ปริมาณ (quantity) , ความดัน (pressure) , อุณหภูมิ (temperature) , และความหนืด (viscosity) ซึ่งจะพอสังเกตได้ว่ามาตรการบางประเภทสามารถใช้ได้เฉพาะกับของเหลวที่สะอาดและมีมาตรการชนิดเดียวที่ต้องการของเหลวที่มีการนำ (conductive liquid) ได้แก่ magnetic meter แต่อย่างไรก็ตามมาตรการส่วนใหญ่สามารถทำการวัดอัตราการไหลได้ทั้งก๊าซ (gas) และ ของเหลว (liquid) ในขณะที่มาตรการบางชนิดจะทำงานได้ดีเฉพาะกับก๊าซ ได้แก่ diaphragm และ thermal meter และ มาตรการบางชนิดจะทำงานได้ดีเฉพาะกับของเหลว ได้แก่ มาตรการใช้หลักการวัดปริมาตรเป็นจำนวนที่แน่นอนแต่ละครั้ง (volume type) ยกเว้น diaphragm type และ obstructionless type สำหรับค่าช่วงอัตราการไหลสูงสุด (range of maximum flow) นั้นเป็นค่าช่วงกว้างๆโดยรวมของมาตรการแต่ละชนิดนั้นๆ ไม่ได้เป็นค่าของมาตรการตัวใดตัวหนึ่ง ในส่วนคอลัมน์ช่วงอ่านค่าหรือบันทึกค่า (rangeability) แสดงถึงค่าเป็นช่วงของแต่ละตัวและแต่ละชนิดของมาตรการว่ากว้างเพียงใด ส่วนคอลัมน์ความดันและความหนืดซึ่งจะให้ค่าสูงสุดแทนที่จะเป็นช่วงค่า ทั้งนี้ก็เพราะค่าต่ำสุดนั้นไม่มีความสำคัญ ขอเพียงแต่มีค่าพอที่จะทำให้มีการไหลและเราสามารถทำการวัดค่าได้ แต่ในคอลัมน์อุณหภูมิจะให้ค่าเป็นช่วงค่า (range) แทนที่จะบอกเป็นค่าสูงสุด เนื่องจากความสำคัญจะเกิดขึ้นเพิ่มยิ่งขึ้นหากทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำๆ

2. Application factors ครอบคลุมถึงคุณลักษณะสมบัติของตัวมาตรการวัดเช่น จิตขั้น หมายความว่า (scale) , ตัวแสดงค่า (indication) , ความแม่นยำ (accuracy) , วัสดุที่ใช้ทำ (material) และ ความดันสูญเสีย (pressure loss) มาตรการบางชนิดจะให้ค่าอัตราการไหลเป็นค่าเฉพาะ ณ. ขณะใดขณะหนึ่งแต่มาตรการบางชนิดจะให้ค่าอัตราการไหลรวม นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ที่จะทำการรวมอัตราการไหลให้แสดงค่าเป็นค่ารวมก็ได้ ซึ่งนั่นอาจจะต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นไปอีก ดังนั้นหากเรากำหนดหรือตัดสินใจให้ชัดเจนว่าให้มาตรการแสดงค่าแบบใดหรือทำงานอย่างไรเสียก่อนก็จะเป็นการดี จากนั้นค่อยเลือกมาตรการวัดตามความต้องการโดยไม่จำเป็นต้องมาเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมภายหลัง

มาตรวัดส่วนใหญ่จะจัดให้มีส่วนแสดงค่าในตำแหน่งห่างไกลจากตัวมาตรวัด(remote indication) ได้ แต่ก็มีมาตรวัดบางชนิดเป็นแบบอ่านโดยตรง (direct-reading)จากหน้าปัด หรือ อ่านค่า ณ. จุดที่ติดตั้งมาตรวัด (local)

ความแม่นยำ (accuracy) จำเป็นที่เราต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษเพราะมาตรวัดบางชนิดจะมีค่าแม่นยำภายในช่วงเฉพาะเปอร์เซ็นต์ที่แน่นอนของช่วงพิสัยสูงสุด (full scale) และบางชนิดจะให้ค่าแม่นยำภายในเปอร์เซ็นต์ของการอ่าน (percentage of reading) นอกจากนี้วัสดุโครงสร้างและส่วนประกอบต่างๆของมาตรวัดก็มีความสำคัญเช่นกันหากต้องเลือกมาตรวัด เพื่อใช้งานกับเงื่อนไขการทำงานเฉพาะ เช่น อุณหภูมิใช้งานสูง , ของไหลที่จะทำการวัดเป็นสารกัดกร่อนสูง หรือมีความต้องการมาตรวัดที่มีน้ำหนักเบา เป็นต้น ในส่วนของความดันสูญเสีย (pressure loss) นั้นเป็นเรื่องยากที่จะกำหนดค่าที่แน่นอนลงไปในแต่ละชนิดของมาตรวัด เพราะช่วงการไหล (flow range) และ ความดันใช้งาน (operating pressure) ของแต่ละมาตรวัดมีอิทธิพลอย่างมากต่อความดันสูญเสีย (pressure loss) ยกเว้นมาตรวัดชนิด obstructionless ซึ่งสามารถใช้วัดของไหลที่มีอัตราการไหลสูง โดยไม่มีความดันสูญเสียแต่อย่างใด

3. ปัจจัยการติดตั้ง (installation factors) กล่าวถึงขนาดของท่อ, สิ่งที่ต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษ , และแหล่งพลังงานที่ใช้กับมาตรวัดรวมถึงค่าใช้จ่าย , สำหรับในที่นี้ขนาดท่อเล็กสุดเป็นปัจจัยที่สำคัญ

มาตรวัดชนิดมาตรวัดใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความดัน (variable-head) จำเป็นต้องมีข้อกำหนดเรื่องระบบท่อเป็นพิเศษเนื่องจากมาตรวัด ดังกล่าวมีหลักการทำงานอยู่ที่การวัดความดันแตกต่างในตำแหน่งก่อนและหลังตัว restriction (เช่น orifice plate, venturi) ด้วยระยะทางที่แน่นอน นอกจากนี้มาตรวัดบางชนิดก็จำเป็นต้องติดตั้งในตำแหน่งเฉพาะเช่น rotameter จะต้องติดตั้งให้อยู่ในตำแหน่งแนวตั้ง (vertical) จึงจะสามารถทำงานได้มาตรวัดบางชนิดมีการทำงานที่ซับซ้อนและค่อนข้างมีราคาแพง จำเป็นต้องการแหล่งพลังงานจากภายนอกเพื่อให้สามารถทำงานได้เช่น Mass flowmeter ต้องการมอเตอร์ชนิดพิเศษเพื่อขับเคลื่อนมาตรวัด (flowmeter) ให้หมุนด้วยความเร็วคงที่

ในส่วนสุดท้ายจะเป็นราคาซึ่งอาจจะเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาจำเป็นต้องทำการตรวจสอบกับบริษัทผู้ผลิตอีกครั้งให้ชัดเจน เพราะราคาของมาตรวัดขึ้นกับช่วงการไหล (flow range) , ความแม่นยำ (accuracy) , เครื่องมืออุปกรณ์เสริมพิเศษอื่นๆ นอกจากนี้ยังขึ้นกับความต้องการอื่นๆเป็นพิเศษมากน้อยเพียงใด

ชนิดมาตรวัดมาตรฐาน (STANDARD FLOWMETER TYPES)

มาตรวัดใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความดัน (Variable-head meters)

Variable-head meters จะวัดความดันแตกต่างระหว่างตัว restriction (เช่น orifice plate, venturi) ที่ติดตั้งอยู่ในท่อ ในกรณีของไหลเป็นของเหลว เราสามารถหาปริมาตรการไหลโดยคำนวณจากสมการ

$$Q = CA\sqrt{2gh}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล , in^3/s
 C = สัมประสิทธิ์ด้านออก (discharge coefficient)
 A = พื้นที่ออริฟิต (Orifice area) , in^2
 g = ความเร่งโน้มถ่วง (acceleration of gravity) , in/s^2
 h = ความดันแตกต่างระหว่างตัว restriction , water inch (inches of column height)

ในกรณีของไหลเป็นก๊าซ ในการคำนวณปริมาตรจะมีสมการค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อนมากกว่านี้ แต่บ่อยครั้งที่ใช้สมการดังกล่าวจากนั้นทำการปรับแต่งแก้ไขค่าด้วยตัวแก้ไขค่า (correction factor) ที่เหมาะสม

มาตรวัดใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความดัน (head meter) ประกอบด้วยส่วนทำงานเบื้องต้น (primary element) คือ ตัว restriction เป็นลักษณะช่องทางออก (aperture) และส่วนทำงานรอง (secondary element) เช่น manometer , bell gage หรือ bellows หรือ diaphragm ในส่วนทำงานเบื้องต้น (primary element) สามารถเป็นได้ทั้ง orifice plate , nozzle , venturi , drag body , capillary tube หรือ pitot tube เนื่องจากมาตรวัดชนิด head meter ได้รับความนิยมและสามารถใช้งานได้อย่างคล่องตัวเป็นอย่างมากในอดีตจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นจึงมีเอกสารการค้นคว้าวิจัยตีพิมพ์กันอย่างแพร่หลายในเรื่องของ discharge coefficient สำหรับขนาดและการประกอบส่วนกันระหว่างส่วนทำงานเบื้องต้น (primary element) กับส่วนทำงานรอง (secondary element) ที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้มาตรวัดใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความดัน (head meter) จึงมีขนาดท่อ , ช่วงการวัดปริมาณการไหล (range of flow quantity) กว้าง และวัสดุที่ใช้ทำมาตรวัดมีให้เลือกได้หลากหลาย

เมื่อมาตรวัดใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความดัน (head meter) ถูกนำมาประกอบให้ทำงานร่วมกับเครื่องมืออุปกรณ์อื่น เช่น เครื่องวัดความหนาแน่น (densitometer) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวชดเชยค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหล ส่งผลให้มาตรวัดใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความดัน (head meter) สามารถวัดการไหลของมวล (mass flow) จะได้สมการว่า

$$W = CA\sqrt{2\rho\Delta p}$$

เมื่อ	W	= อัตราการไหล , lb.
	C	= สัมประสิทธิ์ด้านออก (discharge coefficient)
	A	= พื้นที่หน้าตัด , in ²
	ρ	= ความหนาแน่น , lb/in ³
	Δp	= ความดันแตกต่างระหว่างตัว restriction , ft.

ข้อดีของ head meter

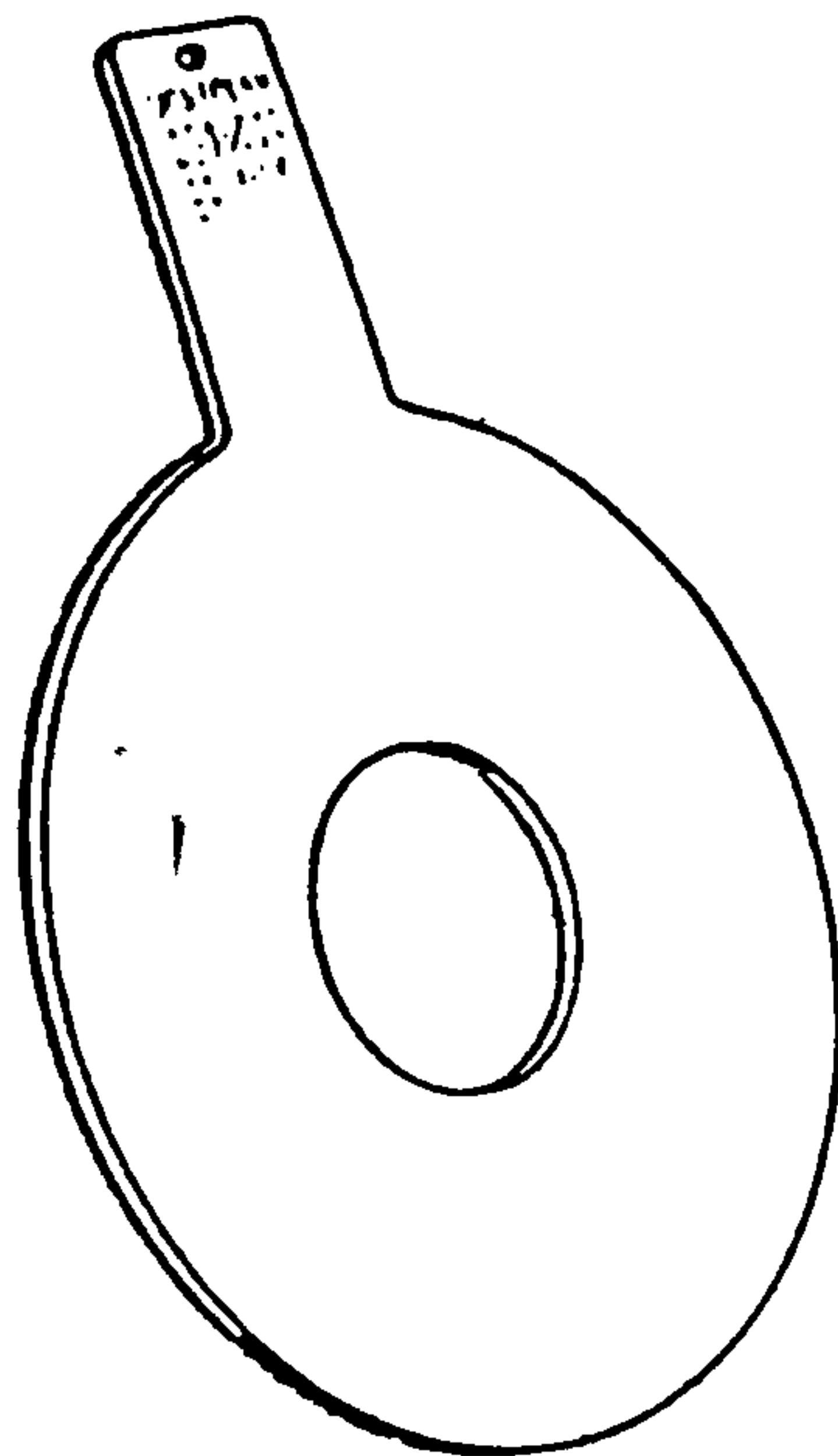
มีความถูกต้องแม่นยำในการวัด , ราคาประหยัด และ มีอยู่ให้เลือกได้มากในท้องตลาดและมีความคล่องตัวและใช้งานได้หลายรูปแบบ นอกจากนี้ยังสามารถซื้อหาแบบแยกส่วนได้หรือจะซื้อพร้อมกันทั้ง 2 ส่วนคือ ส่วนทำงานเบื้องต้น (primary element) กับส่วนทำงานรอง (secondary element) ก็ได้ อีกทั้งสามารถปรับแต่งแก้ไขให้มีการแสดงค่าและบันทึกค่าในห้องควบคุมหรือในจุดที่ห่างไกลจากตัวมาตรวัด

ข้อเสียของ head meter

หากมีการไหลผ่านมาตรวัดเป็นแบบไหลเป็นจังหวะ (pulsing flow) หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น , อุณหภูมิ , ความดัน และ ความหนืดของของไหลที่ทำการวัดจะมีผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัด เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างความดันแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างตัว restriction กับการไหล (flow) ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงไม่สามารถทำการวัดการไหลที่มีค่าน้อยกว่า 20 % ของความสามารถวัดอัตราการไหลสูงสุด (maximum capacity) ของมาตรวัดได้อย่างแม่นยำมากนัก มาตรวัดชนิดนี้มีช่วงวัดค่าได้ (rangeability) ประมาณ 3 : 1

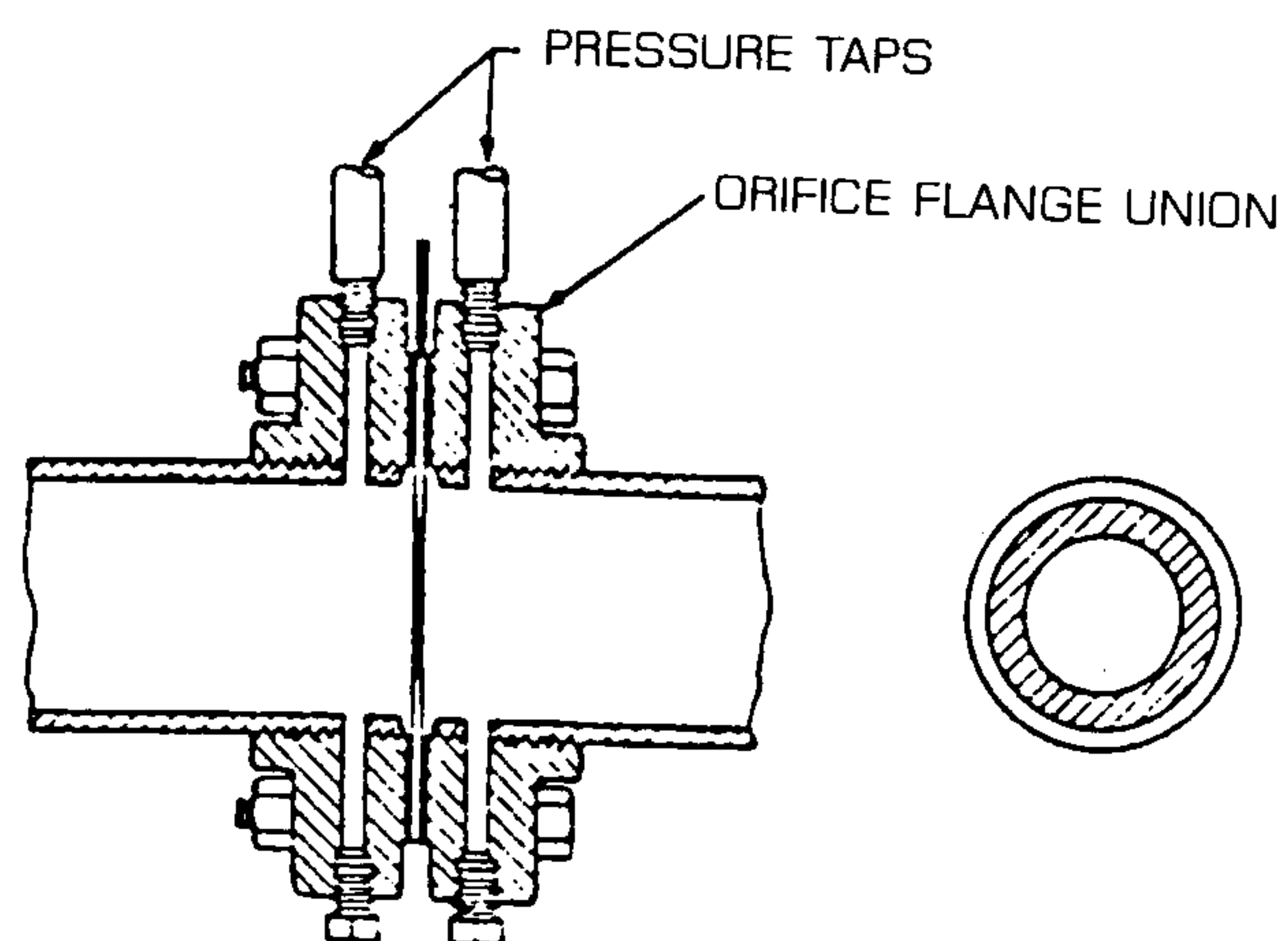
เมื่อขณะทำการวัดความดันตกบริเวณด้านทางออก (downstream) ของมาตรวัด อันเป็นผลมาจากความเสียดทานของตัว restriction ไม่สามารถเพิ่มความดันกลับขึ้นมาอีก

Orifice type เป็นมาตรวัดประกอบด้วยแผ่นบางๆเจาะเป็นช่องขอบแหลม (sharp-edged orifice) โดยปกติแล้วจะถูกติดตั้งอยู่ระหว่างหน้าแปลนในระบบท่อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ orifice จะมีค่าเป็นสัดส่วนที่แน่นอนระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่ออยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.8 แต่หากมาตรวัดมีขนาดใหญ่หรือเล็กกว่าขนาดปกติแล้วจะมีสัดส่วน 0.1 หรือ 0.9 และจำเป็นต้องได้รับการสอบเทียบ (calibration) เป็นรายตัวไป เราสามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ orifice ที่แน่นอนได้จากเงื่อนไขของขนาดท่อที่จะทำการติดตั้ง , ปริมาณและเงื่อนไขการไหล และความดันแตกต่าง (differential pressure) ในส่วนของสัมประสิทธิ์การไหล (flow coefficient) ควรเป็นค่าที่สามารถให้ผลถูกต้องได้ในทุกสภาวะการใช้งาน ซึ่งจะได้จากคู่มือการคำนวณการไหล หรือจากผู้จำหน่ายมาตรวัดนั้นๆ



รูป 2 แผ่น orifice

Concentric orifice plate. (Reproduced by permission from L. K. Spink. *Principles and Practice of Flow Meter Engineering*, 8th ed., The Foxboro Company, Foxboro, Mass., 1958.)

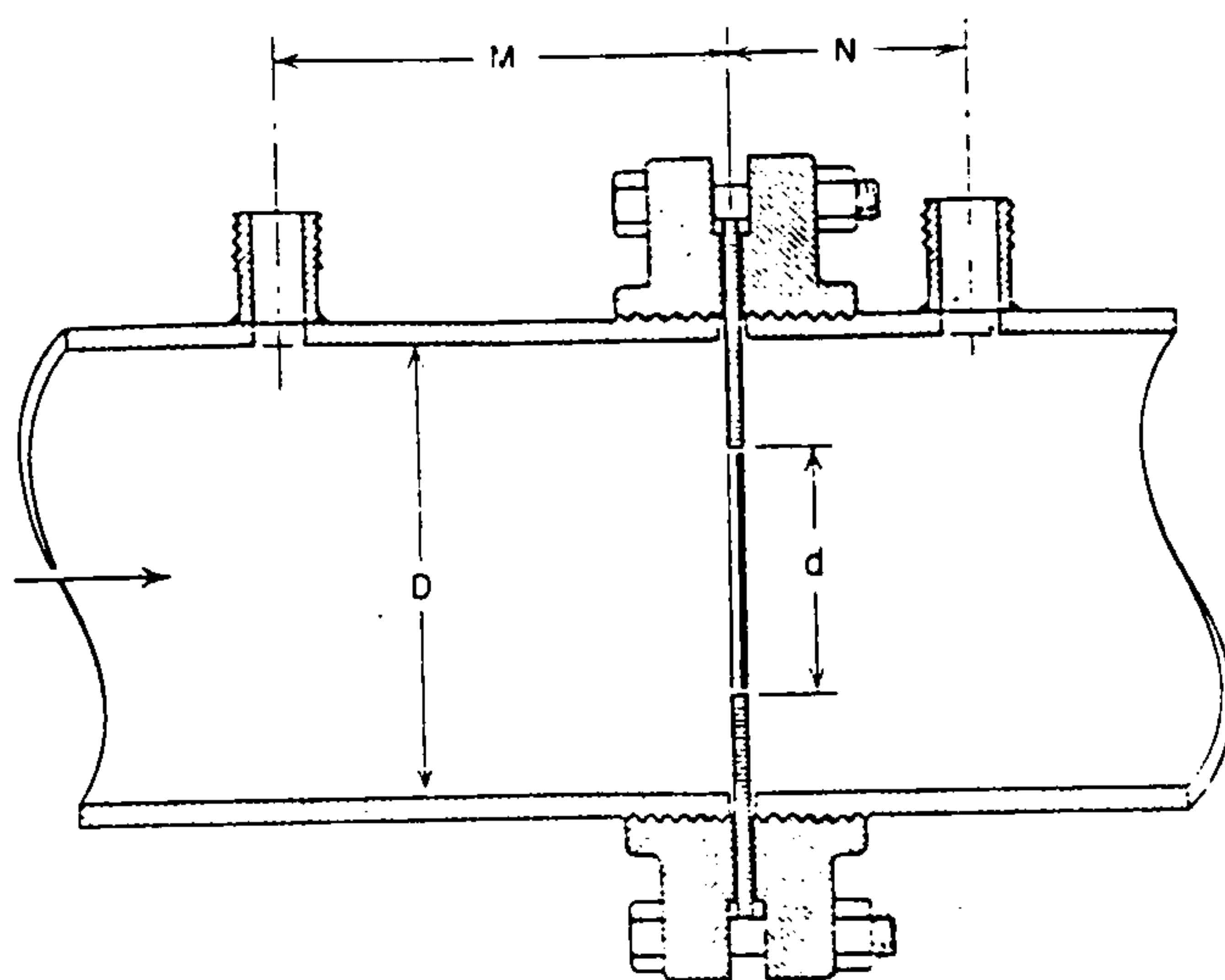


Orifice assembly with flange taps. (Reproduced by permission from D. M. Considine. *Process Instruments and Controls Handbook*, McGraw-Hill Book Co., 1957.)

รูป 3 การติดตั้งแผ่น orifice กับหน้าแปลนดัก
ความดัน (flange taps)

ในส่วนงานรอง (secondary element) ซึ่งเป็นตัววัดความดัน (pressure taps) จะต้องทำการติดตั้งเข้ากับระบบท่อในตำแหน่งที่การไหลเป็นแบบปั่นป่วน (turbulence) น้อยที่สุด ส่วนหน้าแปลนวัดความดัน (flange tap) จะอยู่ในตำแหน่งก่อนและหลัง orifice 1 นิ้ว จำนวน 2 ตัว การที่หน้าแปลนวัดความดัน (flange tap) ถูกติดตั้งในตำแหน่งก่อน (upstream) และหลัง (downstream) ของ orifice ด้วยระยะห่างเท่าๆกันทำให้เราสามารถวัดการไหลได้ทั้ง 2 ทิศทาง ดังนั้นหากมีการกลับทิศทางการไหลภายในระบบท่อ เพียงแต่กลับตัว orifice เท่านั้นก็สามารถทำการวัดได้ นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบเช็คสภาพได้ง่ายเพราะหน้าแปลนวัดความดัน (flange tap) ถูกติดตั้งใกล้กับหน้าแปลนของระบบท่อ อีกทั้งการที่หน้าแปลนวัดความดัน (flange tap) ถูกกำหนดตำแหน่งโดยบริษัทผู้ผลิตหน้าแปลน ดังนั้นจึงลดปัญหาความผิดพลาดของตำแหน่งติดตั้งที่อาจจะเกิดขึ้นได้

นอกจากนี้ยังมีการจัดตำแหน่งของการวัดความดัน (tap) ที่ในบางครั้งจะถูกนำมาใช้อีก 2 วิธี ได้แก่ vena contracta taps (ดูรูป 4) ซึ่งจะติดตั้งในด้านก่อนทางเข้ามาตรวัด (upstream) ด้วยระยะประมาณเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อและด้านหลังทางออกมาตรวัด (downstream) ในตำแหน่งที่มีความดันสถิตย (static pressure) ต่ำสุด ด้วยวิธีนี้จะให้ผลความแม่นยำน้อยกว่าวิธีการแบบที่หน้าแปลนวัดความดัน (flange tap) เล็กน้อย เพราะแบบ vena contracta taps จะตรวจวัดความแตกต่างความดันสูงสุด (maximum pressure differential) อีกวิธีได้แก่ pipe taps ซึ่งจะติดตั้งในตำแหน่งระยะ 2.5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อในด้าน upstream และที่ระยะ 8 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อทางด้าน downstream ซึ่งวิธีการนี้จะเป็นการวัดความสูญเสียความดันถาวร (permanent pressure losses)



Vena contracta taps. (Reproduced by permission from L. K. Spink, *Principles and Practice of Flow Meter Engineering*, 8th ed., The Foxboro Company, Foxboro, Mass., 1958.)

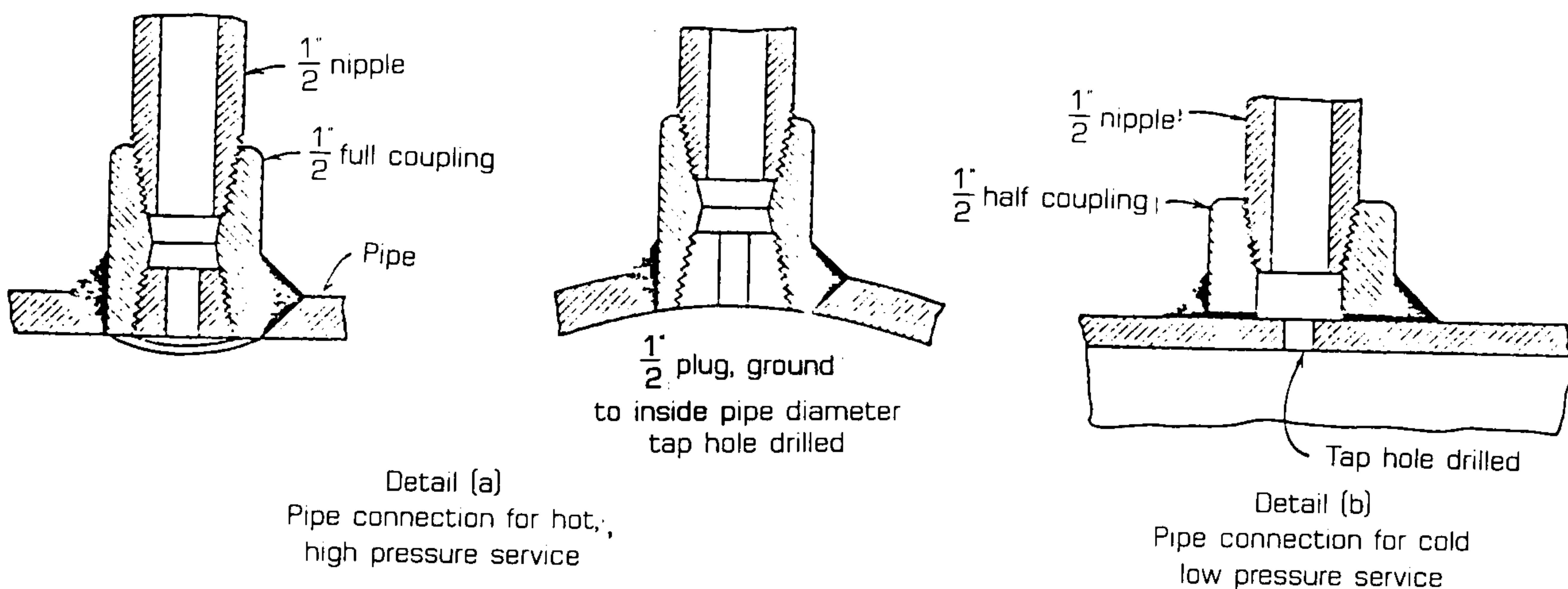
รูป 4 การติดตั้ง vena contracta taps

ข้อดีของ orifice type

สะดวกและง่ายต่อการติดตั้ง, ราคาประหยัด, ข้อมูลเกี่ยวกับมาตรวัดมีอยู่ค่อนข้างมาก, มีความแม่นยำต่อการวัดอีกทั้งมีวัสดุให้เลือกได้หลายคุณภาพ

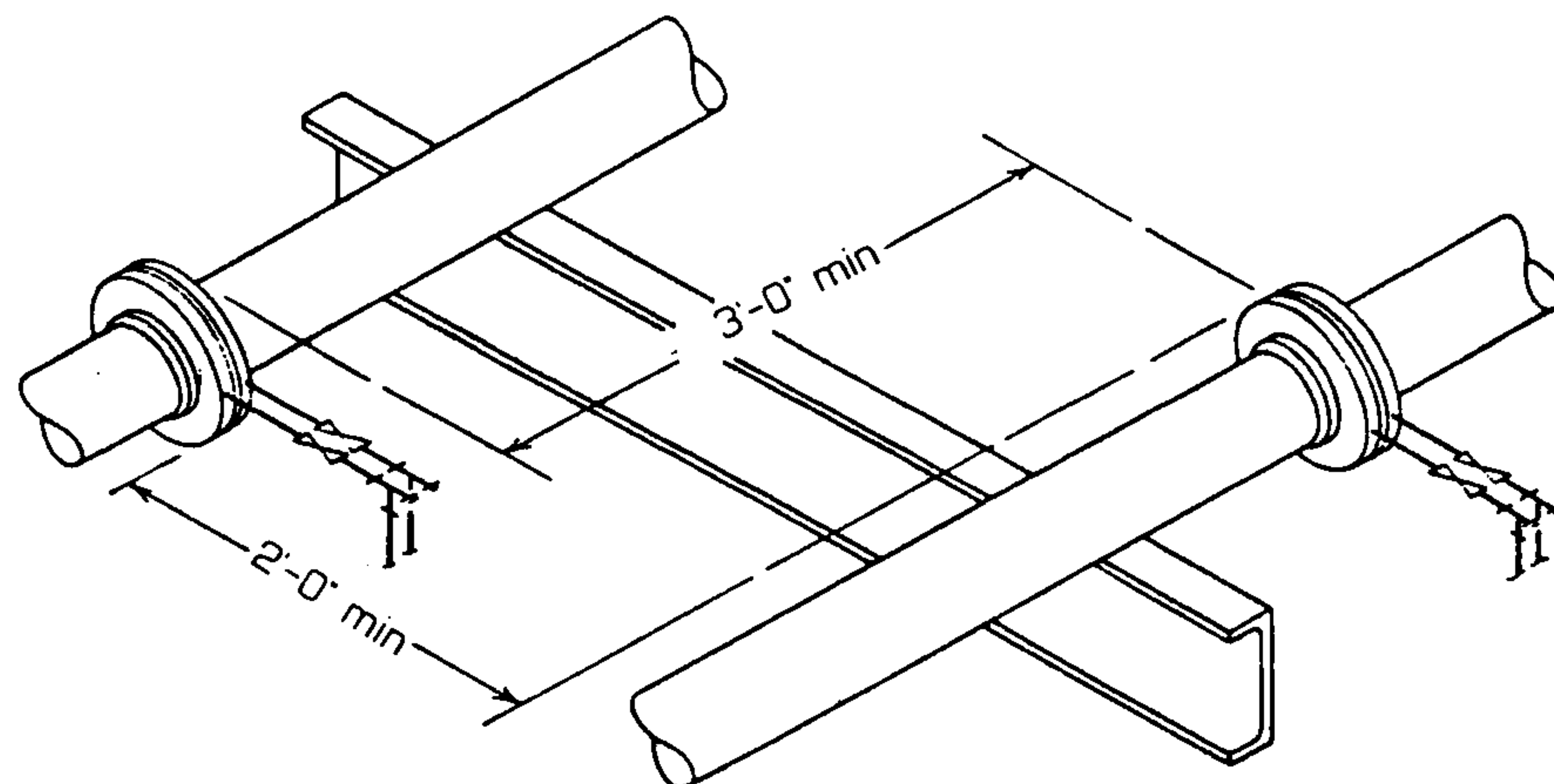
ข้อเสียของ orifice type

ในการติดตั้งและการทำงานจำเป็นต้องติดตั้งในระบบท่อที่มีแนวตรง แต่จะไม่มี ความแม่นยำ ถูกต้องในการวัดในกรณีที่ของไหลมีความหนืดสูง (มีค่า Reynolds number น้อยกว่า 15,000) และเมื่อของไหลในระบบท่อที่มีแรงดันสถิต (static pressure) ต่ำ เช่นตัวต้นกำลังเป็นพัดลม (blower) ขับเคลื่อนของไหลให้เคลื่อนที่ อีกทั้งใช้วัดได้เฉพาะกับของไหลที่สะอาด (ยกเว้น orifice ชนิด special segmental type และ eccentric type) เมื่อพิจารณาค่าความหนืดจากค่า Reynolds number ซึ่งเป็นค่าไม่มีหน่วย (dimensionless) เป็นเพียงการแสดงค่าสัดส่วนระหว่างแรงเฉื่อย (inertia) ของของไหลเทียบกับความหนืด (viscosity) ของไหล จะพบว่าเมื่อค่า Reynolds number มีค่าสูง แรงเฉื่อย (inertia forces) อันเกิดขึ้นกับของไหลจะเด่นชัดขึ้นแต่แรงหนืด (viscosity forces) จะด้อยไม่มีผลกระทบต่อการไหลของของไหลนั้นหมายถึงแรงเสียดทานบริเวณผิวผนังท่อกับแรงเสียดทานระหว่างชั้นการไหลจะมีค่าน้อยสามารถตัดทิ้งได้ไม่ต้องพิจารณา ส่งผลให้ความเร็วของการไหลสูงทำให้ของไหลมีแรงเฉื่อยสูงในทางกลับกัน เมื่อค่า Reynolds number มีค่าต่ำ อิทธิพลอันเนื่องจากความหนืด (viscosity effect) จะเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาเพราะเป็นสาเหตุให้สัมประสิทธิ์ด้านออก (discharge coefficient) มีค่ามากขึ้นทำให้วิธีการวัดยังยุ่งยากและซับซ้อน

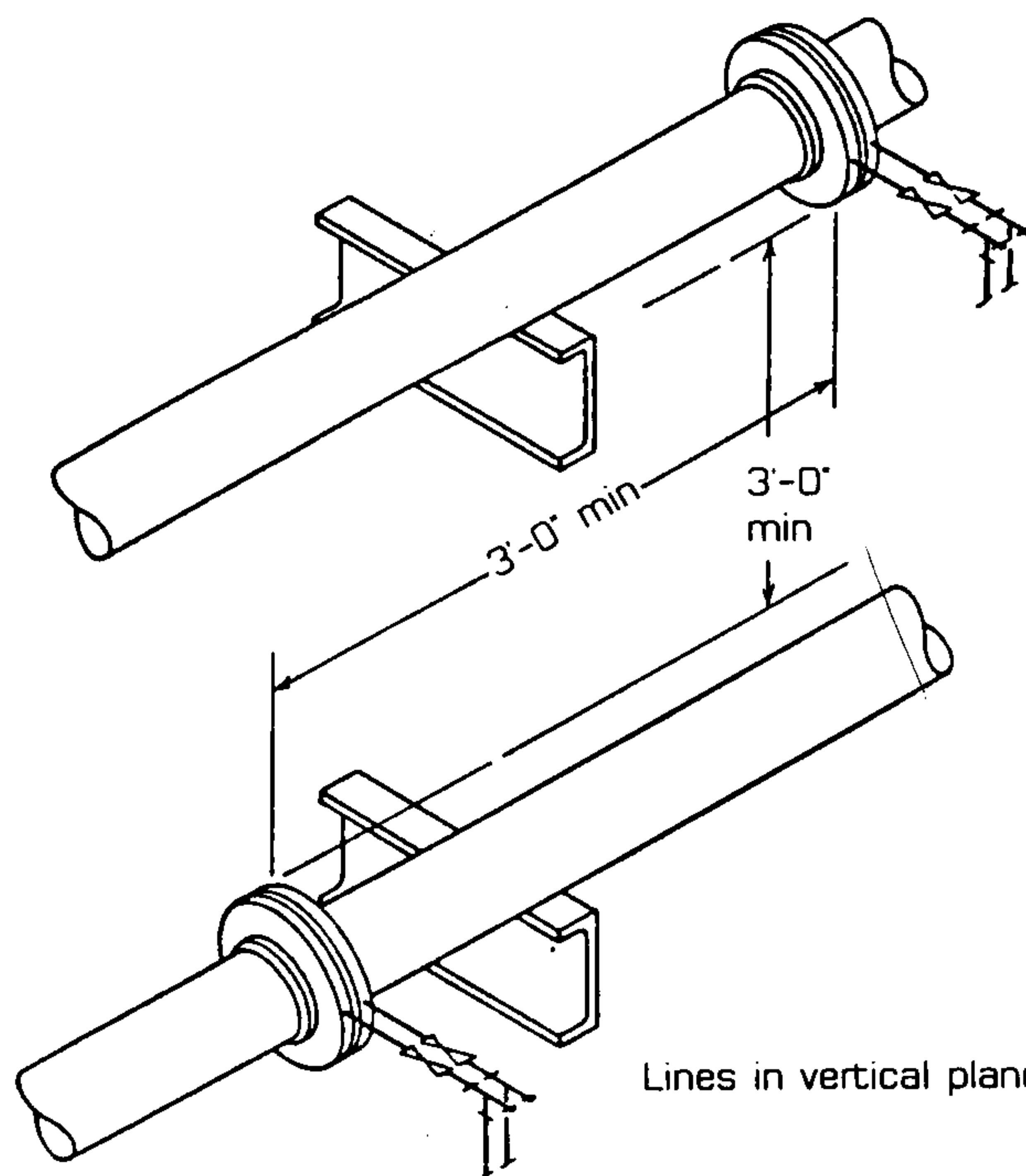


Orifice taps in pipe. (Reproduced by permission from R., F. Stearns, R.R. Johnson, R.M. Jackson, and C.A. Larson, *Flow Measurement with Orifice Meters*, D. Van Nostrand Co., New York, 1951. Copyright, Esso Research and Engineering Co.)

รูป 5 การติดตั้ง orifice tap กับท่อ



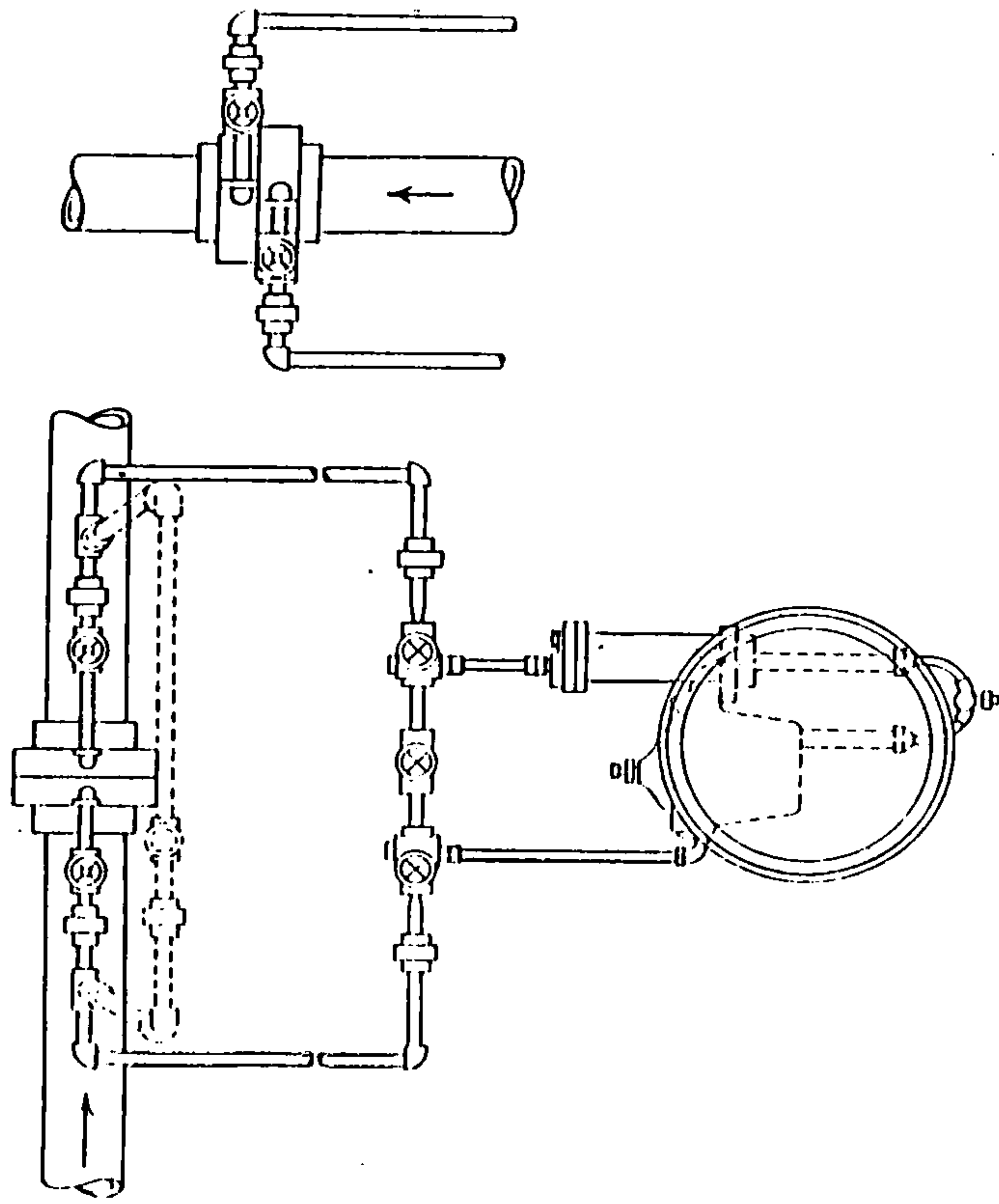
Lines in horizontal plane



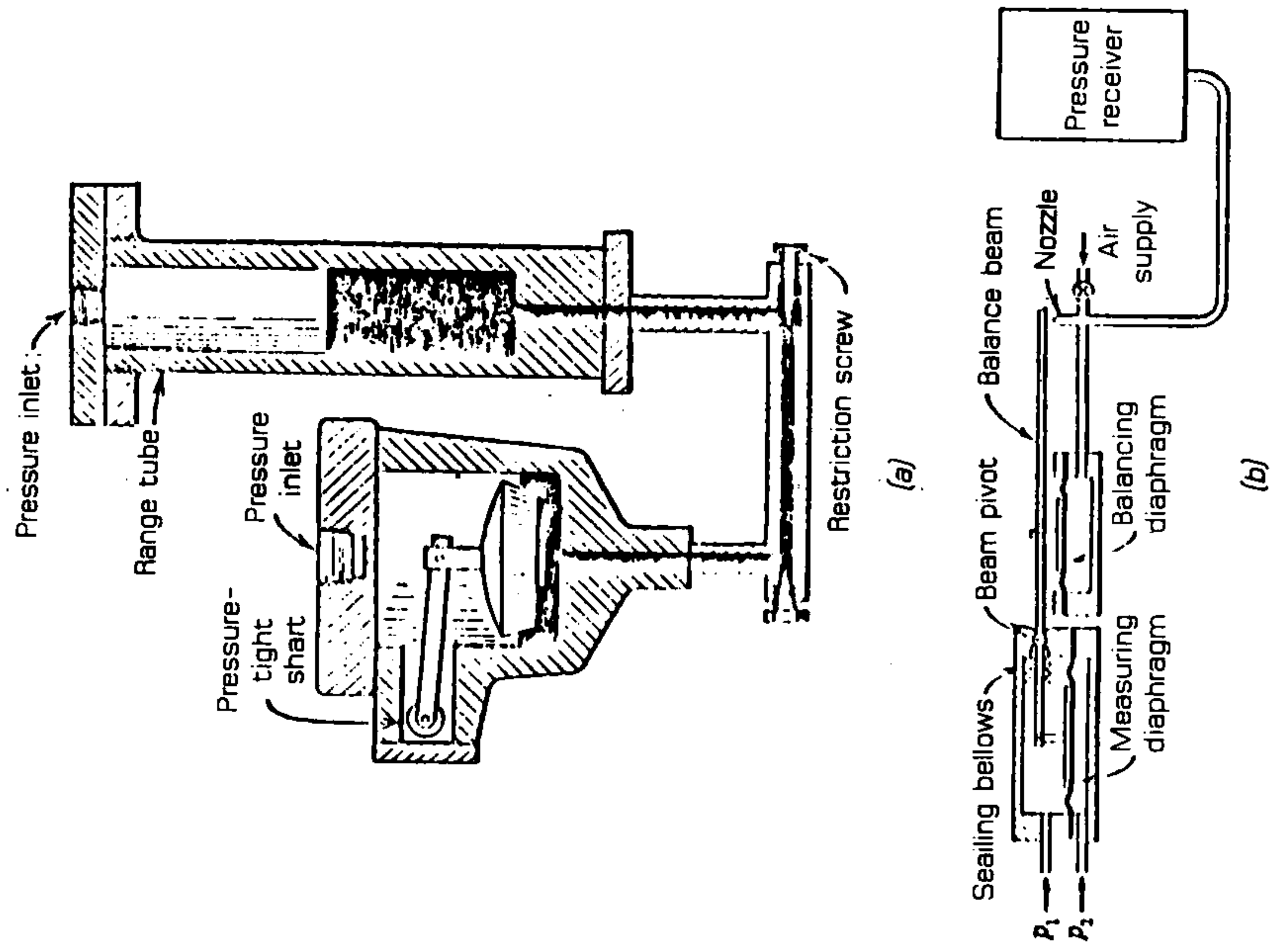
Lines in vertical plane

Recommended clearances for orifice meter runs. (Reproduced by permission from R.F.Stearns, R.R. Johnson, R.M.Jackson, and C.A.Larson, *Flow Measurement with Orifice Meters*, D. Van Nostrand Co., New York, 1951, Copyright, Essö Research and Engineering Co.)

รูป 6 ระยะห่างระหว่างการติดตั้งแผ่น orifice แต่ละตัวในระบบมาตรวัด (meter run)



Liquid flow-meter piping for mercury-actuated meter. (Reproduced by permission from L. K. Spink, *Principles and Practice of Flow Meter Engineering*, 8th ed., The Foxboro Company, Foxboro, Mass., 1958.)



Differential pressure-sensing devices. (a) Mercury-actuated. (b) Force-balance. (Reproduced by permission from D. P. Eckman, *Industrial Instrumentation*. John Wiley and Sons, New York, 1950).

รูป 8 ระบบท่อวัดการไหลของเหลว

รูป 7 อุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง (pressure differential device)

Flow nozzle เป็นมาตรวัดชนิดหนึ่งของมาตรวัดใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความดัน (head meter) มีด้านทางเข้าเป็นรูปร่างบานออก (flared inlet) จากนั้นส่วนถัดมาจะเป็นลักษณะคอคอดวงกลม (cylinder throat) มีเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.25 และ 0.7 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อมาตรวัดแบบนี้ไม่ค่อยสะดวกในการติดตั้งและมีราคาแพงกว่าแบบ orifice plate บ่อยครั้งที่ flow nozzle ถูกนำไปใช้ในการวัดของไหลที่มีอัตราการไหลและความหนืดสูงกว่าแบบ orifice plate

ข้อดีของ flow nozzle

ง่ายต่อการติดตั้งระหว่างหน้าแปลนท่อ (flange) , สามารถวัดของไหลที่ไม่สะอาดได้มากกว่าเมื่อเทียบกับแบบ orifice type , ให้ผลการวัดที่ความเร็วการไหลสูงด้วยความแม่นยำ อีกทั้งความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเมื่อไหลผ่าน nozzle ไปแล้วสามารถเพิ่มกลับขึ้นมาได้ดีกว่าแบบ orifice type ในกรณี nozzle สึกกร่อน มาตรวัดชนิดนี้จะไม่ค่อยมีผลต่อความแม่นยำมากนัก

ข้อเสียของ flow nozzle

ราคาค่อนข้างแพงในการผลิต , ยากต่อการถอดออกจากระบบท่อในกรณีที่ไม่ต้องการใช้งานอีก นอกจากนี้เป็นการยากที่จะตัดแปลงแก้ไขเพื่อให้สามารถใช้งานได้กับการวัดที่มีขีดความสามารถสูงขึ้น

Venturi มีลักษณะคล้ายกับ flow nozzle ยกเว้นในส่วนที่เป็นคอคอด (throat section) คือจะสั้นและค่อยๆลดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่ออย่างต่อเนื่อง ลักษณะเป็นเรียว (taper) นี้มีผลให้ความดันกลับคืนมา (pressure recovery) หลังจากผ่านคอคอดมีประสิทธิภาพดีมาก ดังนั้นหากไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงราคาค่าใช้จ่ายมาตรวัดใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความดัน (head meter) ชนิด venturi จะถูกนำไปใช้กับการวัดที่ต้องการความแม่นยำในการวัดโดยที่ทำให้ระบบมีการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด

ข้อดีของ Venturi

มีความแม่นยำสูงที่สุดในมาตรวัดชนิดความดันแตกต่าง (pressure-differential types) อีกทั้งความดันที่ลดลงเมื่อผ่าน venturi สามารถฟื้นกลับได้ดีมาก เหมาะกับการวัดของเหลวสกปรกที่มีปริมาณมากๆ ได้ดี

ข้อเสียของ venturi

ราคาแพง , ยากต่อการผลิต และค่อนข้างไม่คล่องตัวในการติดตั้งรวมทั้งยากต่อการดัดแปลงแก้ไขหากต้องการนำไปใช้งานที่อัตราการไหลอีกอัตราหนึ่ง

Pitot tube ประกอบด้วยช่องทางเดินความดัน (pressure passage) 2 ช่อง โดยที่ช่องทางด้านหน้าจะหันหน้าเข้าหาทิศทางการไหล พร้อมทำหน้าที่ตรวจวัดความดันรวม (total pressure) ส่วนช่องทางอีกด้านหนึ่งจะหันทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหลทำหน้าที่วัดความดันสถิต (static pressure) ผลต่างความดันระหว่างทั้ง 2 ด้านนี้จะถูกแปลงเป็นค่าการวัดความเร็ว (velocity) การไหล แต่เนื่องจากการวัดความเร็วการไหลเพียงจุดเดียว ดังนั้น pitot tube จะต้องเปลี่ยนตำแหน่งไปในตำแหน่งต่างๆของพื้นที่หน้าตัดของท่อให้ได้ตำแหน่งที่แตกต่างกันหลายจุดเพื่อจะนำไปหาค่าความเร็ว

เฉลี่ยที่ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด จากนั้นนำค่าความเร็วเฉลี่ยดังกล่าวไปหาค่าอัตราการไหลได้จากสมการ

$$Q = Av$$

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของท่อ
 v = ความเร็วการไหลเฉลี่ย

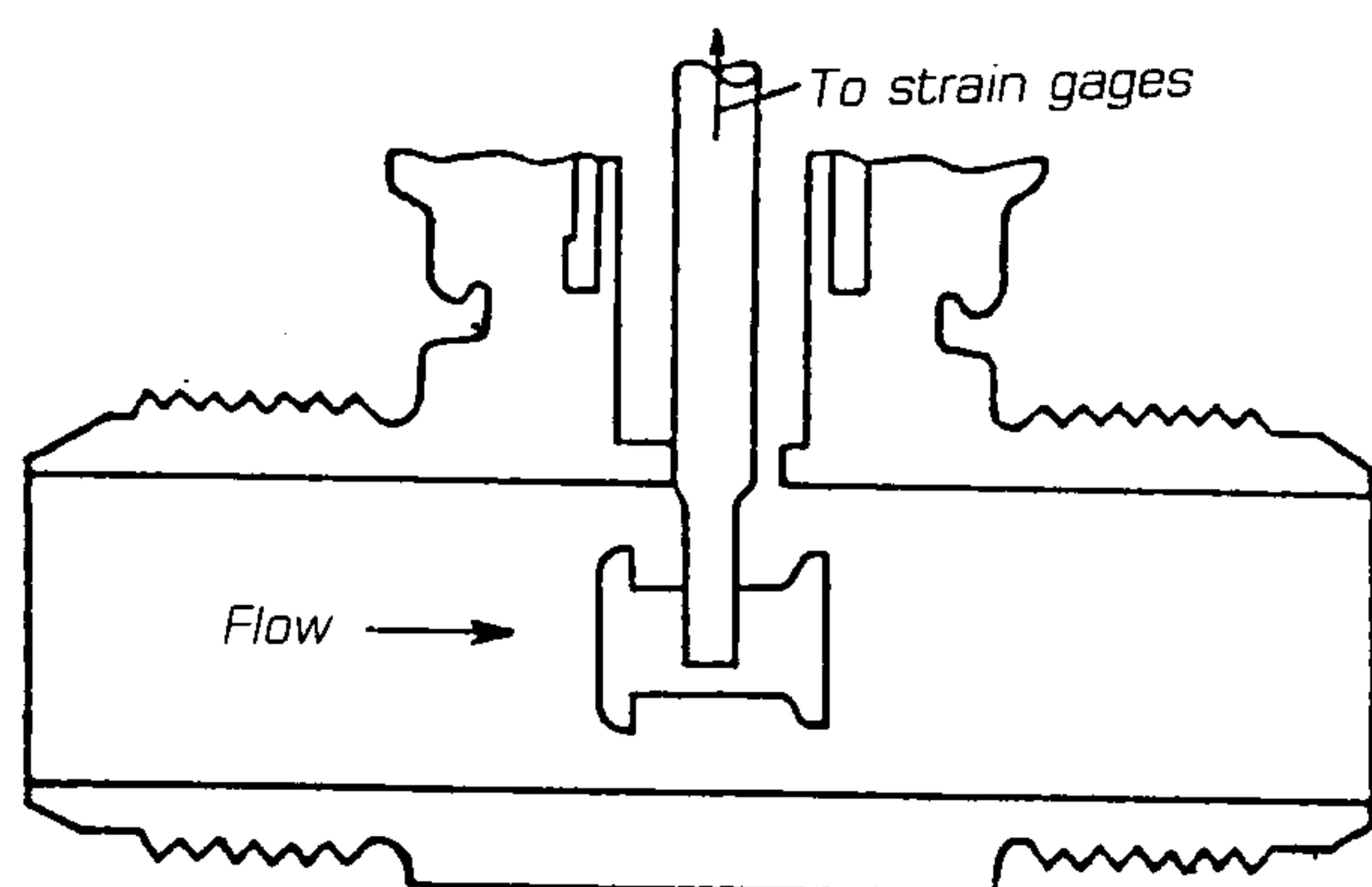
ข้อดีของ pitot tube

เป็นมาตรวัดที่ใช้พลังงานในการทำการวัดเพียงเล็กน้อยและง่ายต่อการติดตั้ง ตัว pitot tube เพียงตัวเดียวก็สามารถใช้วัดได้กับท่อเกือบทุกขนาด ที่สำคัญคือมีราคาถูก

ข้อเสียของ pitot tube

ค่อนข้างไม่แม่นยำเมื่อเทียบกับมาตรวัดอื่น , ใช้เฉพาะกับของไหลที่สะอาด นอกจากนี้ยังต้องเสียเวลาและใช้ความอดทนในการเคลื่อน tube ไปในตำแหน่งต่างๆของพื้นที่หน้าตัดการไหลเพื่อหาค่าความเร็วการไหลเฉลี่ย (average velocity)

Drag body ตรวจวัดหาความเร็วการไหลของของไหลโดยใช้หลักการแรงจลน์ (dynamic force) ที่กระทำต่อวัตถุที่มีรูปร่างคงที่ (fixed body) ซึ่งวางอยู่ในช่องทางไหล โดยทำการติดตั้ง strain gages แบบ bridge circuit พร้อมแยกอิสระออกจากของไหลด้วยผนังสแตนเลส (stainless steel) ดังนั้นเมื่อแรงจลน์ (dynamic force) กระทำต่อ drag body จะทำให้ก้านที่ต่อออกจาก drag body โค้งงอ ส่งผลให้ strain gage ซึ่งติดตั้งอยู่บนก้านดังกล่าวแปลงค่ากระแสไฟออกมา โดยที่กระแสไฟที่ส่งออกมาจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการไหลเดิมยกกำลัง 2 (square of the original flowrate) (ดูรูป 9)



รูป 9 มาตรวัดชนิด Drag Body

DRAG BODY, Ramapo Instrument Co .

ข้อดีของ Drag body

เป็นมาตรวัดอีกชนิดหนึ่งที่ได้ผลการวัดที่แม่นยำสูง สำหรับมาตรวัดชนิดความดันต่าง (differential pressure meter) อีกทั้งสามารถใช้วัดได้ทั้ง 2 ทิศทาง

ข้อเสียของ Drag body

จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอก และตัวมาตรวัดเองก็มีความไวต่อการกระแทก (shock) และความสั่นสะเทือน (vibration)

Capillary type ใช้กับงานที่มีช่วงการไหลต่ำมาก ๆ และกับของไหลที่มีความหนืดสูง ๆ นั้น คือการไหลของของไหลมีค่า Reynolds number ต่ำกว่า 15,000 หลักการทำงานคือ เมื่อปริมาณของไหลไหลผ่านท่อขนาดเล็กภายในช่วงเวลาที่กำหนดจะมีค่าเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างความดันที่ทำให้มีการไหล คูณกับ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อยกกำลัง 4 หาค่าทั้งหมดด้วย ความยาวท่อคูณด้วยความหนืด หรือเรียกว่า **"Hagen-Poiseuille law"** ซึ่งจะมีสมการคือ

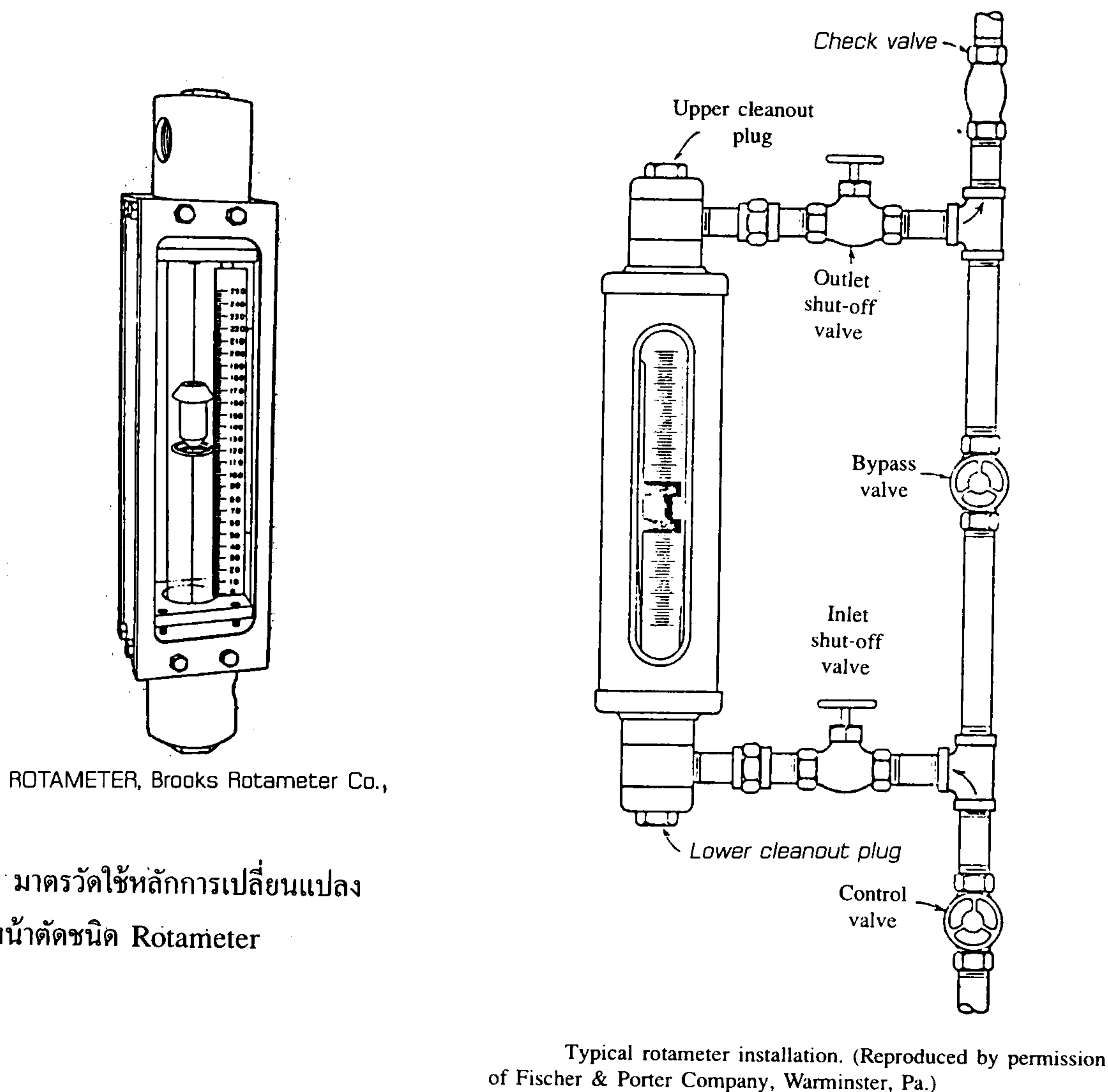
$$Q = \frac{\pi \Delta p d^4}{128 \mu l}$$

เมื่อ Δp = ความดันตก (pressure drop)
 d = เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ capillary
 μ = ความหนืด
 l = ความยาวท่อ capillary

มาตรวัดใช้หลักการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด (Variable-area meter)

มาตรวัดชนิดนี้มีหลักการทำงานความดันแตกต่าง (differential pressures) ขณะที่มาตรวัดใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความดัน (head-meter) จะประกอบด้วยช่องเปิดคงที่ (fixed aperture) และทำการวัดความดันแตกต่างระหว่างช่องเปิดคงที่ แต่สำหรับ area meter จะคงรักษาความสัมพันธ์ค่าคงที่ระหว่างความดันแตกต่างกับพื้นที่ช่องเปิด (aperture area) ที่วัดได้โดยจะเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ขณะมีการไหล มาตรวัดชนิดนี้ส่วนใหญ่ที่เราเจอได้แก่ rotameter ซึ่งประกอบด้วยหลอดแก้วเรียวภายใน (vertical tapered glass tube) บรรจุภายในด้วยแท่งน้ำหนักเรียว (tapered weight) พื้นที่หน้าตัดจะถูกคำนวณ ณ ระดับความสูงของน้ำหนัก (weight) ที่ลอยตัวขึ้นไปอันเนื่องจากแรงของความดันของไหล เราจะพบว่าความดันแตกต่าง (differential pressure) จะคงรักษาสภาพคงที่ไว้ด้วยการรักษาภาวะสมดุลระหว่างน้ำหนักของแท่งน้ำหนักเรียว (tapered weight) มีค่าคงที่กับแรงดันของไหล ดังนั้นเมื่อการไหลเพิ่มขึ้นแท่งน้ำหนักเรียว (tapered weight) ซึ่งอยู่ภายในหลอดแก้วเรียวภายใน (vertical tapered glass tube) ก็จะถูกแรงดันผลักให้ลอยตัวสูงมากขึ้นเป็นสาเหตุให้พื้นที่หน้าตัดเพิ่มมากขึ้น ในการ

อ่านค่าการไหลเราสามารถอ่านค่าได้โดยตรงจากขีดจั่นหมายมาตราที่อยู่ข้างหลอดแก้วเรียวภายใน (vertical tapered glass tube) นอกจากนี้ยังมีมาตรวัดใช้หลักการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด (Variable-area meter) อีกชนิดหนึ่งได้แก่ท่อโลหะ (metal tube) หรือ cylinder-and-piston type ประกอบด้วยตัวลูกสูบ (piston) ที่มีขนาดพอดีอยู่ภายในท่อกลม (cylinder) และจะยกตัวลอยขึ้นเนื่องจากความดันของของไหลจนกระทั่งถึงพื้นที่ทางออก (port area) ซึ่งอยู่ภายในท่อกลม (cylinder) เปิดออกให้ของไหลถูกขับออกไป (รูปที่ 10)



รูป 10 มาตรวัดใช้หลักการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดชนิด Rotameter

รูป 11 แสดงการติดตั้งมาตรวัดชนิด Rotameter

ข้อดีของ Variable-area meter

ไม่จำเป็นต้องใช้ส่วนทำงานรอง (secondary elements) ในการแสดงค่า , สามารถให้ผลการวัดแม่นยำได้ในช่วงการวัดกว้าง อีกทั้งที่อัตราการไหลต่ำๆ , ใช้งานได้กับของไหลกัดกร่อน , สามารถอ่านค่าได้โดยตรงแต่หากต้องการให้สามารถอ่านค่าและไปแสดงผลในที่ห่างไกลออกไปจากตัวมาตรวัดก็สามารถทำได้โดยใช้ magnetic following device นอกจากนี้หากต้องการให้มาตรวัดมีความ

สามารถวัดการไหลได้เพิ่มขึ้นหรือน้อยลง ก็สามารถทำได้ด้วยการเปลี่ยนตัวแท่งน้ำหนักเรียว (tapered weight) มาตรวัดชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องมีระบบท่อพิเศษในด้านก่อน (upstream) หรือ หลัง (downstream) ทางเข้าตัวมาตรวัดแต่อย่างใด ที่สำคัญความดันสูญเสีย (loss pressure) มีค่าน้อยและคงที่

ข้อเสียของ Variable-area meter

ต้องหมั่นคอยดูแลหลอดแก้ว (Glass tube) ให้สะอาดอยู่เสมอ ในกรณีที่ใช้งานกับของเหลวที่สกปรก (dirty fluid) จำเป็นต้องมีส่วนอ่านค่าในที่ห่างไกลจากตัวมาตรวัด ในกรณีที่หลอดเป็นโลหะ หลักการทำงานของมาตรวัดจะไม่ค่อยได้ผลที่แม่นยำมากนัก ถึงแม้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความดันแตกต่างเพิ่มสูงขึ้นเมื่อการไหลเพิ่มขึ้นจะเป็นไปอย่างคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากแรงเสียดทานภายในมาตรวัด ให้ผลการวัดไม่ได้ผลที่แม่นยำ , มาตรวัดชนิดนี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์หน่วงความดัน (damping device) หากนำไปใช้กับการวัดที่มีการไหลแบบเป็นจังหวะ (pulsing flow) เช่นการไหลอันเนื่องมาจากใช้ปั๊มลูกสูบชัก (reciprocating pump) ขั้วของไหล

Positive-displacement meter

displacement meter เป็นมาตรวัดที่ให้ผลการวัดเป็นค่ารวมการไหล มาตรวัดชนิดนี้จะทำการแบ่งการไหลออกเป็นปริมาตรที่รู้ค่าแน่นอน จากนั้นก็ทำการนับจำนวนของการแบ่งปริมาตร ยกเว้น มาตรวัดแบบ diaphragm type

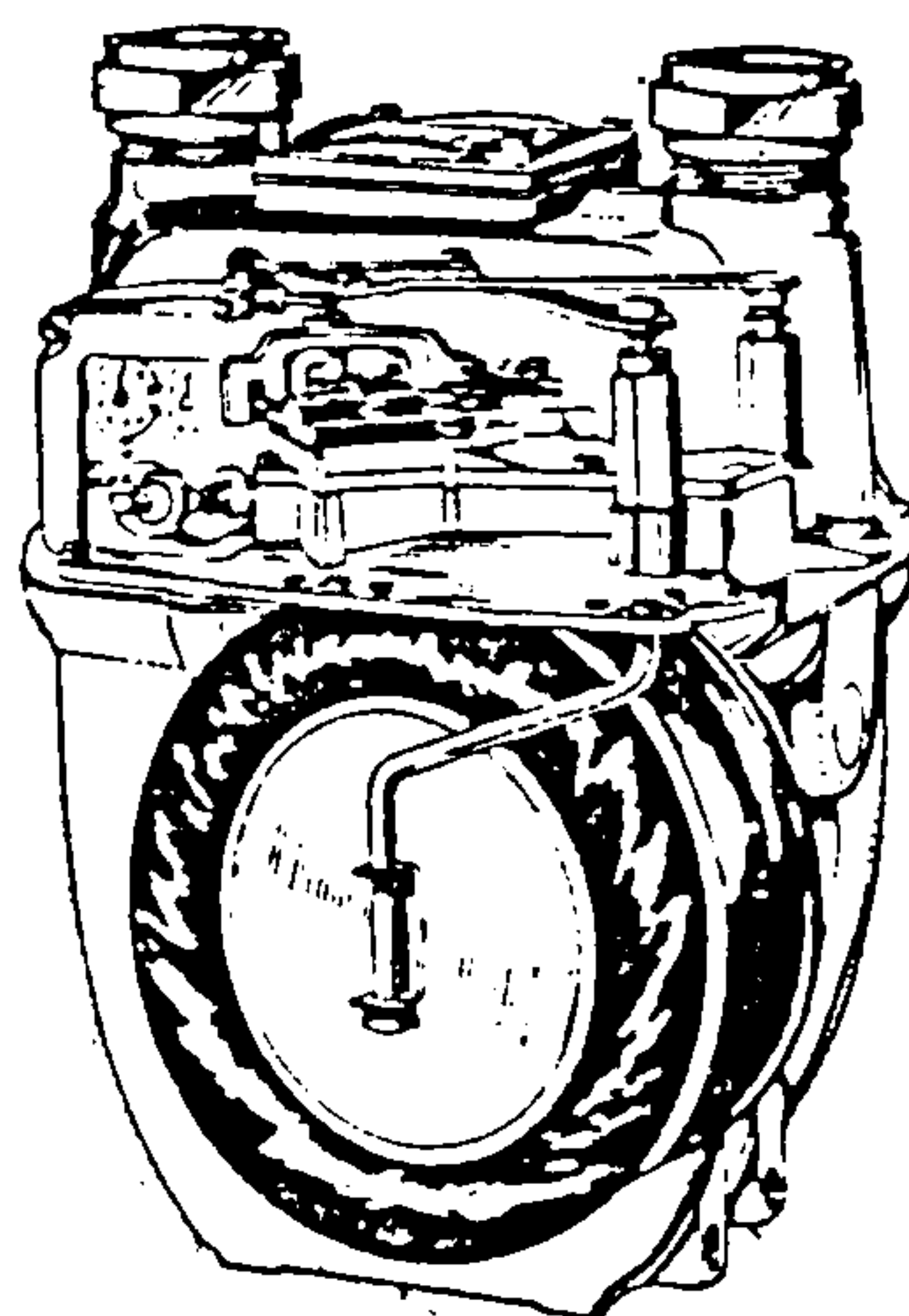
ข้อดีของ Positive-displacement meter

ง่ายต่อการออกแบบ , ให้ค่าผลการวัดแม่นยำไม่ว่าจะเป็นการไหล ณ. ตำแหน่งที่มีค่าต่ำๆของช่วงการวัดได้ของมาตรวัด , มาตรวัดที่ผลิตออกมาทำด้วยวัสดุมีให้เลือกหลากหลายและสามารถทำการสอบเทียบ (calibrate) เพื่อนำไปใช้วัดกับของเหลวได้กับของไหลหลายชนิด

ข้อเสียของ Positive-displacement meter

การบำรุงรักษาจำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง เพราะว่ามีชิ้นส่วนเคลื่อนที่ (moving parts) หลายชิ้น อีกทั้งเมื่อชิ้นส่วนดังกล่าวสึกกร่อนก็จะมีผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัดทันที ในการติดตั้งมาตรวัดเข้าในระบบจำเป็นต้องทำการจำกัดไอ(vapor)แยกออกจากของไหลเสียก่อนในด้านทางเข้า (upstream) มาตรวัดโดยใช้ตัวดักไอ (vapor trap) หากต้องการจะรู้ค่าอัตราการไหลขณะใดขณะหนึ่งจากมาตรวัด จำเป็นต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงในการติดตั้งอุปกรณ์ช่วยเสริม

Diaphragm type เป็น gas flowmeter รูป 13 มาตรวัดชนิดนี้ประกอบด้วยตัวเรือนมาตรวัด (divided housing) ,diaphragm 2 ตัว , sliding valve 2 ตัว , ข้อเหวี่ยง (crank) , tangent arm , และ ข้อต่อ (linkage) ดังนั้นเมื่อก๊าซไหลเข้าตัวมาตรวัด วาล์วจะเลื่อนให้ก๊าซไหลเข้าช่อง diaphragm ตัวหนึ่งและทำให้ diaphragm อีกตัวซึ่งมีก๊าซอยู่ถูกดันออกไป ซึ่งในแต่ละจังหวะการทำงานจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับมาตรวัดชนิดลูกสูบชัก (reciprocating piston) โดย crank's tangent arm จะ



DIAPHRAGM GAS METER, Rockwell Mfg Co

รูป 13 มาตรวัดชนิด Diaphragm Gas

เปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบกลับไปมา (reciprocating motion) ของ diaphragm ไปหมุนข้อเหวี่ยง (crank) ผ่านทางข้อต่อ (linkage) ทั้งนี้การหมุนของข้อเหวี่ยง (crank) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเคลื่อนที่ของ diaphragm จากนั้นจะถูกแปลงค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาตรของก๊าซที่ไหลผ่านมาตรวัด

ข้อดีของ Diaphragm type

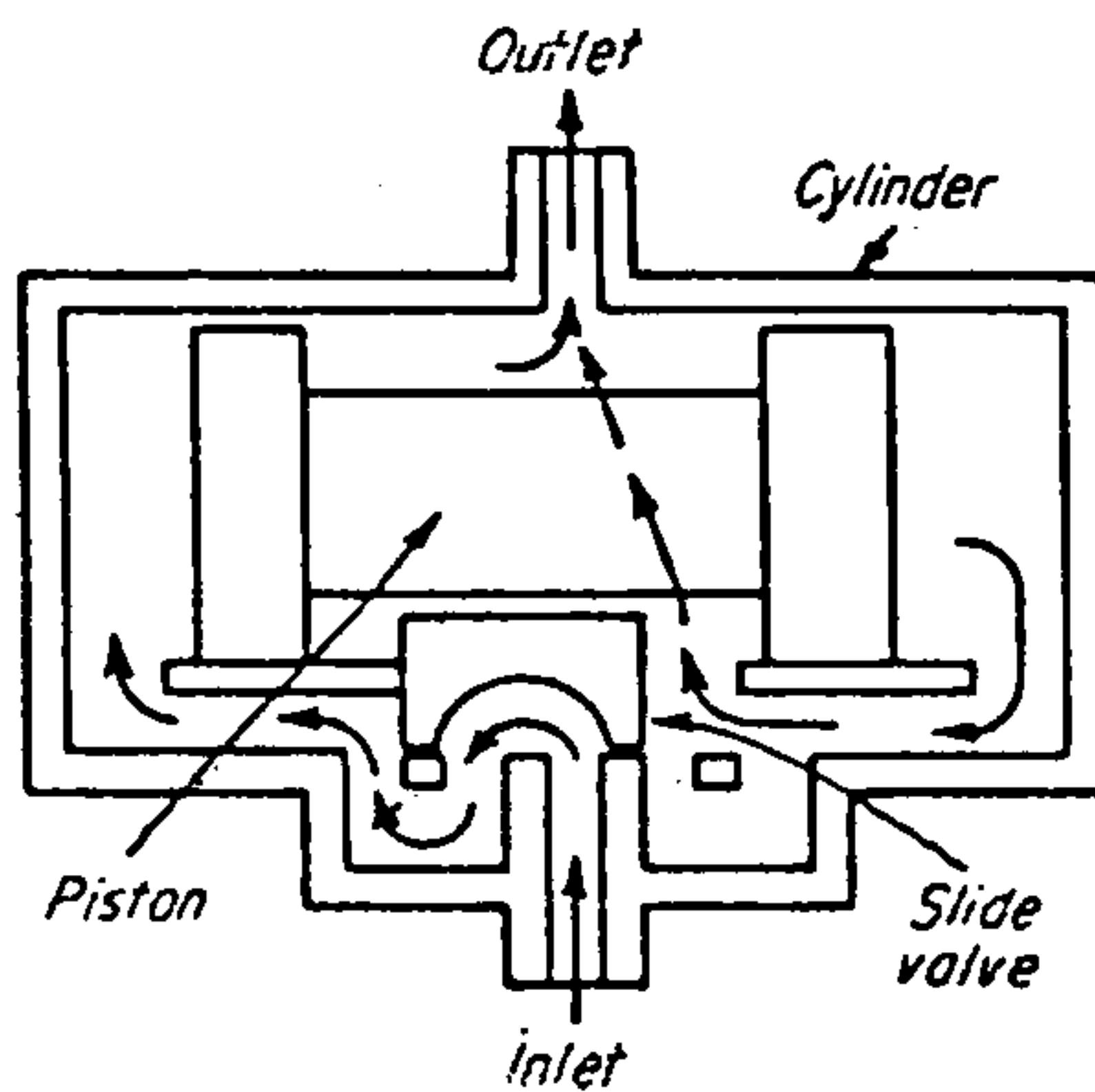
ประหยัด, ปริมาตรของไหลมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับการเคลื่อนที่แบบกลับไปมา (reciprocating motion) ของ diaphragm . สามารถอ่านค่าได้โดยตรง

ข้อเสียของ Diaphragm type

สามารถใช้งานได้เฉพาะกับก๊าซเท่านั้น . และที่ความดันต่ำ

Reciprocating piston มีให้เลือกหลายแบบด้วยกัน แต่ชนิดที่มักจะพบเห็นกันส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกระบอกสูบ (cylinder) 2 ตัว , double-ended piston และ sliding valve เมื่อวาล์วอยู่ในตำแหน่งเปิดทางด้านซ้าย ของไหลจะไหลเข้าและดันลูกสูบ (piston) ซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายให้เคลื่อนไปด้านขวา ส่งผลให้ลูกสูบ (piston) ซึ่งอยู่ด้านขวาดันของไหลภายในกระบอกสูบ (cylinder) ด้านขวาให้ไหลออกไป เมื่อลูกสูบ (piston) ทางด้านขวาเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งสูงสุดทางด้านขวา sliding valve จะเคลื่อนไปทางด้านขวา ของไหลจะไหลเข้ากระบอกสูบ (cylinder) ทางด้านขวาพร้อมทั้งดันลูกสูบ (piston) ด้านขวาให้เคลื่อนที่ไปทางด้านซ้าย ของไหลภายในกระบอกสูบ (cylinder) ด้านซ้ายก็จะถูกขับเคลื่อนออกไปด้วยลูกสูบ (piston) ด้านซ้าย ทั้งนี้ลูกสูบ (piston) ทั้ง 2 จะต่ออยู่กับแกนข้อ

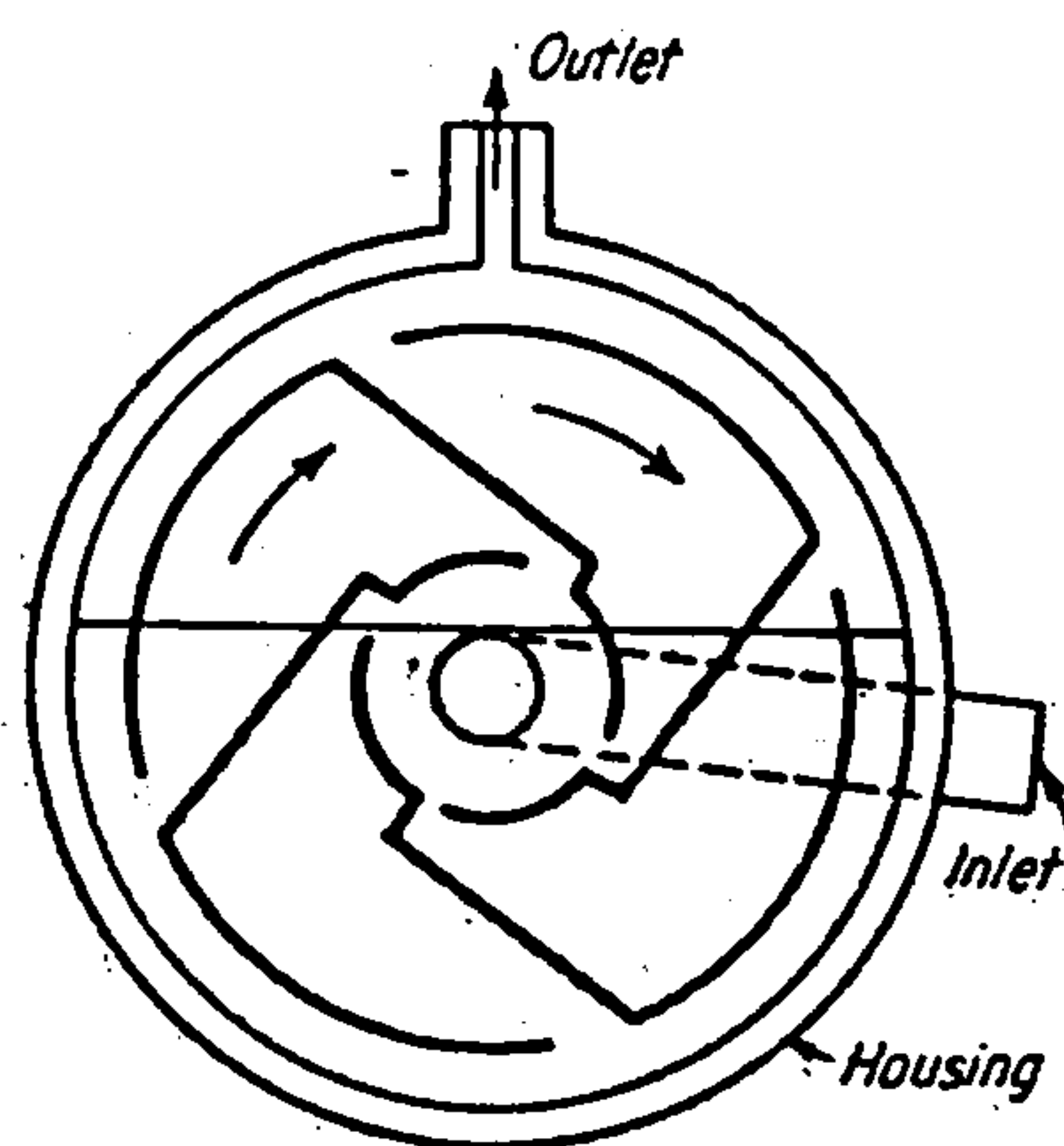
เหวี่ยง (crank arm) ในตำแหน่ง sliding valve จะมีกลไกนับจำนวนการเคลื่อนที่ของลูกสูบ (piston) จากนั้นแปลงค่าเป็นอัตราการไหล (ดูรูป 12)



RECIPROCATING-PISTON METER

รูป 12 มาตรวัดชนิด Reciprocating-Piston

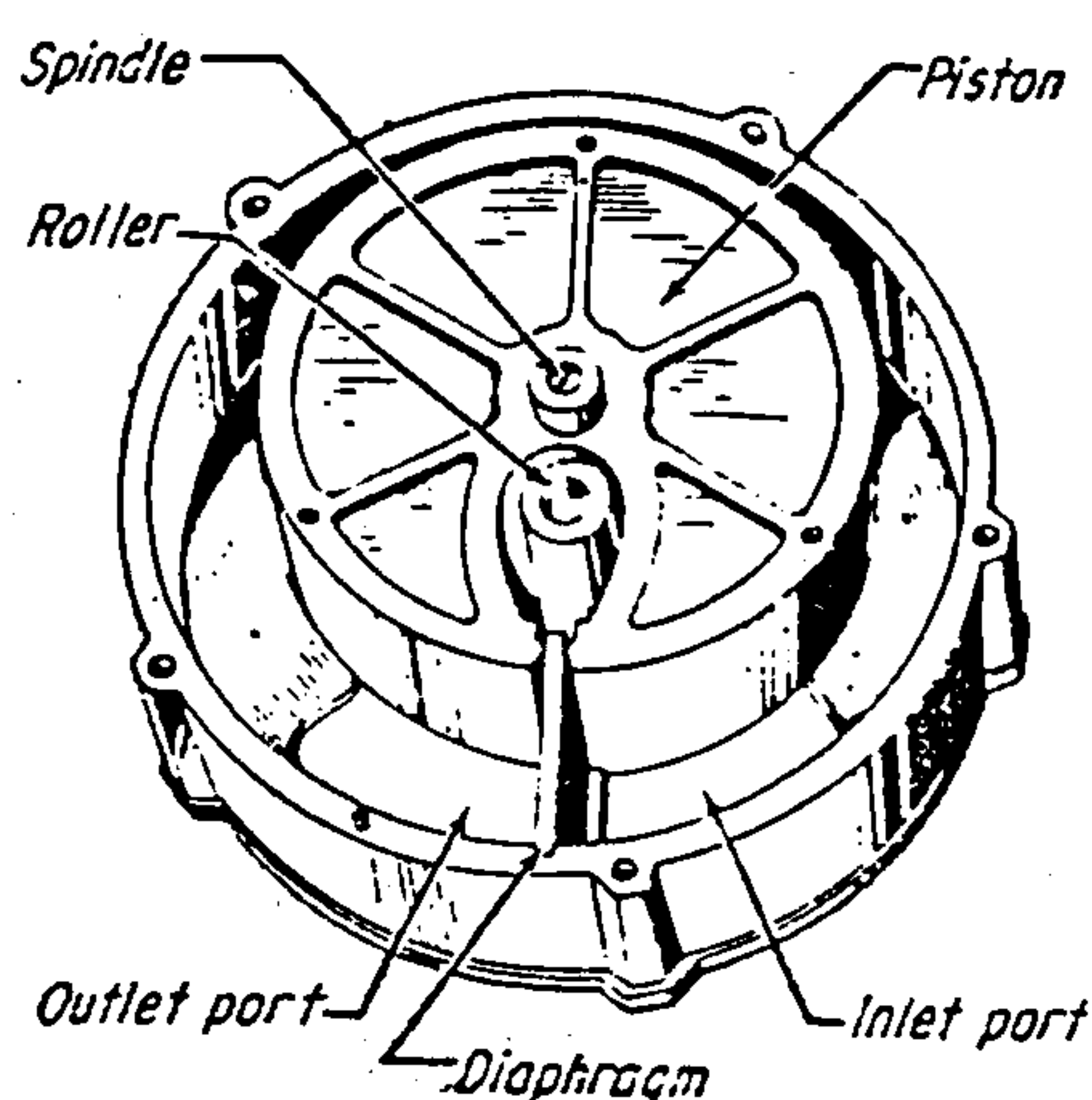
Revolving drum ใช้วัดการไหลของก๊าซขึ้นส่วนที่ใช้ในการวัด (measuring element) ได้แก่ drum ซึ่งมีบางส่วนจมอยู่ในของไหล เมื่อฟองก๊าซ (gas bubble) ผ่านของไหลมาจะผลักชิ้นส่วนผนัง (partition) ใน drum เป็นเหตุให้ drum เคลื่อนที่หมุนและปล่อยก๊าซออกทางด้านออก (outlet) ของมาตรวัด (ดูรูป 14)



REVOLVING-DRUM METER

รูป 14 มาตรวัดชนิด Revolving-Drum

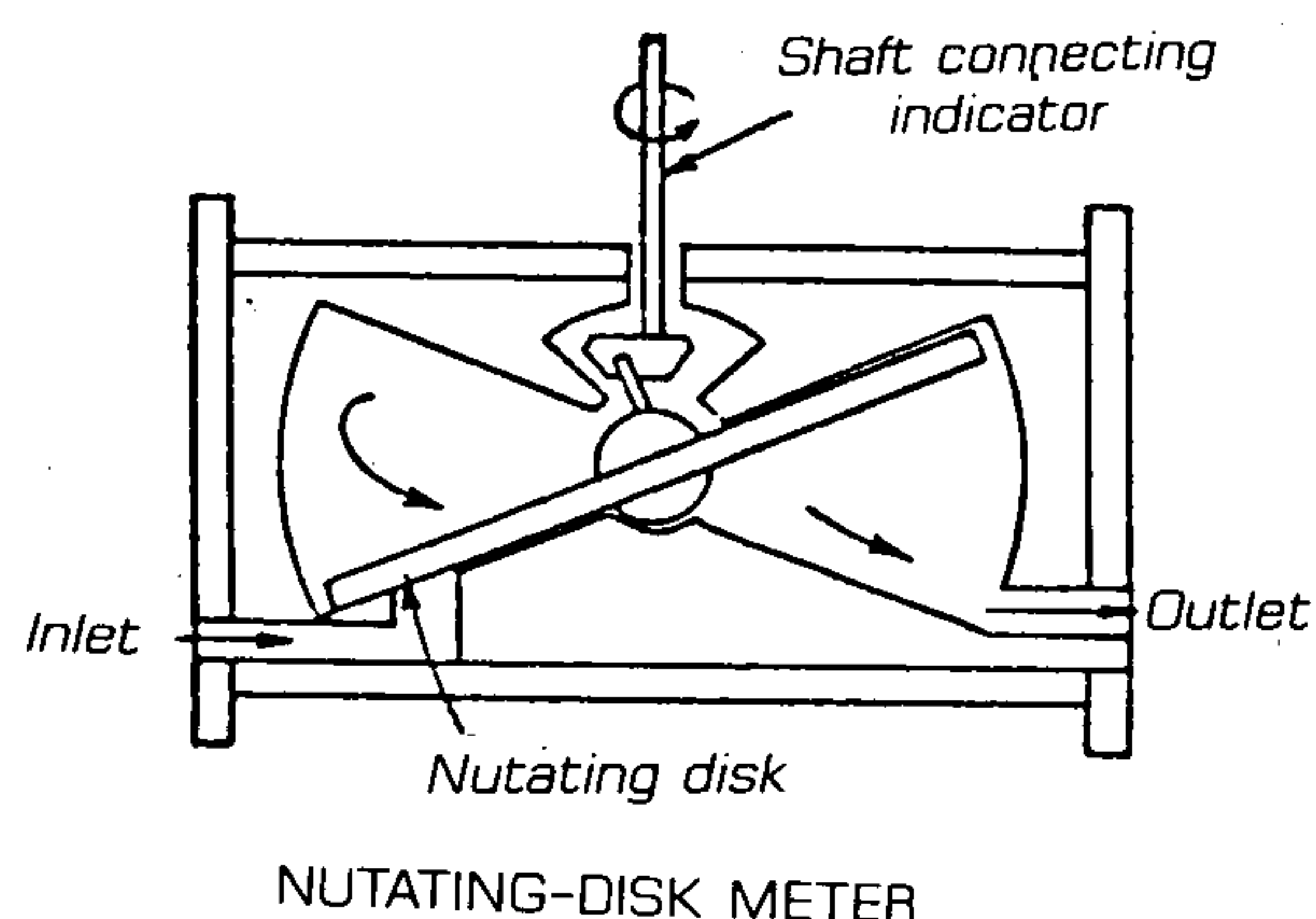
Rotating piston หรือ “vane type” ประกอบด้วยลูกสูบ (piston) ซึ่งติดตั้งในตำแหน่งเอียงศูนย์กลางในกระบอกสูบ (cylinder) ตัวลูกสูบ (piston) จะมีใบพัดคันด้วยสปริง (spring-loaded sliding vane) หลายตัวซึ่งจะสัมผัสกับผนังกระบอกสูบ (cylinder) อยู่ตลอดเวลา เมื่อของไหลไหลเข้ากระบอกสูบ (cylinder) ก็จะถูกค้ำอยู่ในระหว่างใบพัด (vane) และเป็นสาเหตุให้ลูกสูบ (piston) หมุนจนกระทั่งของไหลที่อยู่ระหว่างใบพัด (vane) ถูกพาไปจนถึงทางออกของมาตรวัด จากนั้นก็จะถูกดันออกไปจากมาตรวัดโดยอาศัยแรงดันอันเนื่องมาจากการที่ปริมาตรระหว่างใบพัด (vane) ลดลงแต่ความดันระหว่างใบพัด (vane) จะสูงขึ้น (ดูรูป 15)



ROTATING-PISTON METER,
Neptune Meter Co

รูป 15 มาตรวัดชนิด Rotating Piston

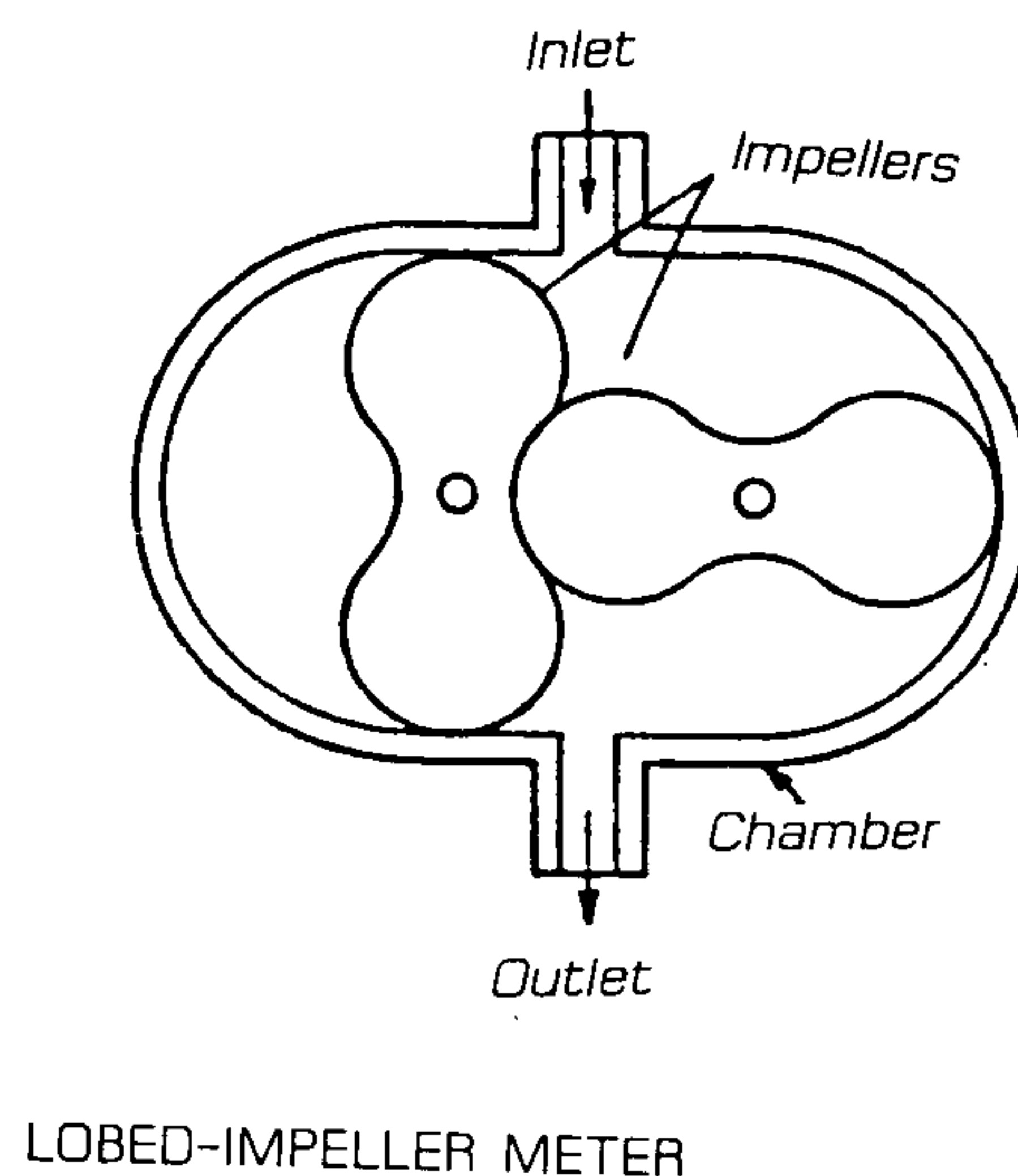
Nutating disk ใช้วัดของเหลวโดยแผ่นดิสก์ (disk) จะกักของเหลวไว้เมื่อของเหลวไหลเข้ามาทางด้านเข้า (inlet) โดยในแต่ละรอบ (nutating cycle) จะขับปริมาตรจำนวนหนึ่ง (discrete volume) ของของเหลวผ่านออกทางด้านทางออก เนื่องจากมาตรวัดชนิดนี้ง่ายในการออกแบบอีกทั้งราคาไม่ค่อยแพงมากนักและไม่จำเป็นต้องได้รับการบำรุงรักษามากนัก ทำให้มาตรวัดชนิดนี้ได้รับความนิยมมากในฐานะเป็นมาตรวัดชนิดหนึ่งของ displacement meter (ดูรูป 16)



NUTATING-DISK METER

รูป 16 มาตรวัดชนิด Nutating-Disk

Lobed-impeller เป็นมาตรวัดใช้วัดการไหลของก๊าซและมีหลักการทำงานคล้ายกับ rotating piston จะมีโรเตอร์ (rotor) 2 ตัวจัดเรียงอยู่ในตำแหน่งที่แน่นอนภายในห้อง (chamber) มาตรวัดโดยที่โรเตอร์ (rotor) จะถูกสร้างให้มีรูปร่างให้สัมผัสกันตลอดระหว่างตัวเรือนมาตรวัดและระหว่างตัวโรเตอร์ (rotor) ด้วยกันเอง เมื่อก๊าซไหลเข้าห้อง (chamber) ก๊าซจะถูกดักโดยโรเตอร์ (rotator) และดักก๊าซให้อยู่ระหว่างตัวโรเตอร์ (rotor) ด้วยกันและโรเตอร์ (rotor) กับเรือนมาตรวัด จากนั้นจะถูกดันออกไปทางด้านทางออก ปริมาณการไหลสามารถหาได้จากจำนวนรอบที่มาตรวัดหมุนไป (ดูรูป 17)



รูป 17 มาตรวัดชนิด Lobed-Impeller

มาตรวัดมวล (True-mass flowmeters)

mass flowmeter มีอีกชื่อหนึ่งว่า “transverse-momentum meter” ทั้งนี้ก็เพราะว่ามาตรวัดนี้มีหลักการทำงาน รักษาความเร็วของของไหลในแนวตั้งฉากให้มีค่าคงที่โดยแรงที่ใช้เพื่อเร่งหรือหน่วงการไหลของเหลว (fluid stream) มีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม (the rate of change of momentum) ในทิศทางตามขวางการไหลซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการมวลของการไหล (the mass rate of flow)

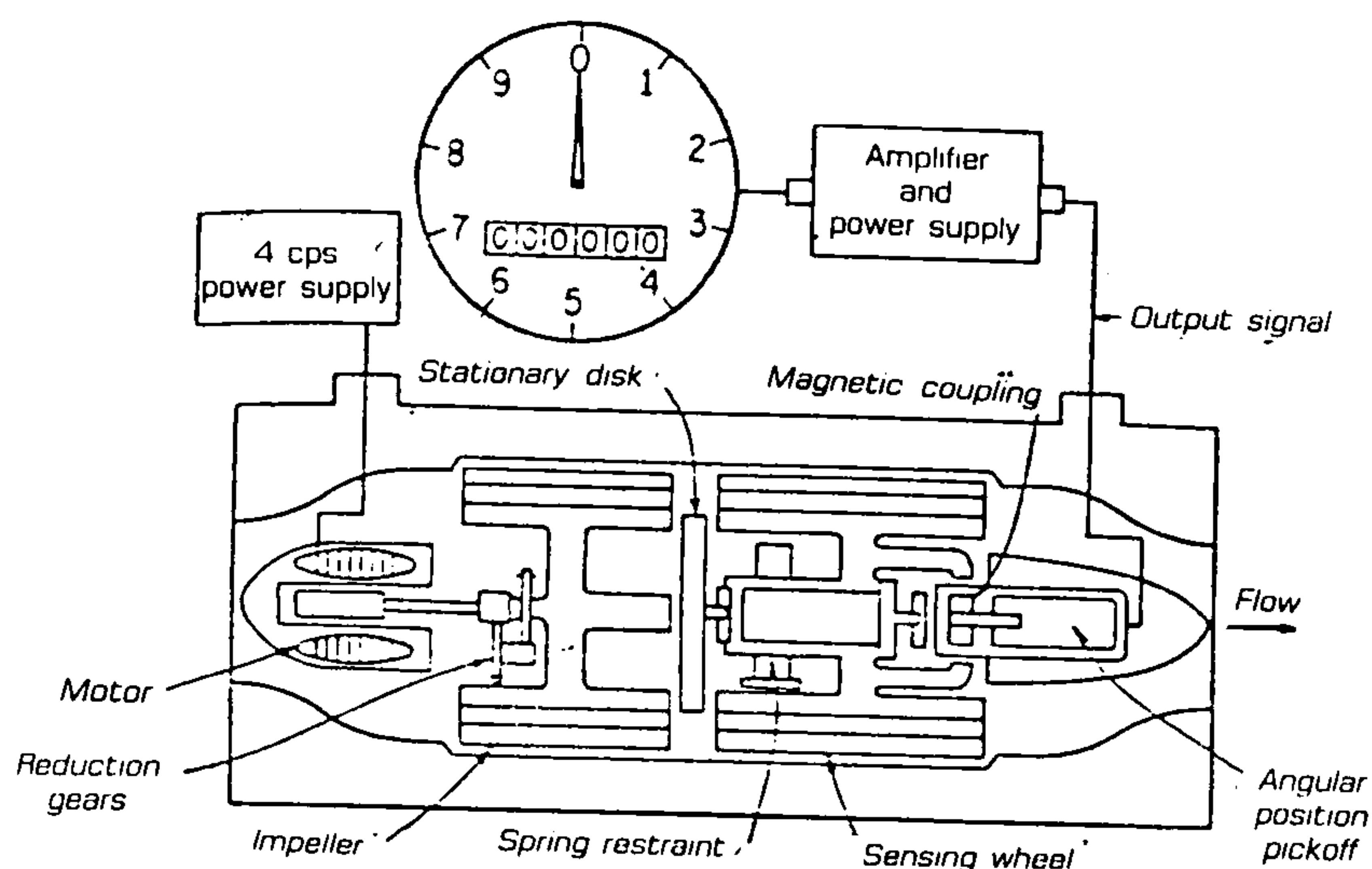
ข้อดีของ True-mass flowmeters

การไหลมวล (mass flow) จะให้ค่าโดยตรง ไม่ได้รับผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของ ความหนาแน่น, อุณหภูมิ, ความดัน, ความหนืด และ ความสามารถยุบตัว (compressibility) แสดงค่าเป็น อัตรา (rate) และ ค่าการไหลรวม (table flow)

ข้อเสียของ True-mass flowmeters

มาตรวัดมีราคาแพง , จำเป็นต้องใช้ rotating seals ที่มีความแม่นยำสูงและตัวขับภายในมาตรวัดที่มีความเร็วคงที่ (constant-speed drive)

Axial flowmeter ประกอบด้วยใบพัด (impeller) และล้อวัดแรงบิด (torque sensing wheel) โดยที่ใบพัด (impeller) จะถูกขับให้หมุนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ (constant angular velocity) จากนั้นล้อวัดแรงบิด (Torque wheel) จะทำหน้าที่ตรวจวัดว่าโมเมนต์เชิงมุมทั้งหมด (total angular momentum) นำไปลบด้วยค่าโมเมนต์ดัม (momentum) ที่รู้ค่าอันเนื่องมาจากตัวใบพัด (impeller) เองซึ่งไปเพิ่มโมเมนต์ดัม (momentum) ให้กับของไหล จึงจำเป็นต้องนำค่านี้ไปลบออกเสียเพื่อจะได้ค่าโมเมนต์เชิงมุมทั้งหมดที่เป็นค่าเฉพาะของของไหลนั้นๆ ซึ่งค่าโมเมนต์เชิงมุมนี้จะก่อให้เกิดแรงบิด (torque) เป็นสัดส่วนต่ออัตราการไหลของมวล (mass rate of flow) สำหรับตัวล้อวัดแรงบิด (torque-sensing wheel) ติดอยู่กับสปริง (spring-retrained) จะเชื่อมต่อเข้ากับตัว angular position pick-off ด้วยคัปปลิงแม่เหล็ก (magnetic coupling) (ดูรูป 18)

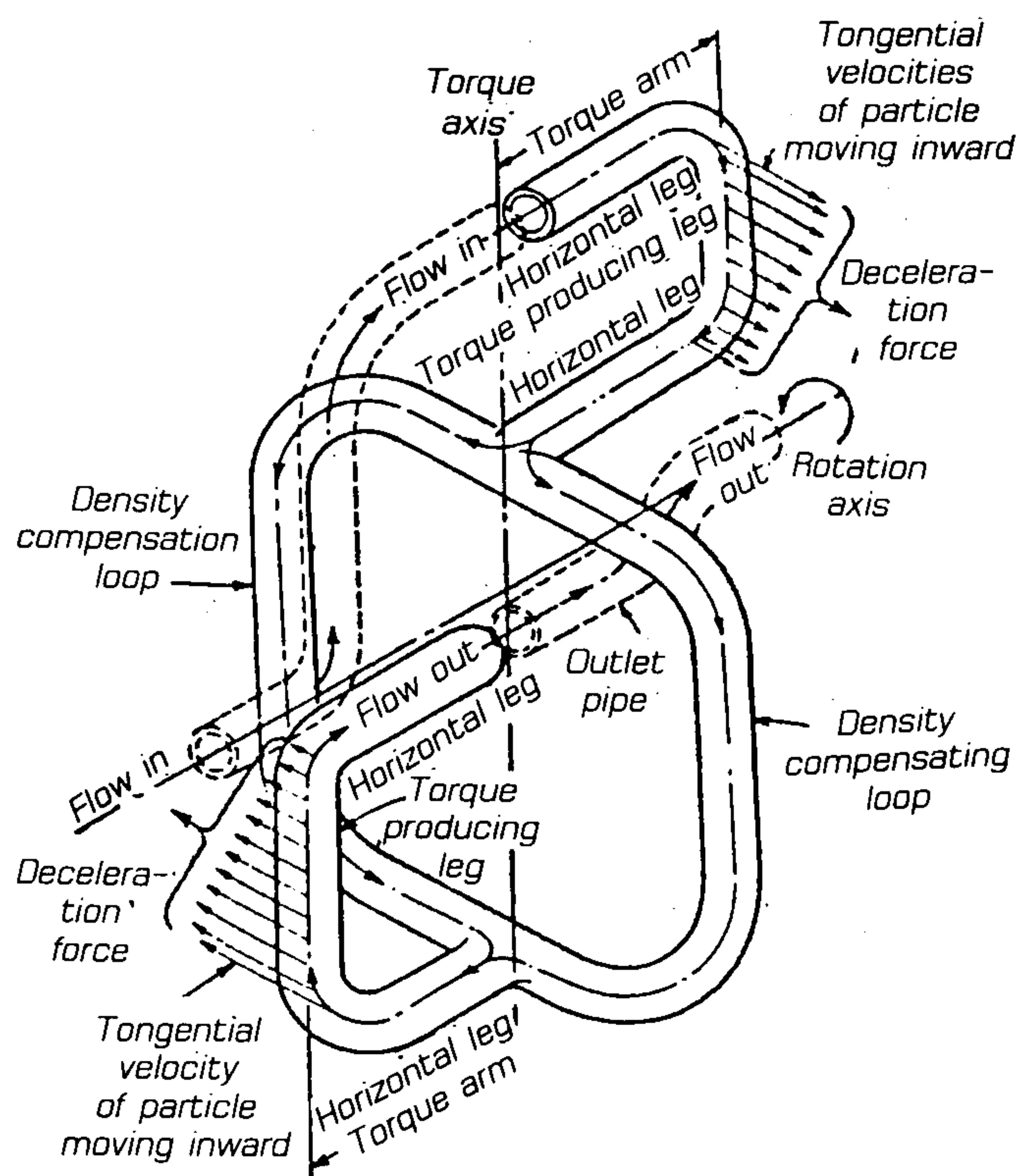


AXIAL MASS FLOWMETER, General Electric Co

รูป 18 มาตรวัดชนิด Axial Mass Flowmeter

สำหรับ Axial flowmeter รุ่นต่อมามีใบพัด (impeller) เพิ่มขึ้นอีก 1 ตัวจึงมีใบพัด (impeller) เป็น 2 ตัว และถูกขับให้หมุนในทิศทางตรงข้ามกัน ในระหว่างตัวใบพัด (impeller) ทั้ง 2 จะมีตัวล้อวัดแรงบิด (torque-sensing wheel) โดยที่ตัวล้อวัดแรงบิด (sensing wheel) ยึดไว้ด้วย electromechanical แทนที่จะเป็นแบบกลไก (mechanical) ซึ่งใช้สปริงเหมือนอย่างรุ่นก่อน ด้วยเหตุนี้ทำให้สามารถวัดการไหลได้ทั้ง 2 ทิศทางด้วยวิธีการดังกล่าวนี้ แต่จะพบว่ามีความดันตก (pressure drop) มากกว่ารุ่นก่อนทั้งนี้ก็เพราะจากการเพิ่มจำนวนของใบพัด (impeller) ตัวที่ 2

Gyroscopic type ทำด้วยท่อ (tubing) คัดให้เป็นรูปวงกลมหรือรูปสี่เหลี่ยม จากนั้นถูกทำให้หมุนรอบแกน X ขณะที่ของไหลไหลผ่านท่อดังกล่าวเหมือนกับเครื่อง gyro เมื่อท่อดังกล่าวหมุนจะเกิดโมเมนต์กระทำรอบแกนตั้งฉากกับทั้งแกน X และแกน Y โมเมนต์ที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นฟังก์ชันของทั้งการหมุนเชิงมุม (angular rotation) และอัตราการไหลมวล (mass flow-rate) เราพอจัด gyroscopic meter เป็น vibrating gyro เพราะการแสดงค่าอัตราการไหลได้จากการขยายสัญญาณผลการสั่นสะเทือน (resultant vibration) ที่เกิดขึ้น (ดูรูป 19)



รูป 19 มาตรวัดชนิด Gyroscopic

ข้อดีของ gyroscopic type

ขณะทำการวัดไม่มีสิ่งกีดขวางการไหลของของเหลว , สามารถให้ค่าอัตราการไหล (mass flow-rate) ได้โดยตรงอีกทั้งง่ายต่อการออกแบบ . ที่สำคัญความดันตก (pressure drop) ภายในระบบมีค่าต่ำ

ข้อเสียของ gyroscopic type

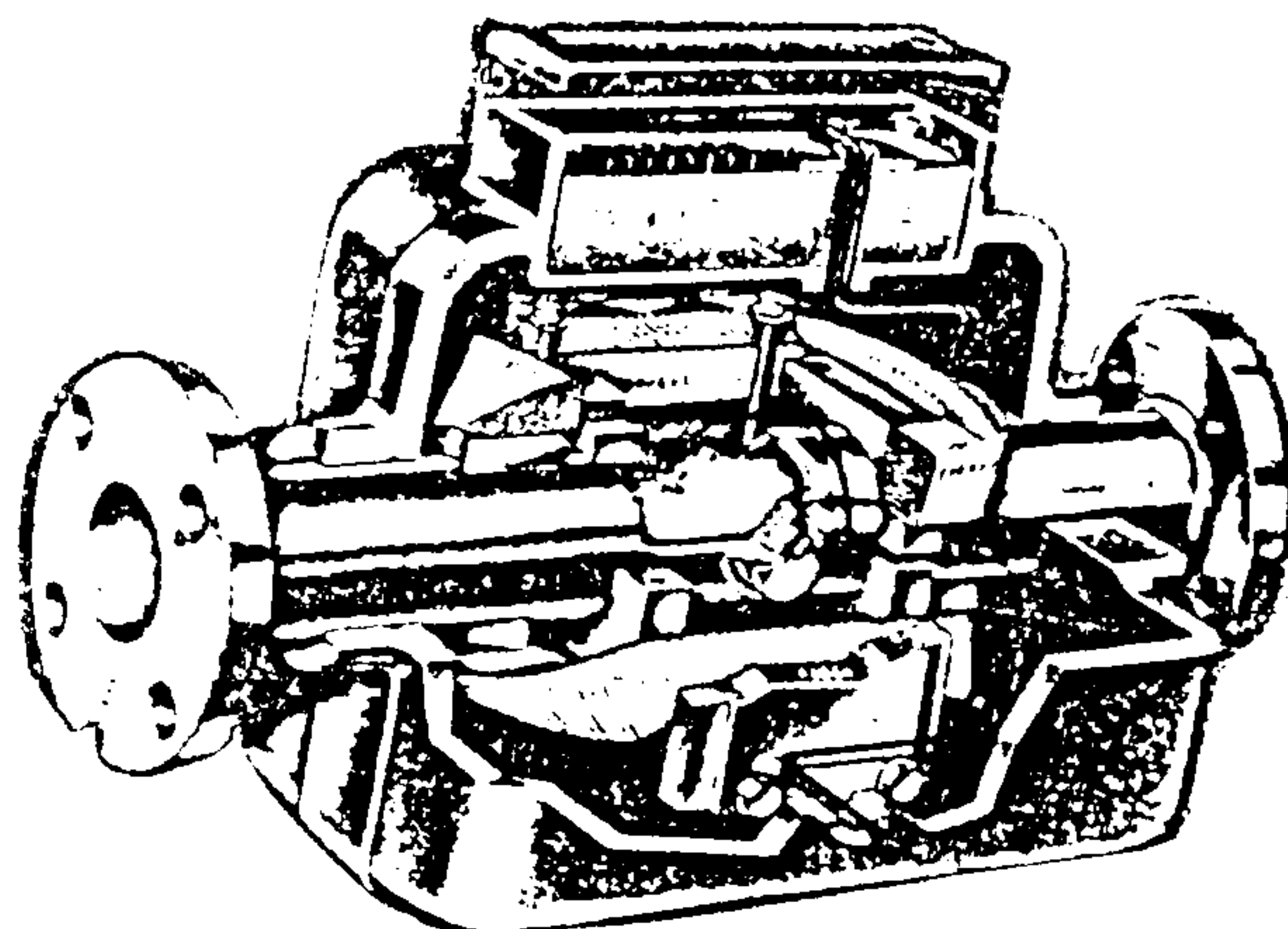
ต้องการพื้นที่ในแนวตั้งค่อนข้างมากเป็นพิเศษ , ไวต่อการไหลแบบปั่นป่วน นั่นคือหากการไหลในท่อเป็นแบบ turbulence ไหลเข้าระบบท่อที่ได้ตัดไว้ จะมีผลต่อการวัดอัตราการไหล , พบว่าในกรณีอัตราการไหลมีค่าต่ำๆ โมเมนต์และแรงบิด (torque) กับอัตราการไหลจะไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้น

Magnetic flowmeter

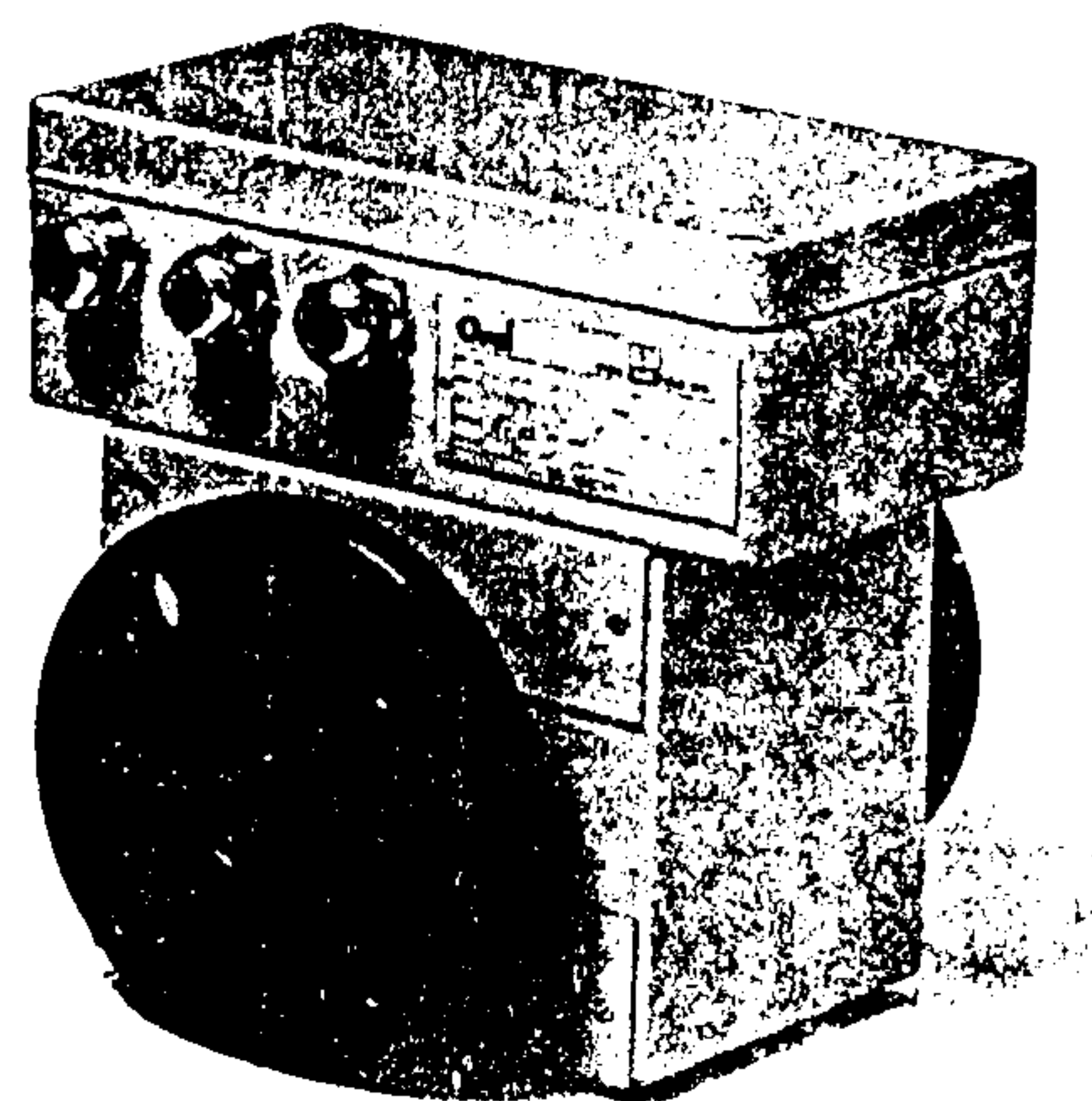
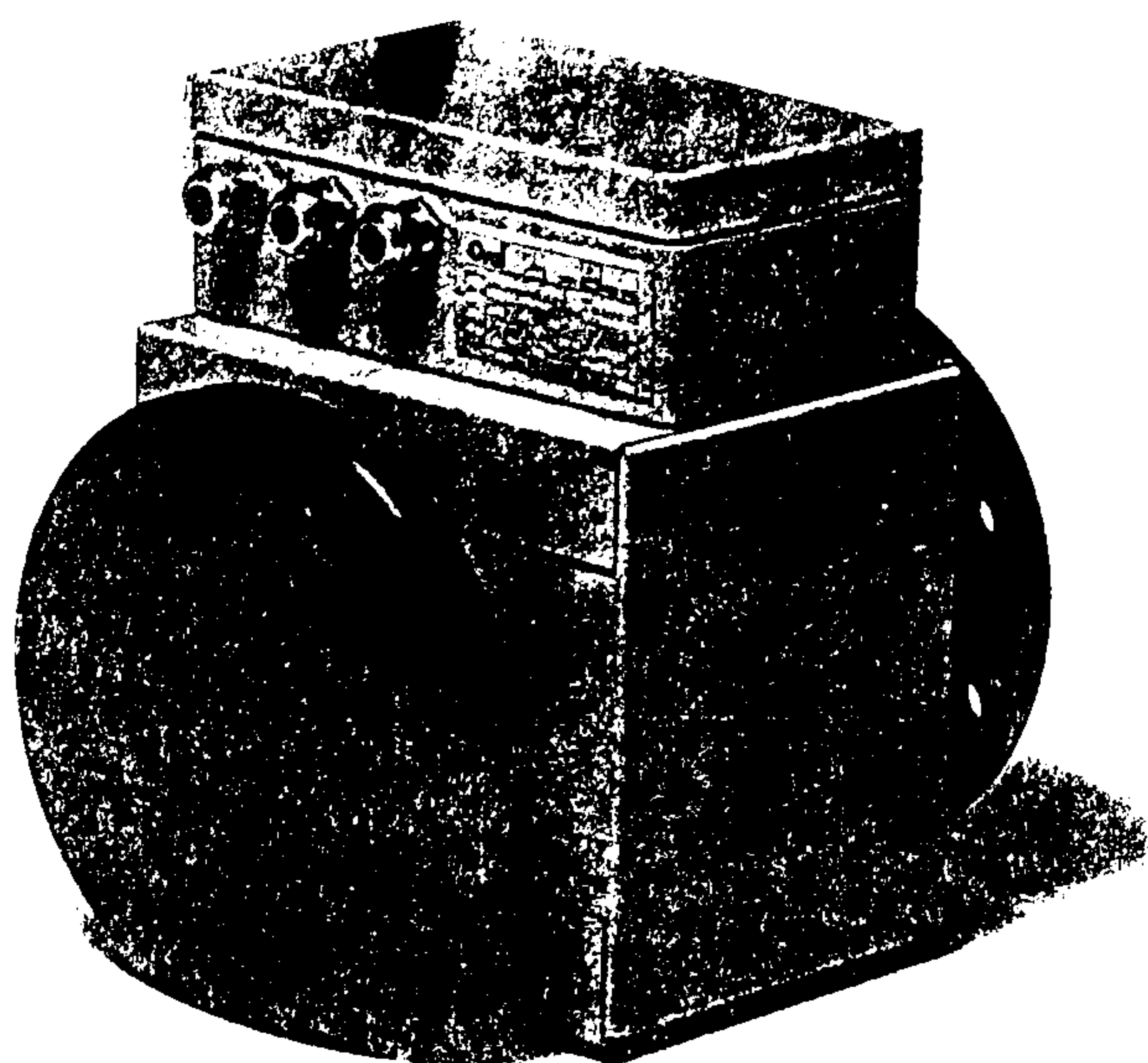
มาตรวัดอาศัยหลักการทำงานของ การเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าแม่เหล็ก (electromagnetic induction) ตามกฎของ Faraday ตัว magnetic flowmeter ประกอบด้วยชิ้นส่วนของท่อตรง, คอลย์กระแสไฟฟ้า (electric coil) ซึ่งจะผลิตสนามแม่เหล็กให้เกิดในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหลและมีขั้วแท่ง electrodes ติดตั้งให้ตั้งฉากทั้งกับการไหลและทิศทางสนามแม่เหล็ก เมื่อ

ของไหลไหลผ่านท่อ ค่าความต่างศักย์ (voltage) จะถูกผลิตออกมาเป็นสัดส่วนกับความเร็วเฉลี่ย (average velocity) ของเหลว, ความเข้มของสนามแม่เหล็ก (strength of magnetic field) และระยะห่างระหว่างแท่ง electrodes แต่เนื่องจากภายในมาตรวัดนั้นสนามแม่เหล็กและระยะระหว่างแท่ง electrodes จะมีค่าคงที่ ดังนั้นค่าความต่างศักย์ที่เหนี่ยวนำเกิดขึ้นจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วการไหล (flow velocity) (ดูรูป 20 . 22)

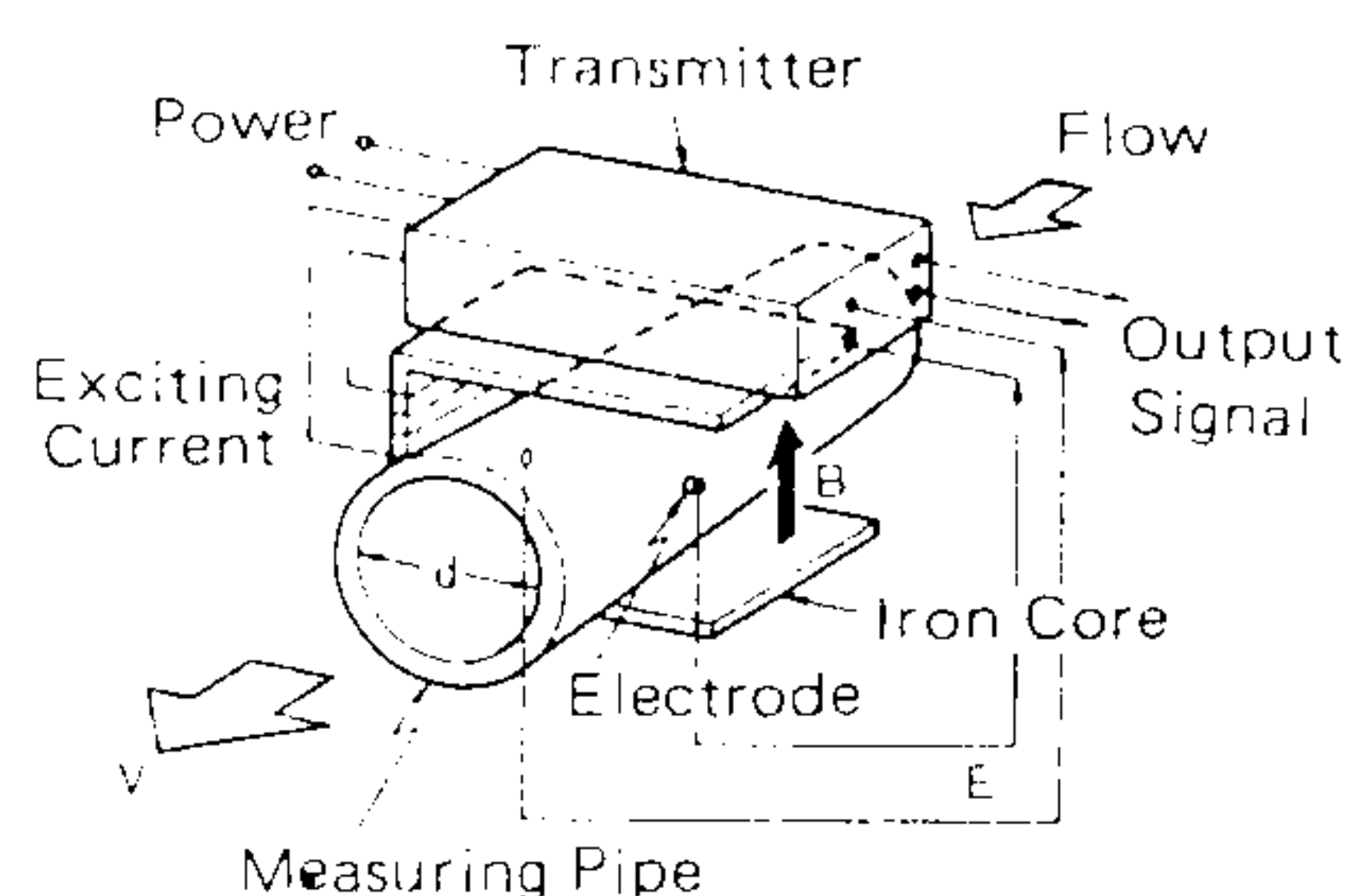
รูป 20 มาตรวัดชนิด Magnetic



MAGNETIC METER, Fischer & Porter Co.



PRINCIPLE OF OPERATION



The measuring principle is based on Faraday's law of induction. An electrically conductive liquid flowing through a magnetic field induces a voltage, which is perpendicular to this field and to the direction of flow. This voltage, in proportion to the average flow velocity, is detected by a pair of electrodes located perpendicular to the flow and to the direction of the field, and is used to provide flowrate information.

Volumetric flowrate can be measured by amplifying it in the converter/

transmitter. The relationship between the induced voltage measured and flow is:

$$E = BdV$$

where E: induced voltage (V), d: inside diameter (m), B: magnetic flux density (T), and $\bar{V}$: average flow velocity of liquid (m/s).

The volumetric rate of flow Q (m³/s) is therefore represented by the following expression:

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{E}{B} \cdot d$$

รูป 22 มาตรวัดชนิด Magnetic

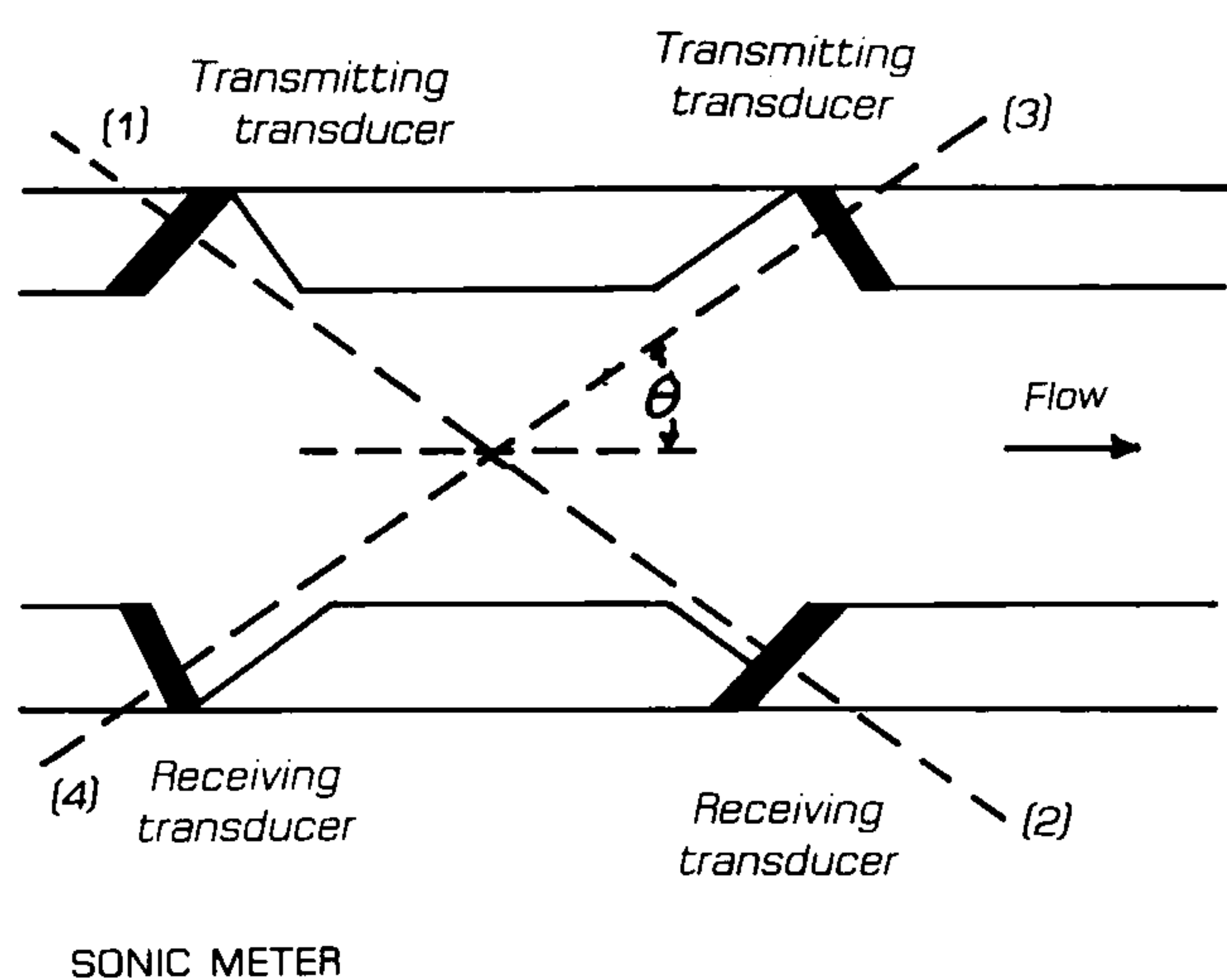
ข้อดีของ *magnetic flowmeter*

มีความไวและแม่นยำสูงในการวัด , สามารถวัดอัตราการไหลได้ทั้ง 2 ทิศทาง อีกทั้งวัดค่าช่วงอัตราการไหลได้ช่วงกว้าง , ค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความเร็วการไหล , ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบมีน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้โดยเพียงถือว่าเป็นเพียงท่อตรงท่อนิ่งเท่านั้น หากคิดความสูญเสียเสียดทาน (friction loss) , สามารถวัดการไหลได้หลายชนิดไม่ว่าจะสะอาดหรือสกปรก , การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความหนืดมีผลเล็กน้อยต่อความแม่นยำการวัด

ข้อเสียของ *magnetic flowmeter*

มาตรวัดชนิดนี้ราคาค่อนข้างแพง , ของเหลวที่จะถูกวัดจะต้องเป็นสารนำไฟฟ้า (conductive material) , สามารถใช้งานได้กับอุณหภูมิของเหลวสูงสุดประมาณ 400°F (200°C) ที่อุณหภูมิบรรยากาศไม่เกิน 135°F (60°C)

Sonic velocity flowmeter คล้ายกับ magnetic flowmeter นั่นคือจะไม่มีชิ้นส่วนใดในการวัดขวางทางการไหล Sonic velocity flowmeter ประกอบด้วยแหล่งกำเนิด ultrasonic (ultrasonic transmitter) 2 ตัว และตัวรับสัญญาณ (receivers) 2 ตัวทำการติดตั้งคู่หนึ่ง (ultrasonic transmitter และ receiver) อยู่ในทิศทางต้านกับทิศทางการไหล (หรือ upstream) และให้อีกคู่หนึ่งอยู่ในทิศทางการไหล (หรือ downstream) โดย transmitter ทั้ง 2 ตัวจะปล่อยคลื่นอุลตราโซนิก (ultrasonic) ด้วยที่ความถี่เท่ากัน จะพบว่าค่าความต่างเฟสระหว่างเฟส (phase) ของคลื่นทั้งสองที่ปล่อยออกไปแล้วเกิดขึ้นที่ตัวรับสัญญาณ (receiver) ทั้ง 2 คู่ จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วการไหล (flow velocity) (ดูรูป 21)



รูป 21 มาตรวัดชนิด Sonic Velocity

ข้อดีของ *sonic velocity flowmeter*

เพราะเป็นมาตรวัดมีรูปร่างเป็นท่อตรง ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้ , การวัดปริมาณจะไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นแต่อย่างใด , ค่าที่อ่านได้สามารถทำให้เป็นแบบอนาล็อก (analog) หรือแบบดิจิทัล (digital) ก็ได้ , สามารถนำไปติดตั้งให้ทำงานไม่จำกัดตำแหน่งติดตั้ง

ข้อเสียของ sonic velocity flowmeter

มาตรวัดมีราคาแพง อีกทั้งมีข้อจำกัดในเรื่องอุณหภูมิการใช้งานซึ่งสามารถใช้งานได้เฉพาะในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -65°F (-54°C) ถึง 165°F (74°C) , และหากของเหลวมีความดันสูงก็ไม่สามารถทำการวัดได้

Thermal meters ใช้วัดก๊าซ มาตรวัดชนิดนี้มีหลักการทำงานว่าเมื่อปล่อยพลังงานจากแหล่งพลังงานภายนอก ความร้อนจะถูกดูดซับเข้าไปในการไหลโดยเป็นส่วนหนึ่งกับอัตราการไหล (rate of flow) ภายในห้องวัดความร้อน (thermal flow chamber) ประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิล (noble-metal thermopile) สำหรับวัดอุณหภูมิ , ความร้อนจะถูกปล่อยจากข้อต่อร้อน (hot junctions) ซึ่งถูกทำให้ร้อนโดยใช้กระแสไฟกระแสสลับ ส่วนข้อต่อเย็น (cold junctions) จะถูกป้องกันไม่ให้ความร้อนจากภายนอก อีกทั้งเป็นส่วนที่ทำจากวัสดุที่มีความต้านทาน (resistance) ต่ำกว่านั้นหมายถึงมีความสามารถนำความร้อน (heat conductivity) ได้ดีกว่า จะทำหน้าที่ตรวจจับความร้อนภายในการไหล (flow stream) เมื่อของไหลไหลผ่านห้องวัดความร้อนจะนำพาความร้อนและพยายามทำให้ข้อต่อร้อน (hot junction) กับข้อต่อเย็น (cold junction) มีอุณหภูมิเท่ากัน ด้วยเหตุนี้จะมีผลให้ไปลดค่าความต่างศักย์ที่ผลิตออกมาจากเทอร์โมคัปเปิล (thermopile) จะเป็นตัววัดความเร็วของการไหล เพราะฉะนั้นเมื่อการไหลเพิ่มขึ้นค่าความต่างศักย์ (voltage) จะลดลงเป็นลักษณะเส้นโค้งที่ลู่อเข้าหาค่าศูนย์ (asymptote) และจะถูกแปลงค่าให้เป็นเส้นตรงได้โดยสเกลแบบล็อก (logarithmic scale)

ข้อดีของ thermal meters

เนื่องจากค่าที่อ่านได้จะถูกแปลงให้เป็นความเชิงเส้นด้วยสเกลแบบล็อก (logarithmic scale) จึงทำให้วัดการไหลได้มีค่าช่วงกว้างมาก, มีความดันสูญเสียต่ำ , ตอบสนองในการวัดอย่างรวดเร็ว , ชิ้นส่วนที่ใช้ในการวัด (flow elements) ราคาค่อนข้างถูก

ข้อเสียของ thermal meters

ใช้งานได้เฉพาะกับก๊าซเท่านั้น , ชิ้นส่วนในการวัดจำเป็นต้องได้รับการป้องกันจากสิ่งแปลกปลอมด้วยการใช้ตะแกรงที่มีความถี่ของช่องตาข่ายสูงๆ

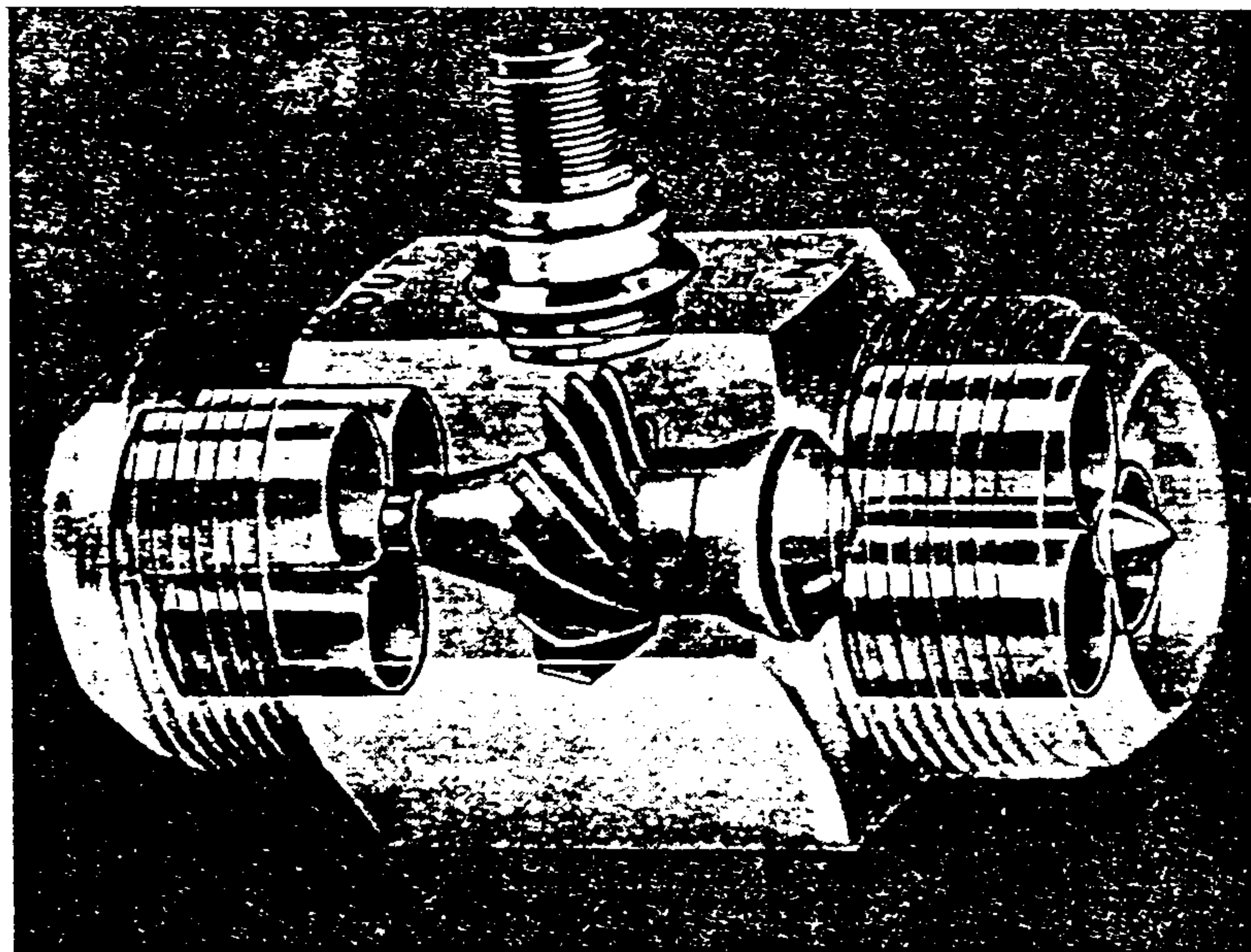
Turbine flowmeter ประกอบด้วยวงล้อเทอร์ไบน์ (turbine wheel) ซึ่งจะหมุนด้วยความเร็วเป็นสัดส่วนกับความเร็วของเหลว (fluid velocity) ภายในวงล้อเทอร์ไบน์ (turbine wheel) จะมีแม่เหล็กถาวรตัวเล็กๆซึ่งมีขั้วสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับแกนการหมุนของวงล้อเทอร์ไบน์ (turbine wheel) เมื่อล้อ (wheel) หมุนจะก่อให้เกิดพัลส์ (pulse คือ กระแสไฟเพิ่มขึ้นช่วงหนึ่ง) เกิดขึ้นภายในขดลวด (coil) ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในตัวเรือนมาตรวัด (สำหรับเทอร์ไบน์มิเตอร์ชนิดต่อมาจะใช้ปลายของใบพัดของเทอร์ไบน์ (turbine blade tip) เป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กโทรนิคพัลส์ (electric pulses) ความถี่ของสัญญาณพัลส์ (frequency of the pulsating signal) จะเป็นตัวให้ค่าของอัตราการไหล ณ.ขณะเวลาใดๆ และเมื่อทำการรวมจำนวนของพัลส์ (pulse) ที่เกิดขึ้นทั้งหมดก็จะเป็นค่าแสดงการไหลรวม

ข้อดีของ turbine meter

สามารถใช้งานภายในระบบความดันสูงๆ , ให้ผลการวัดที่แม่นยำ ,ตอบสนองต่อการวัดค่าได้
ค่อนข้างรวดเร็ว

ข้อเสียของ turbine meter

หากใช้กับของไหลซึ่งมีความระคายเคือง (abrasive media) จะทำให้อายุการใช้งานของแบริ่ง
(bearing) สั้นลง , การไหลแบบจังหวะ (pulsing flow) และการกระแทก (shock) จะมีผลต่อการสอบ
เทียบ (calibrate) มาตรวัด ซึ่งต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษ

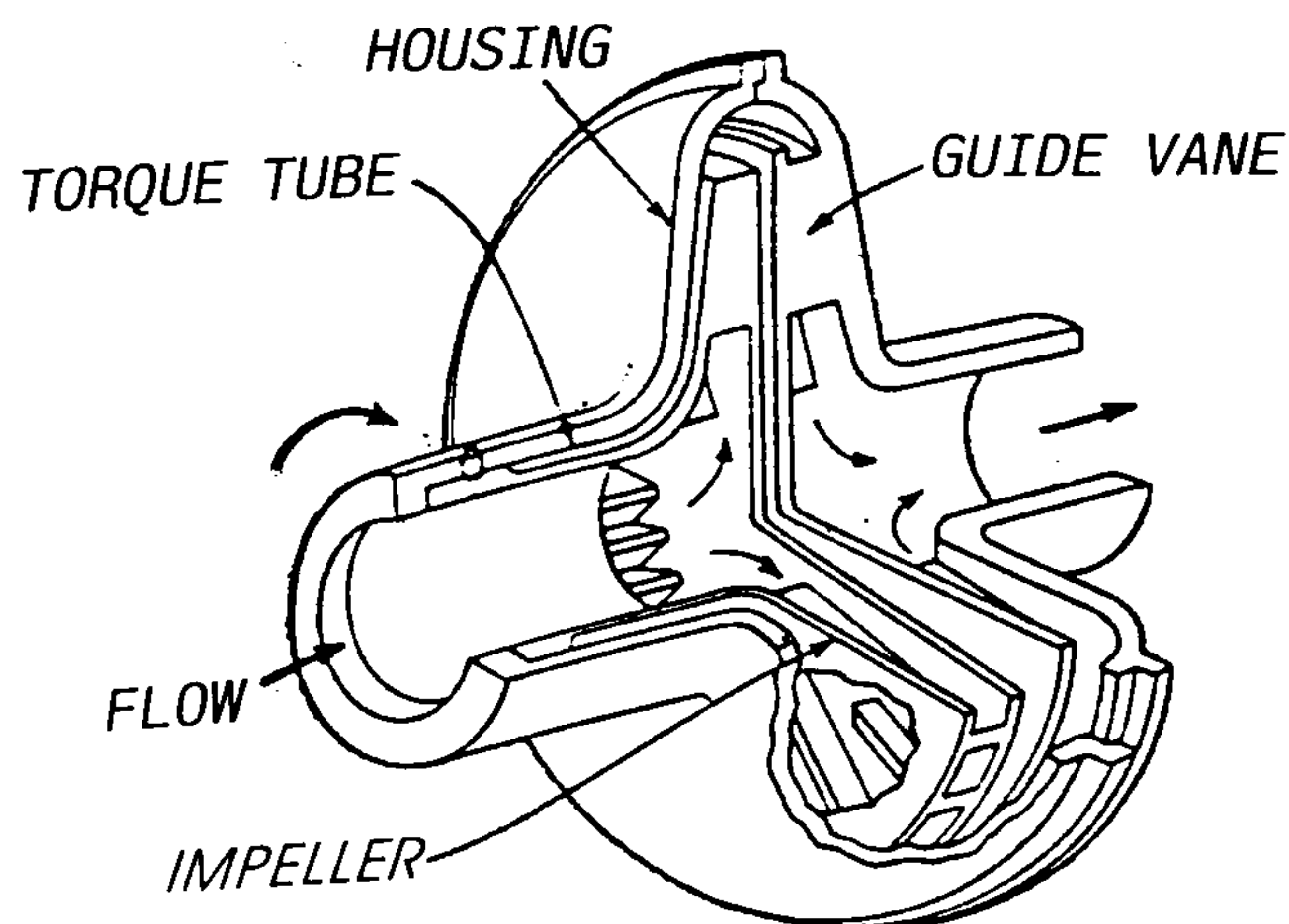


TURBINE (Pottermeter), Potter Aeronautical Corp

รูป 23 มาตรวัดชนิด Turbine

SPECIAL-INTEREST TYPE

Radial flowmeter หรือ coriolis type เป็นมาตรวัดการไหลมวล (mass flowmeter) มีลักษณะคล้ายกับปั๊มเหวี่ยง (centrifugal pump) คือของเหลวจะไหลเข้าตัวมาตรวัดทางตรงใจกลาง (hub) และถูกขับออกไปจากแนวแกนโดย vaned impeller เมื่อของเหลวเคลื่อนตัวออกไปจากใจกลางของใบพัด (impeller) ของการหมุน (impeller's center of rotation) ทำให้ความเร็วในแนวสัมผัส (tangential velocity) ของของเหลวเพิ่มขึ้น การสะท้อนการตกกระทบเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Coriolis acceleration ดังนั้นเมื่อใบพัด (impeller) หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ (rpm) ความเร่งก็จะมีค่าคงที่ และแรงที่ต้องการทำให้ของไหลไหลด้วยความเร่งในแนวสัมผัสก็จะเป็นสัดส่วนกับอัตราไหลมวล (mass flow-rate) (ดูรูป 24)



รูป 24 Radial Flowmeter

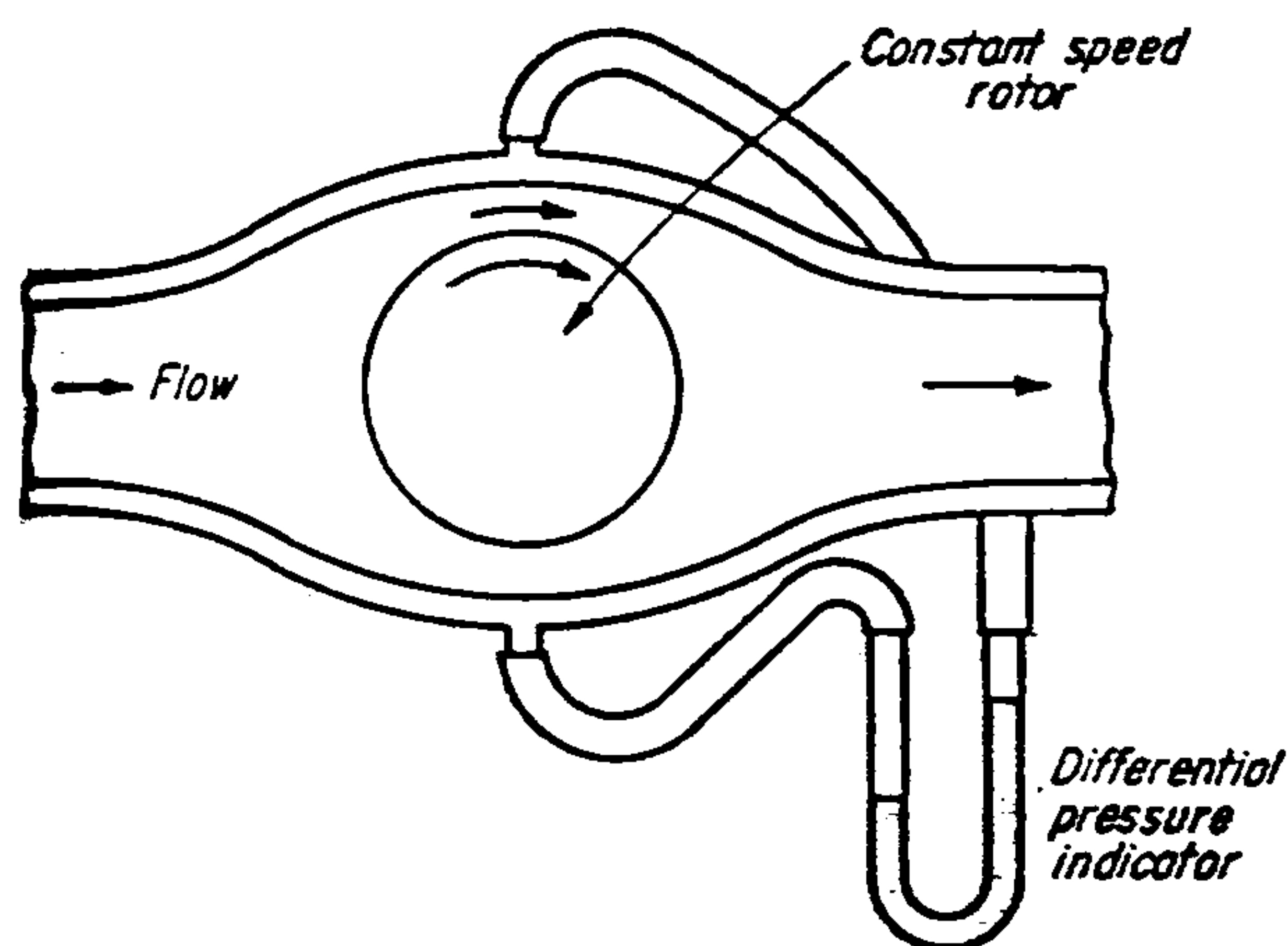
ข้อดีของ Radial flowmeter

ใช้งานได้กับก๊าซ, ของเหลว, foams, และของเหลวแขวนลอย (slurries) มาตรวัดจะเพิ่มความดันในระบบให้สูงขึ้นแทนที่จะก่อให้เกิดความดันสูญเสีย, ตอบสนองในการวัดรวดเร็วและเป็นเชิงเส้น, สามารถปรับแต่งให้ใช้ร่วมกับตัวบันทึกค่า (recorder) หรือ ตัวแสดงค่า (indicator) พร้อมทั้งอุปกรณ์ควบคุมอื่นๆ

ข้อเสียของ Radial flowmeter

จำเป็นต้องใช้การขับเคลื่อนชิ้นส่วนในการวัดให้มีความเร็วคงที่และละเอียดแม่นยำสูง, ต้องหมั่นดูแลตรวจสอบและบำรุงรักษาอย่างใกล้ชิด, ต้องใช้ซีลกันรั่ว (rotating seals) ที่มีประสิทธิภาพ

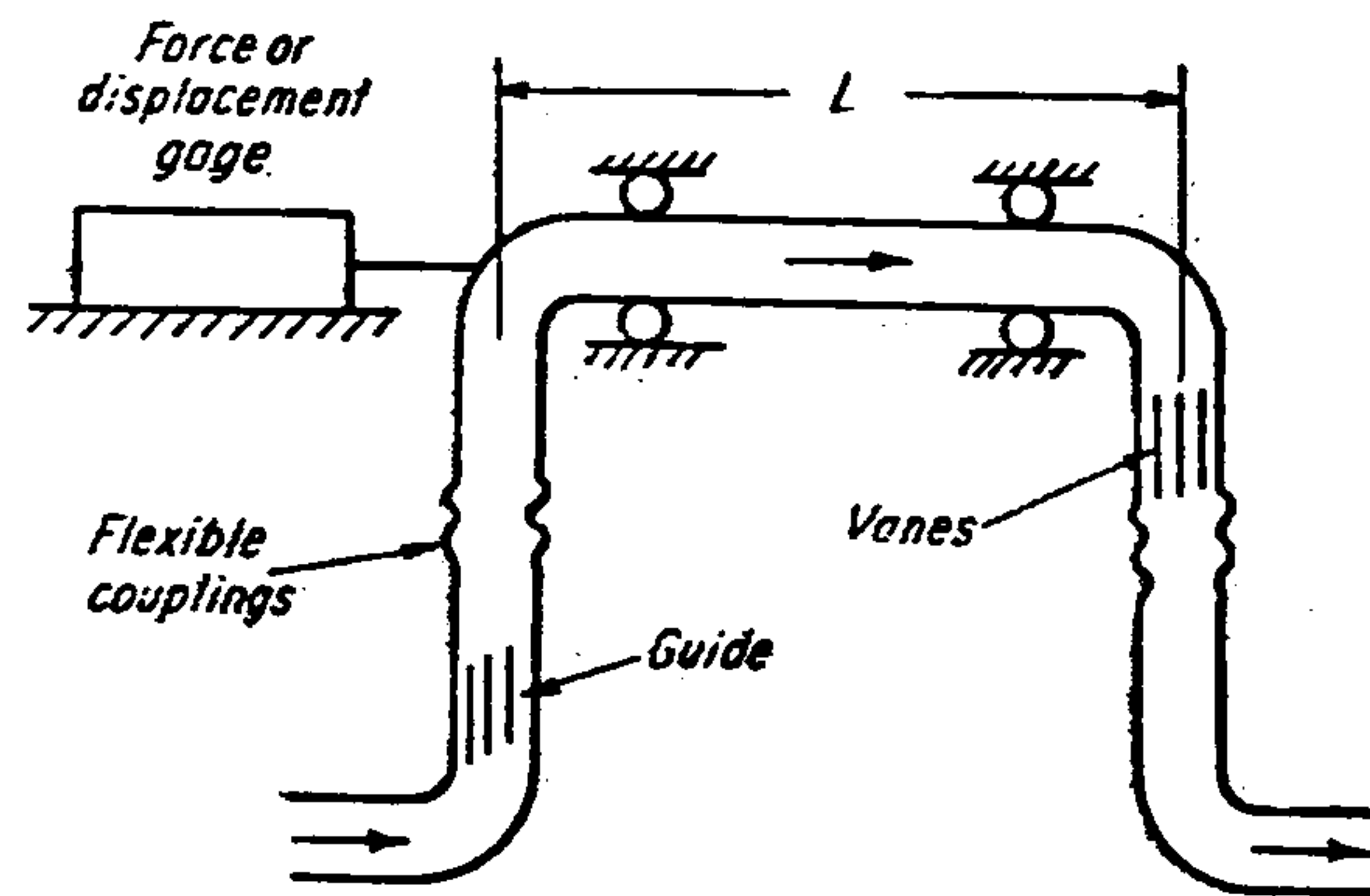
Magnus-effect flowmeter แบ่งของไหลออกเป็น 2 สาย ให้ไหลผ่านรอบๆ rotating cylinder ดัง (รูป 25) โดยที่การไหลส่วนบนจะมีแนวโน้มไหลได้มากกว่าทั้งนี้เพราะไหลไปในทิศทางเดียวกับการหมุนของพื้นผิวของ rotating cylinder แต่การไหลในส่วนล่างก็มีแนวโน้มว่าจะถูกหน่วงเอาไว้เพราะไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับการหมุนของผิวของ rotating cylinder ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้มีผลให้ไปเพิ่มความดันสถิตย (static pressure) ในส่วนด้านล่าง เนื่องจากของไหลไหลด้วยความเร็วต่ำลง แต่จะปลดความดันสถิตยในส่วนด้านบนเนื่องจากของไหลไหลด้วยความเร็วเพิ่มสูงขึ้น ผลต่างความดันที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการไหลมวล (mass flow) หากว่าข้อสมมุติฐานที่ว่า การไหลในทั้งช่องไหลส่วนบนและส่วนล่างเป็นการไหลเฉพาะแบบ potential type (ตามหลักของเส้นสายการไหล (flowline)) และความเร็วการไหลวน (effective circulating flow velocity) เนื่องจากการหมุนด้วยความเร็วคงที่ของ cylinder มีค่าคงที่ไม่ว่าจะเป็นของเหลวใดๆ จะได้ว่า การไหลทั้งหมด (total flow) จะเหมือนกันไม่ว่า cylinder จะหยุดอยู่กับที่หรือกำลังหมุนอยู่ (ดูรูป 25) แต่อย่างไรก็ตามข้อสมมุติฐานดังกล่าวนี้บ่อยครั้งที่ไม่เป็นจริงและการสอบเทียบ (calibration) จึงมีความจำเป็นและต้องระมัดระวัง



รูป 25 Magnus-Effect Flowmeter

Flow-acceleration meter การหาค่าอัตราการมวลของการไหล (mass rate of flow) ได้จากการหาค่าแรงทั้งหมดที่ต้องการเพื่อเร่งให้ของเหลวที่อยู่ภายในท่อ (conduit) ซึ่งมีความยาวคงที่ค่าหนึ่ง และใช้ข้อต่ออ่อน (flexible coupling) แยกท่อดังกล่าวออกจากระบบเพื่อที่แรงในแนวระดับใดๆกระทำต่อท่อนั้น จะถูกหาค่าด้วยการวัดการเคลื่อนที่ในแนวระดับของท่อดังกล่าว โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าของเหลว

เป็นของไหลชนิดไม่ยุบตัว (incompressible fluid) และเป็นของเหลวที่มีเนื้อสารเดียวกันตลอด (homogeneous) ความแม่นยำในการวัดจึงขึ้นอยู่กับความแม่นยำของตัววัดค่าการเคลื่อนที่ (integrator) เพียงตัวเดียวเท่านั้น (ดูรูป 26)



รูป 26 Flow-Acceleration Meter

SPECIAL SITUATIONS REQUIRING USE OF METERS OTHER THAN CONCENTRIC ORIFICES*

Situations	Flow Nozzle	Venturi Tube	Area Meter (Rotameter)	Eccentric Orifice	Magnetic Meter
Small installations 1½" line size or less			X		
Highly viscous fluids	X		X		X
High pumping costs		X			X
Fluid contains large amounts of solids	X (in vertical line with flow downward)	X			X
Fluid contains small amounts of solids or fluid is vapor with condensate	X (in vertical line with flow downward)			X (opening at bottom)	
Liquid with vapor or air				X (opening at top)	X
High velocity steam	X				

* X indicates suggested meter.

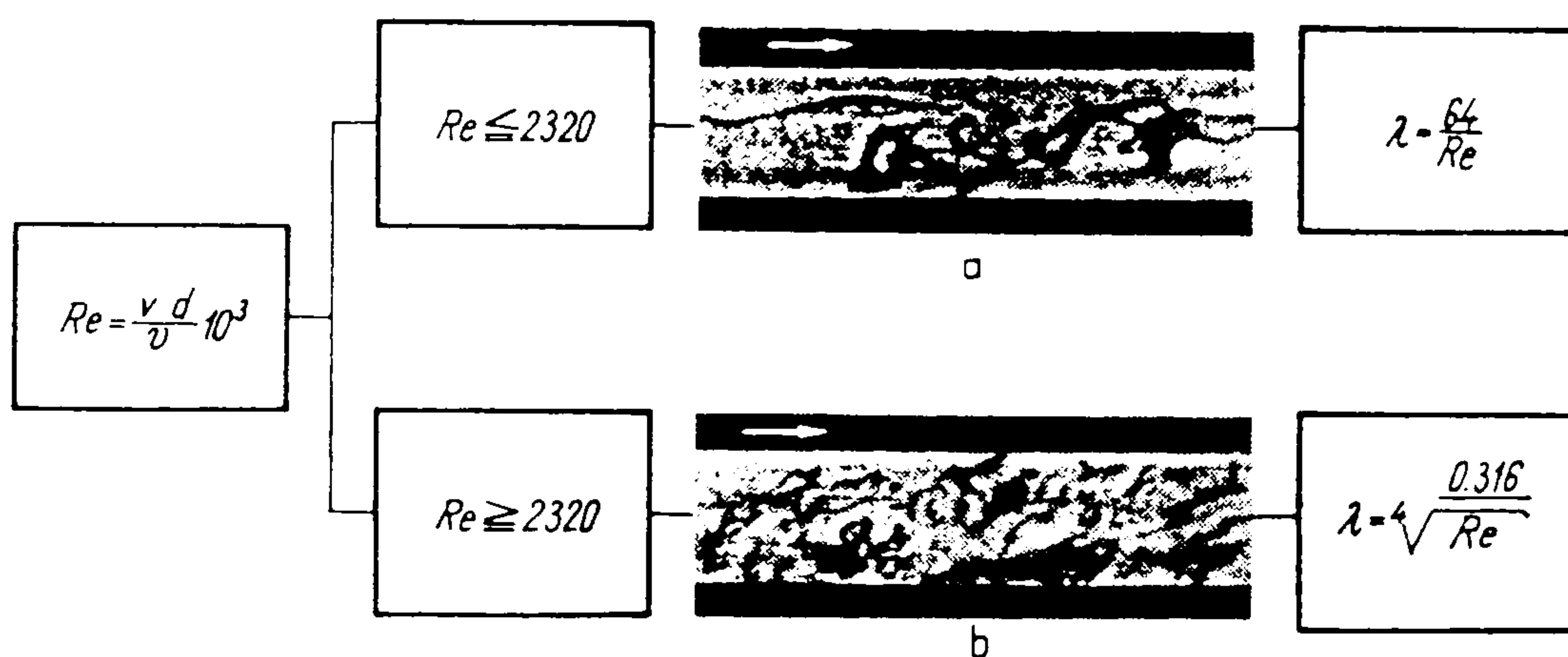
ตาราง 2 ข้อเสนอแนะการเลือกมาตรวัดนอกเหนือจากมาตรวัดชนิด Concentric Orifices

ทฤษฎีเทอร์ไบน์มิเตอร์ (TURBINE METER THEORY)

ทฤษฎีเทอร์ไบน์มิเตอร์จริงๆแล้วค่อนข้างซับซ้อน ในที่นี้เราจะกล่าวเพียงบางหัวข้อหลักๆของกลศาสตร์ของไหล (fluid mechanics) และการไหลภายในท่อของของไหล

ทฤษฎีการไหลพื้นฐานภายในท่อ (Elementary Flow Theory for the Study of Pipes)

1. **สภาวะการไหล (Flow condition)** เป็นการศึกษาการเคลื่อนที่ของเหลวภายในท่อว่ามีรูปแบบการไหลอย่างไร ในสภาวะเงื่อนไขการไหลหนึ่งๆที่แน่นอนและผลที่ตามมา เมื่อพิจารณาการไหลแบบเฟสเดียว (single-phase flow) การไหลภายในท่อเราสามารถแบ่งออกได้ 3 รูปแบบ (ดูรูป 27)



Aspects of liquid flow through a straight pipe of circular cross-section :
a — Laminar flow ; b — turbulent flow.

รูป 27 รูปแบบการไหลภายในท่อตรง

a. แบบ Laminar Flow

b. แบบ Turbulent Flow

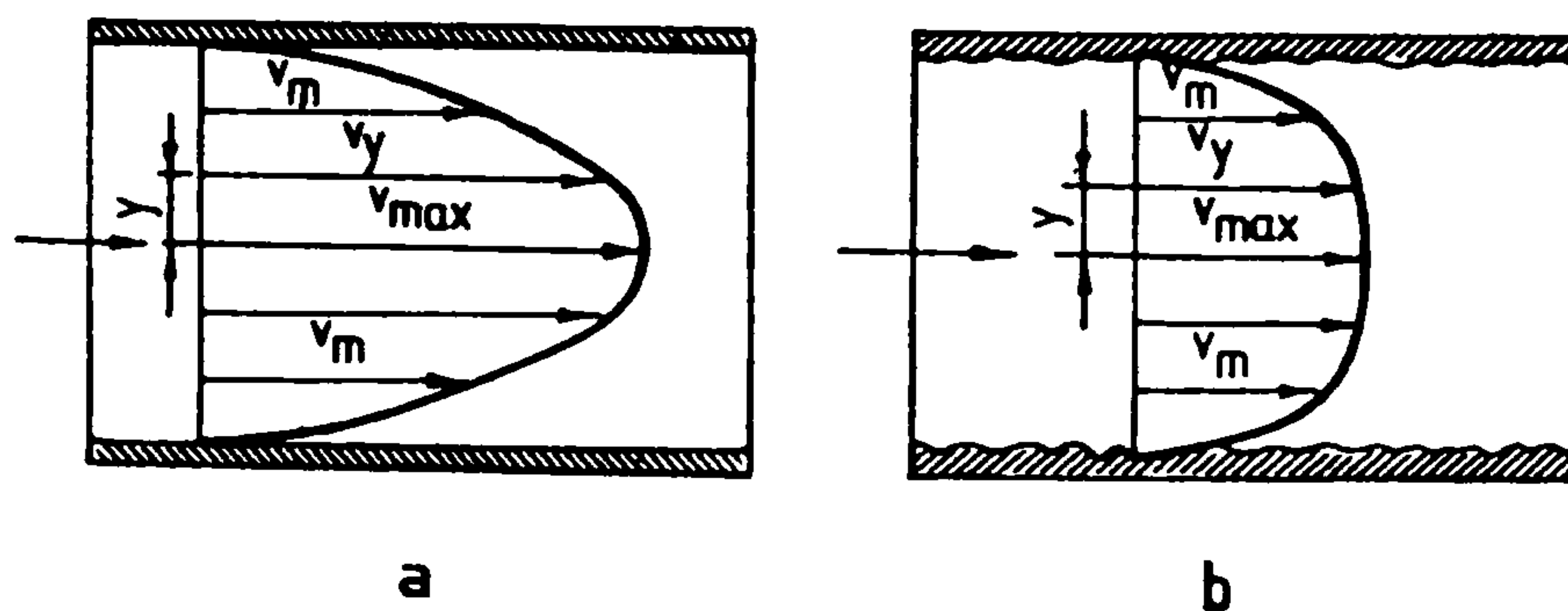
- **Laminar Flow** ที่ความเร็วต่ำๆ อนุภาคสีซึ่งถูกปล่อยเข้าไปในท่อจะแขวนลอยอยู่ตลอดเวลาการไหล นั้นแสดงให้เห็นว่าการไหลดำเนินไปอย่างปกติโดยที่การเคลื่อนที่ของอนุภาคสีมีการเคลื่อนที่ไปอย่างเป็นระเบียบเรียบร้อยขนานไปกับผนังท่อตลอดช่วงระยะเวลาการไหล อนุภาคสีแต่ละตัวมีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นของตัวเองแยกกันอิสระ ด้วยเหตุนี้ทิศทางการไหลและเส้นการไหล (stream line) ของความเร็วของเหลวจะขนานกันตลอดเวลาช่วงการไหล

- **Transient Flow** ถ้าหากความเร็วการไหลเพิ่มสูงขึ้นภายในท่อเดียวกัน เส้นทางเดินของเส้นการไหล (stream line) ที่มีอยู่เดิมเป็นเส้นตรงจะเริ่มมีการคดเคี้ยวและเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา สถานะการไหลเริ่มไม่คงที่แน่นอน

- **Turbulent flow** ภายในท่อเดียวกันลักษณะการไหลไม่ว่าจะเป็นทิศทางการไหลหรือเส้นการไหล (stream line) เมื่อพิจารณาถึงลงไปถึงอนุภาคของเหลวซึ่งเดิมที่มีแนวการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงก็จะหายไป และเปลี่ยนแปลงไปอย่างสมบูรณ์เมื่อความเร็วของเหลวภายในท่อสูงถึงค่าหนึ่ง อนุภาคทั้งหมดภายในของเหลวเคลื่อนหมุนไปในทิศทางที่ไม่สามารถทำนายคาดการณ์ได้ อีกทั้งอนุภาคแต่ละตัวจะเคลื่อนที่ข้ามกันไปมายุ่งเหยิง ลักษณะการไหลดังกล่าวนี้เป็นการไหลที่เกิดขึ้นจริงๆในการไหลของเหลวภายในท่อ

2. ความเร็วการไหล(Flow velocity) ความเร็วการไหลภายในท่อจะมีค่าไม่เท่ากันที่ทุกๆจุดของพื้นที่หน้าตัดเดียวกันถึงแม้จะเป็นท่อขนาดเดียวกันก็ตาม สาเหตุเนื่องจากความเสียดทานภายในท่อเริ่มมีอิทธิพลเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆตั้งแต่จากแนวศูนย์กลางท่อจนถึงตำแหน่งผนังท่อซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความเสียดทานสูงสุดจึงมีผลกระทบต่อการไหลมากที่สุดทำให้ความเร็วของการไหลบริเวณดังกล่าวมีค่าต่ำสุดเพราะความเสียดทานจะหน่วงการไหลมากที่สุด ด้วยเหตุนี้รูปแบบการไหล (velocity profile) จึงขึ้นอยู่กับสภาวะรูปแบบของการไหล

จากการทดลองพบว่า (ดูรูป 27 , 28) สถานะการไหลแบบ laminar flow เวกเตอร์



Profiles of liquid flow velocity through a straight pipe :
a – laminar flow ; b – turbulent flow.

รูป 28 กราฟแสดงรูปแบบการไหลภายในท่อตรง

ความเร็ว (velocity vector) จะมีค่าสูงสุดตามแนวเส้นศูนย์กลางของท่อและจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเข้าใกล้ผนังท่อ รูปแบบการกระจายความเร็ว (velocity distribution) ที่หน้าตัดใดๆ ภายในท่อจะมีลักษณะเป็นรูปพาราโบลา (parabola) ความเร็วที่จุดใดๆ ที่ระยะห่างจากเส้นศูนย์กลางท่อเท่ากับ y มีค่า

$$V = 2V_{mean} \left[1 - \left(2 \frac{y}{D} \right)^2 \right]$$

เมื่อ D = เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ

V = ความเร็วการไหลที่จุดใดๆ

V_{mean} = ความเร็วการไหลเฉลี่ย ณ พื้นที่หน้าตัดใดๆ

ดังนั้นเมื่อ $y = 0$ (ตำแหน่งกึ่งกลางท่อ) $V_{max} = 2V_{mean}$ นั้นหมายถึง

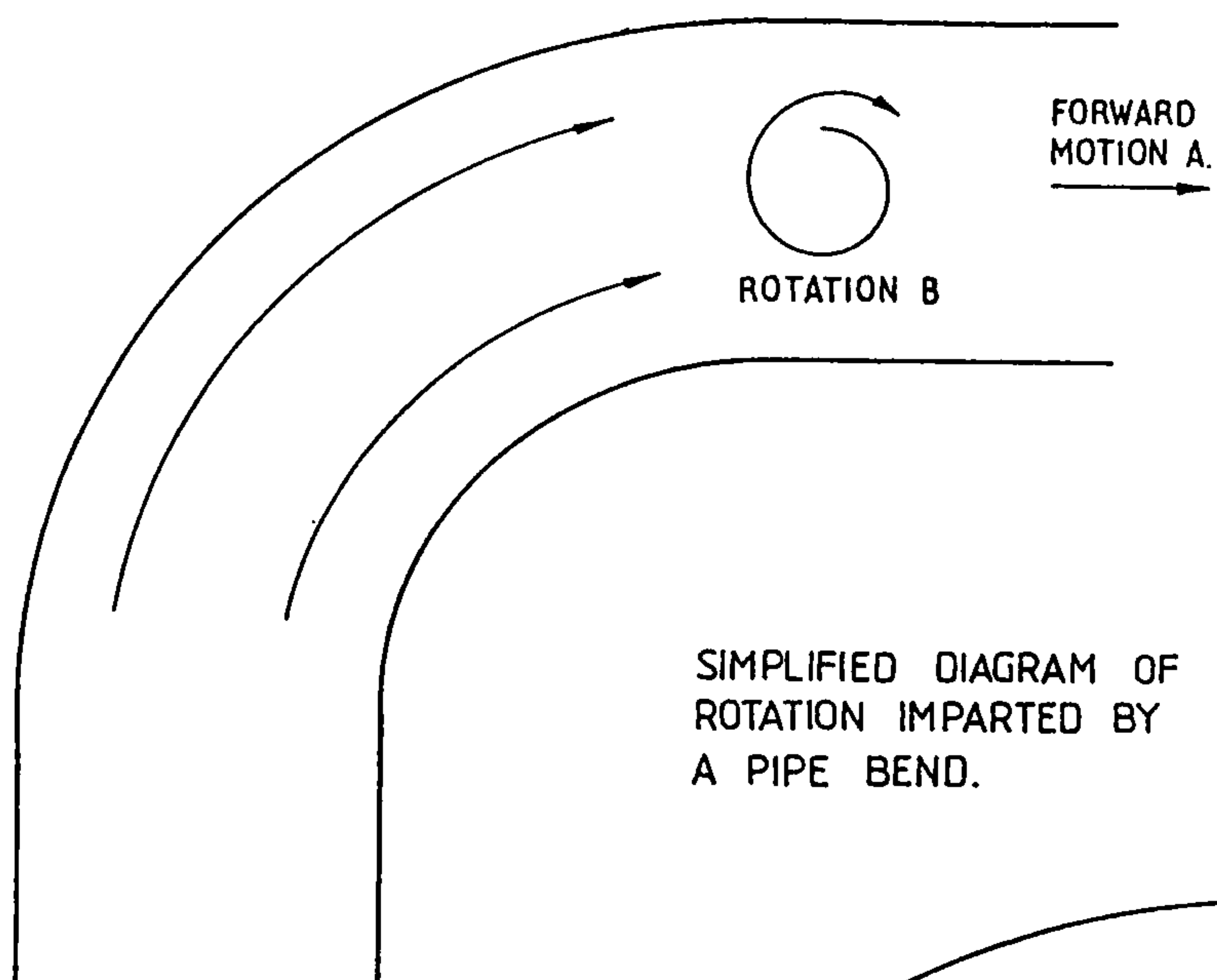
$$V_{mean} = \frac{V_{max}}{2}$$

หากสภาวะการไหลเปลี่ยนจาก laminar flow ไปเป็น turbulent flow ความเร็วแต่ละจุดก็จะมีค่าไม่คงที่อีกต่อไปเช่นใน laminar flow แต่ทิศทางและค่าความเร็วจะเปลี่ยนไป รูปแบบการกระจายความเร็วที่หน้าตัดใดๆ จะมีลักษณะเป็นรูปพาราโบลาแบนราบนั่นคือ ค่าความเร็วส่วนใหญ่ของพื้นที่หน้าตัดจะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วสูงสุด โดยความเร็วสูงสุดจะอยู่บริเวณกึ่งกลางท่อแล้วจะลดลงไปเรื่อยๆ จนถึงผนังท่อค่าความเร็วมีค่าเท่ากับศูนย์ ความเร็วที่จุดใดๆ ที่ระยะห่างจากเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเท่ากับ y ความเร็วโดยประมาณจะมีค่า

$$V = V_{max} \left(1 - 2 \frac{y}{D} \right)^{\frac{1}{7}}$$

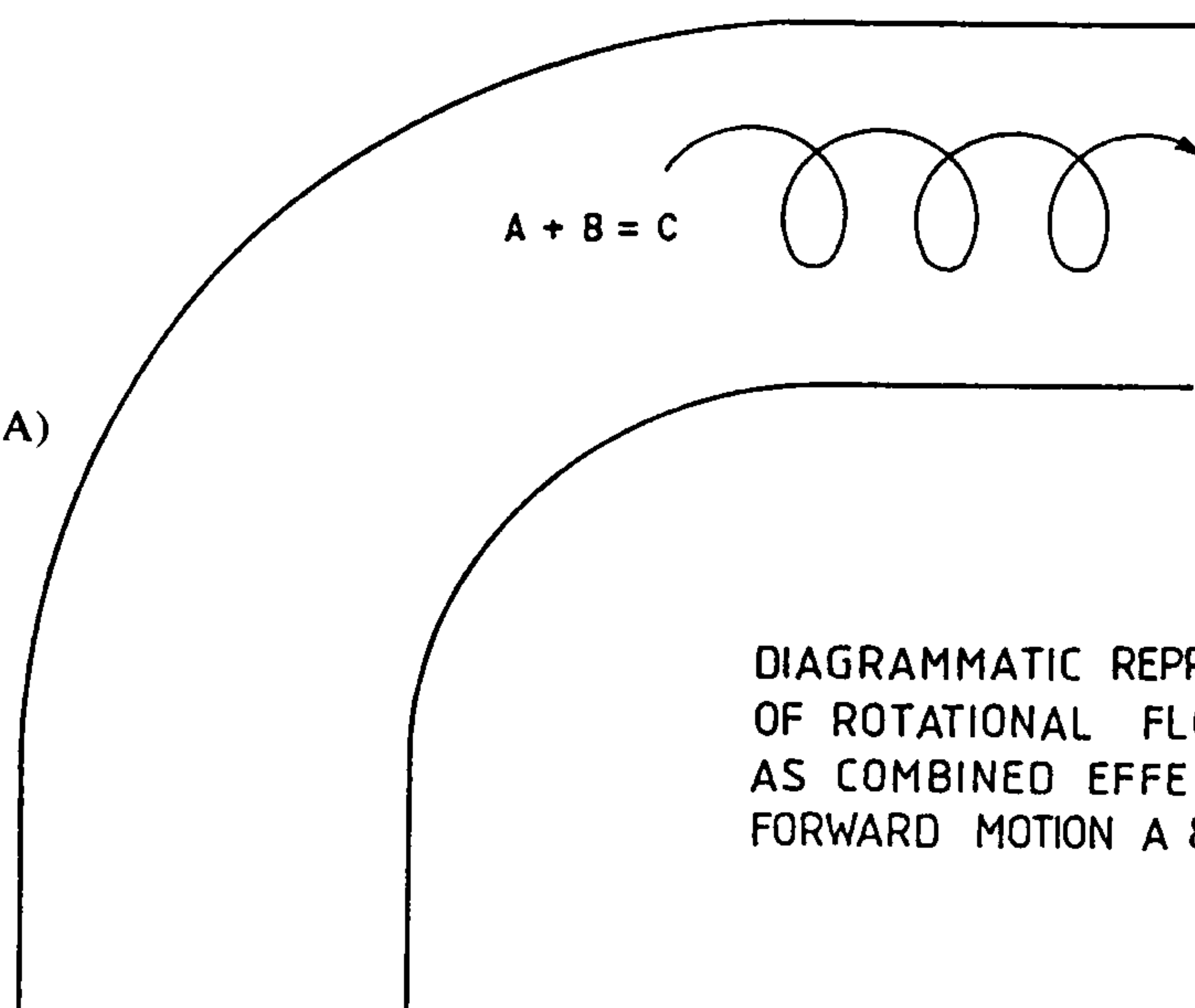
เวกเตอร์ของความเร็วการไหลเฉลี่ยจะขนานกับเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ แต่พบว่าอัตราส่วน V_{mean}/V_{max} มีค่าไม่คงที่อีกต่อไปอย่างเช่นใน laminar flow อัตราส่วน V_{mean}/V_{max} จะเปลี่ยนแปลงมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 - 0.86

อย่างไรก็ตามรูปแบบการไหล (velocity profile) ของการไหลแบบ turbulent flow ดังกล่าวค่อนข้างจะเป็นลักษณะอุดมคติเกินไปหรือไม่ก็จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่ออยู่บริเวณด้านปลายสุดของท่อตรงและยาวๆ ทั้งนี้เพราะโดยปกติแล้วรูปแบบการไหล (velocity profile) มักจะถูกทำลายด้วยการโค้งงอของท่อ หรือการต่อหน้าแปลนเอียงกัน , วาล์ว , filters , หรืออุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในระบบท่อ (ดูรูป 30,31,32)



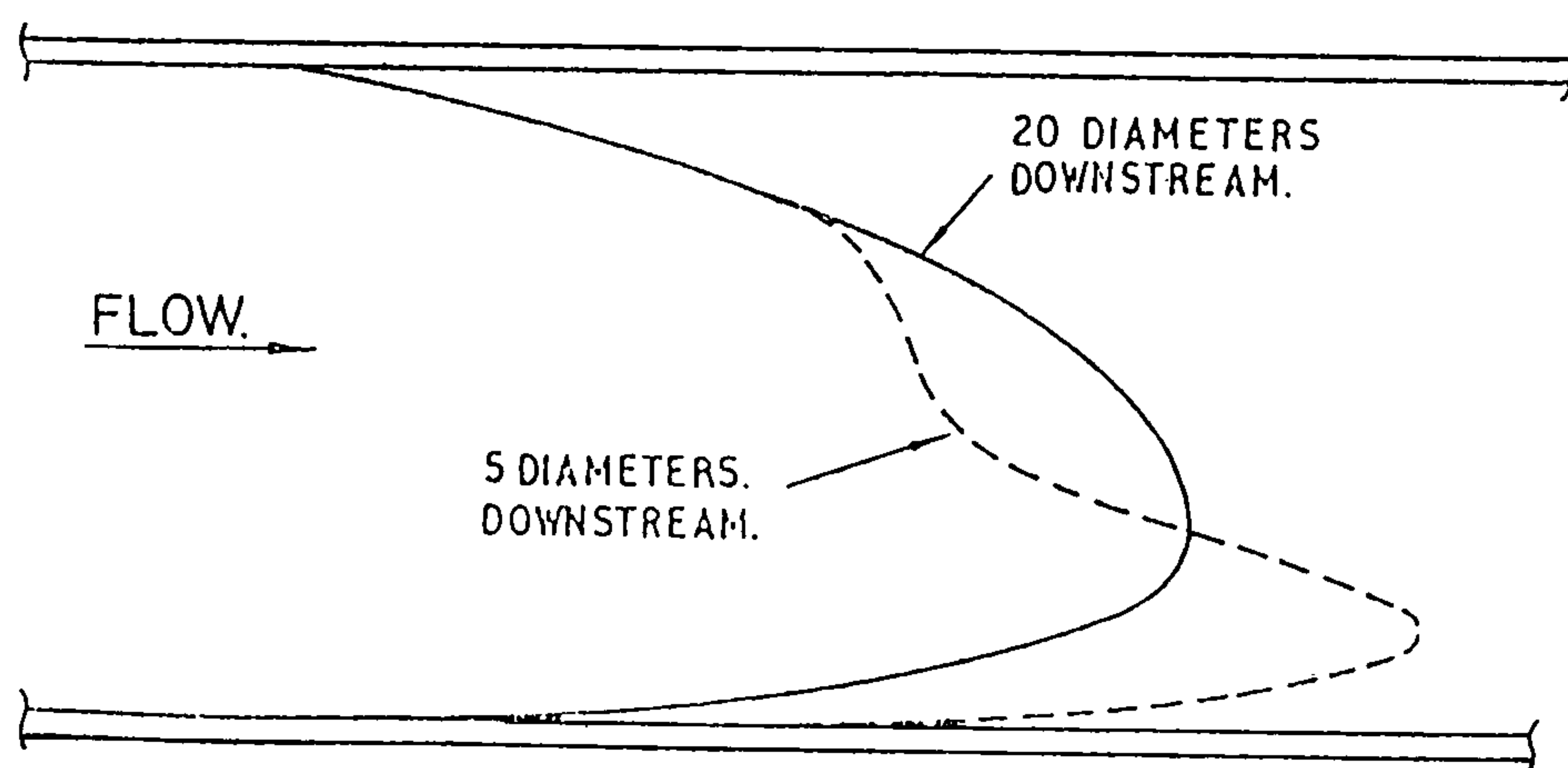
รูป 29 ลักษณะการเกิดการไหลหมุนหลังจากผ่านข้องอ

SIMPLIFIED DIAGRAM OF ROTATION IMPARTED BY A PIPE BEND.



DIAGRAMMATIC REPRESENTATION OF ROTATIONAL FLOW, SEEN AS COMBINED EFFECT OF FORWARD MOTION A & ROTATION B.

รูป 30 ผลของลักษณะการเกิดการไหลหมุนเนื่องจากการไหลไปข้างหน้า (A) กับ การไหลหมุน (B)



รูป 31 อิทธิพลของขนาดท่อที่มีต่อรูปแบบการไหล

ปัญหาหนึ่งที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อรูปแบบการไหล (velocity profile) ได้แก่ **การไหลหมุน (Rotation)** เกิดจากการไหลของไหลผ่านท่อข้อหรือท่อโค้งหรือหน้าแปลนซึ่งติดตั้งแล้วมีหน้าสัมผัสไม่เสมอกัน ดังนั้นต้องใช้ระยะเวลาหนึ่งเช่นกันกว่าที่การไหลหมุนนี้จะหมดไปทางด้านออกมาตรวัด (downstream) แต่ถ้าหากว่ามีท่อข้อหรือท่อโค้ง 2 ท่อ ติดตั้งติดต่อกันแต่อยู่ในระนาบต่างกัน ก็จะเป็นสาเหตุก่อให้เกิดการไหลหมุนวน (swirl) หมุนรอบแต่ละแกนของ 3 มิติ (3 - dimensional kind of rotation ; แกน X , Y , Z) ดังนั้นเมื่อของไหลเกิดการไหลหมุนวน 3 มิติ (swirl) แล้วละก็ยิ่งจำเป็นต้องใช้เวลานานมากจนกว่าที่การไหลหมุนวน (swirl) จะหมดหายไปจากการไหลภายในระบบท่อ

3. ความหนืด (Viscosity) ความหนืดคือคุณสมบัติของเหลวที่ไม่ยอมเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดของอนุภาคหรือการเรียงตัวของอนุภาคเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ในกรณีของเหลวมีการเคลื่อนที่คุณสมบัติดังกล่าวเรียก dynamic viscosity or absolute viscosity (μ) นั่นคือความต้านทานอันเกิดจากความเสียดทานภายในระหว่างชั้นของเหลวในแนวนานกับการเคลื่อนที่

ค่าเศษส่วนกลับของ dynamic viscosity (μ) $1/\mu$ เรียกว่า “fluidity”

อัตราส่วนระหว่าง dynamic viscosity (μ) กับน้ำหนักจำเพาะของเหลว ρ เรียกว่า kinematic viscosity , ν

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

เนื่องจากความหนืดเป็นฟังก์ชันของความดัน (p) และอุณหภูมิ (T),

$$\mu = f(p, T)$$

ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงทั้งความดันและอุณหภูมิจึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด

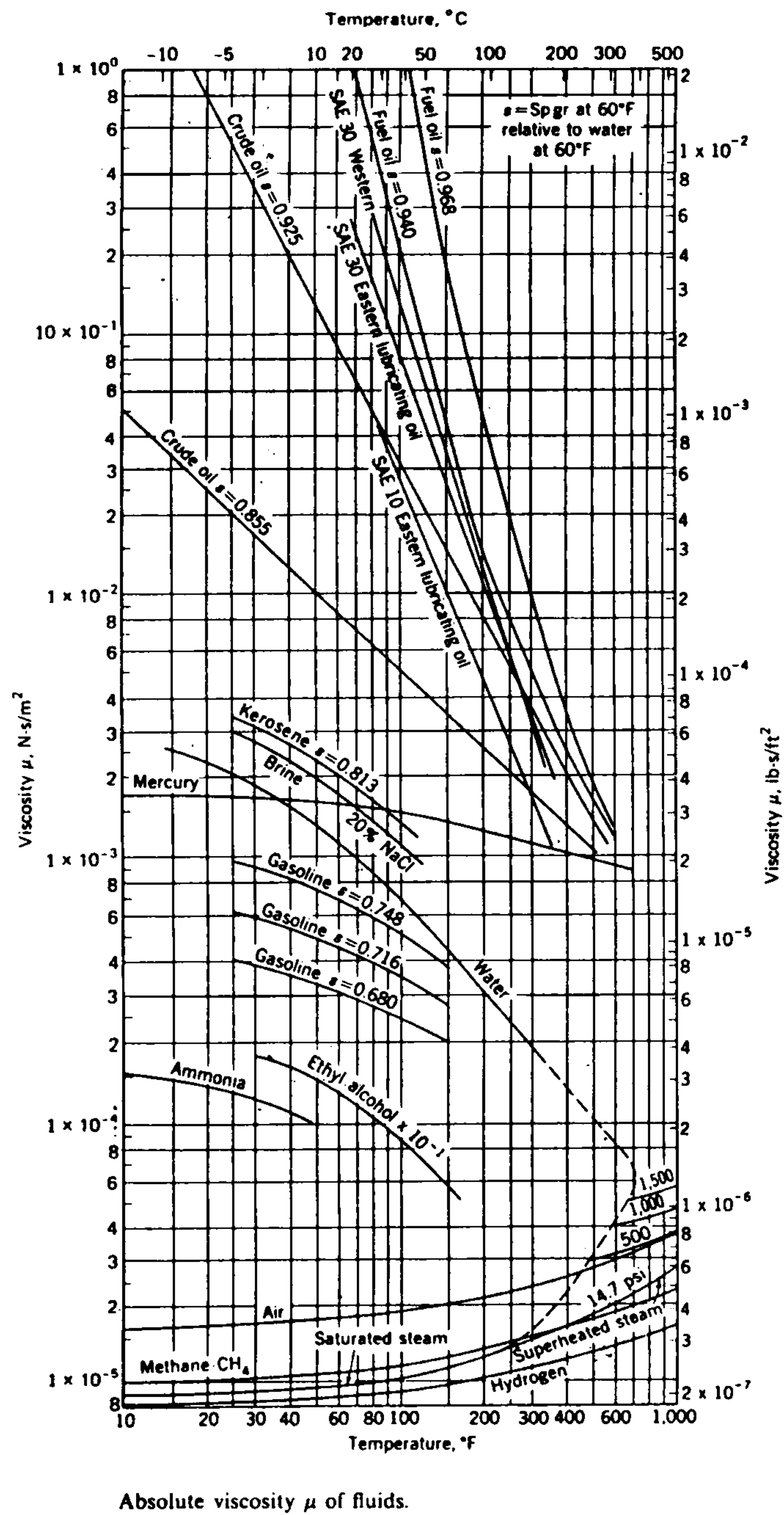
- **อิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนืด** เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิได้ว่า (รูป 32 , 33)

$$\mu = \mu_0 e^{-\beta(T-T_0)}$$

เมื่อ μ_0 = ความหนืดอ้างอิง (reference viscosity)

β = ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด-อุณหภูมิกงที่ (constant viscosity-temperature coefficient)

T_0 = อุณหภูมิอ้างอิง (reference temperature)



รูป 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสมบูรณ์ (μ) กับอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{F}$)

ในกรณีของเหลวพบว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนืด เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปเป็นอย่างมาก นั่นคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความเร็วของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลแต่ละตัวอยู่ห่างกันมากขึ้นจึงทำให้ความหนืดลดลง

ในกรณีก๊าซ ปรากฏการณ์การถ่ายเทโมเมนตัมจะมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืด เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโมเลกุลของก๊าซจะเคลื่อนที่เร็วขึ้น โอกาสที่จะมีการกระทบกันระหว่างโมเลกุลมีมากขึ้น การเกิดรวมตัว (cohesion) หลังจากโมเลกุลชนกันมีมากขึ้นนั้นหมายถึงความหนืดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

- **อิทธิพลของความดันมีผลต่อความหนืด** ทั้งของเหลวและก๊าซจะมีค่าความหนืดสูงมากขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลถูกกดดันให้อยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ความดันและความหนืดจึงมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\mu = \mu_0 e^{\alpha p}$$

เมื่อ μ_0 = ความหนืดอ้างอิง (reference viscosity)
 α = สัมประสิทธิ์ความดัน-ความหนืด (pressure-viscosity coefficient)
 p = ความดัน

4. ชนิดของเหลว (Type of liquid) สามารถแบ่งประเภทของเหลวได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

- **Newtonian Fluid** คือของเหลวซึ่งมีความหนืดคงที่และไม่ขึ้นกับอัตราการเฉือน (shear rate) แต่อัตราการเฉือน (shear rate) จะมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้นเฉือน (shear stress) ได้แก่ น้ำ, น้ำมัน, ก๊าซทุกชนิด และอื่นๆ เป็นไปตาม Newton's law

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

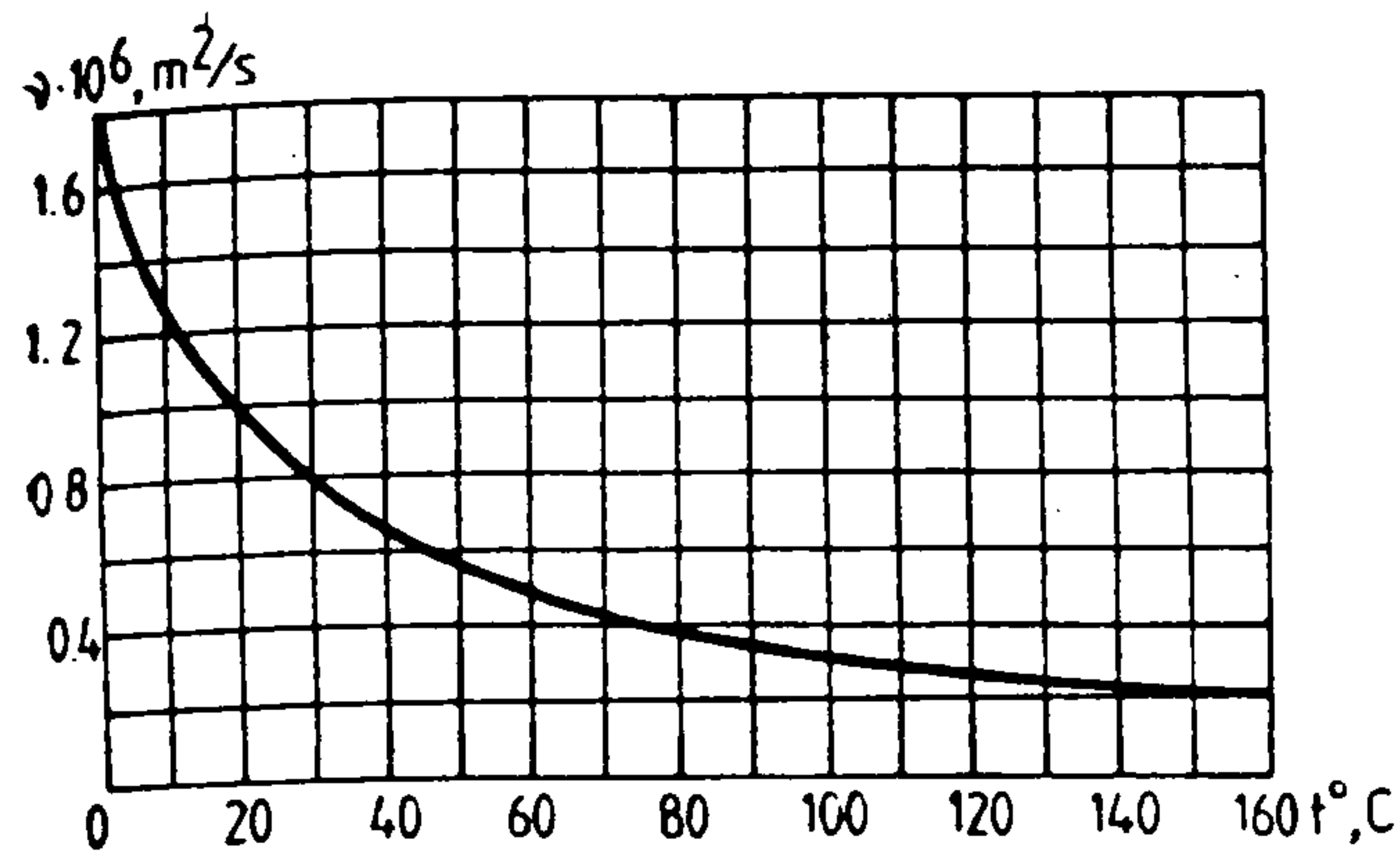
โดยที่

$$\mu = \frac{\tau}{\left(\frac{dv}{dy}\right)} = \text{const.}$$

เมื่อ τ = ความเค้นเฉือนแนวสัมผัส (tangential shearing stress)
 μ = ความหนืดสมบูรณ์ (viscosity)
 dv/dy = อัตราเฉือน (shear rate)

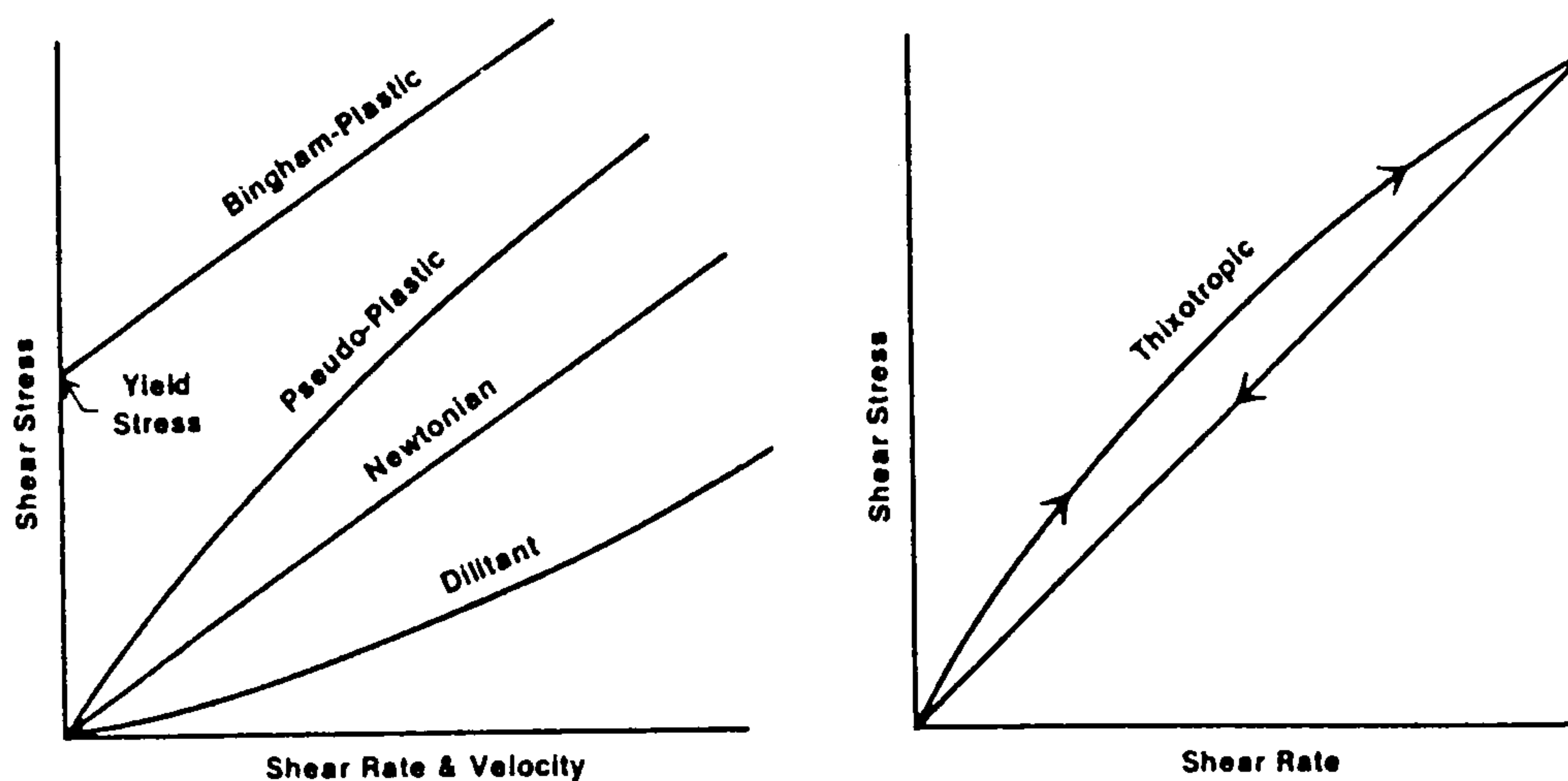
สังเกตว่าความเค้นเฉือน (shear stress) จะเป็นสัดส่วนกับความดันหรือความดันทั้งหมด (total head) ส่วนอัตราเฉือน (shear rate) จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วการไหล (velocity) หรือ การไหล (flow) (ดูรูป 35)

- **Non-Newtonian Fluid** คือของเหลวซึ่งมี consistency { ความต้านทานการเสียรูปไปของสารแขวนลอย (slurry) เมื่อได้รับความเค้นเฉือน (shear stress) , consistency มีความหมายคล้ายกับความหนืดสมบูรณ์ (absolute viscosity) ใน Newtonian Fluid } เป็นฟังก์ชันของความเค้นเฉือน (shear stress) โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือน (shear rate) กับความเค้นเฉือน (shear stress) ไม่เป็นเชิงเส้นตรง ของเหลวชนิด non-newtonian fluid ได้แก่ (ดูรูป 35)



Kinematic viscosity ν of water as a function of its temperature, t° .

รูป 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดจลน์ของน้ำ กับอุณหภูมิ ($^\circ\text{F}$)



รูป 35 คุณสมบัติของชนิดของเหลวต่างๆ

* *Bingham-plastic fluid* เป็นของเหลวที่จะไม่เคลื่อนที่ไหลจนกว่าได้รับแรงหรือความดันก่อให้เกิดความเค้นเฉือน (shear stress) เกินค่า yield point ของของเหลวดังกล่าว เพราะต้องใช้ความเค้น (stress) ค่าหนึ่งเพื่อเอาชนะแรงเสียดทาน (static friction) ภายในระหว่างอนุภาคของเหลว ส่วนใหญ่จะได้แก่ สารแขวนลอย (slurry mixtures) ,จารบี (grease) เป็นต้น

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

เมื่อ τ_0 = ค่า Yield stress

* *Pseudo-plastic fluid* ไม่มีค่า yield stress ที่แน่นอนและ consistency จะลดลงเมื่ออัตราเฉือน (shear rate) มีค่าเพิ่มขึ้น

$$\tau = k\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n \quad \text{เมื่อ } n < 1$$

* *Dilatant fluid* จะมีค่า consistency เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเฉือน (shear rate) เพิ่มขึ้น ของเหลวชนิดนี้จะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่อทำการกวนของเหลว

$$\tau = k\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n \quad \text{เมื่อ } n > 1$$

* *Thixotropic fluid* เป็นของเหลวที่มีคุณสมบัติเมื่อเวลาผ่านไป consistency ลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่อัตราเฉือน (shear rate) ค่าหนึ่งๆแล้วกลับมีค่า consistency เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาไป

5. Reynold's Number Reynold's number เป็นค่าไม่มีหน่วย (non-dimensional) ค่าหนึ่งเพื่อใช้หาสถานะการไหลของเหลวด้วยสมการดังนี้

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu}$$

เมื่อ	Re_p	= Reynold's number ของท่อ (Based on pipe diameter)
	ρ	= ความหนาแน่น , kg/m^3
	v	= ความเร็วเฉลี่ยของการไหลภายในท่อ , m/s
	D	= เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ , m
	μ	= ความหนืดของของไหล (dynamic viscosity or absolute viscosity) , kg/m.s
	ν	= ความหนืดจลน์ (kinematic viscosity) , m^2/s

สมการดังกล่าวเป็น Reynold's number ใช้ในกรณีของไหลชนิด Newtonian fluid ได้แก่ น้ำ, น้ำมัน , ก๊าซทุกชนิด ของเหลวหรือสารละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (low molecular-weight liquids or solution) สารละลายหรือ polymeric material ที่หลอมละลาย , พลาสติกเหลว (melted plastics)

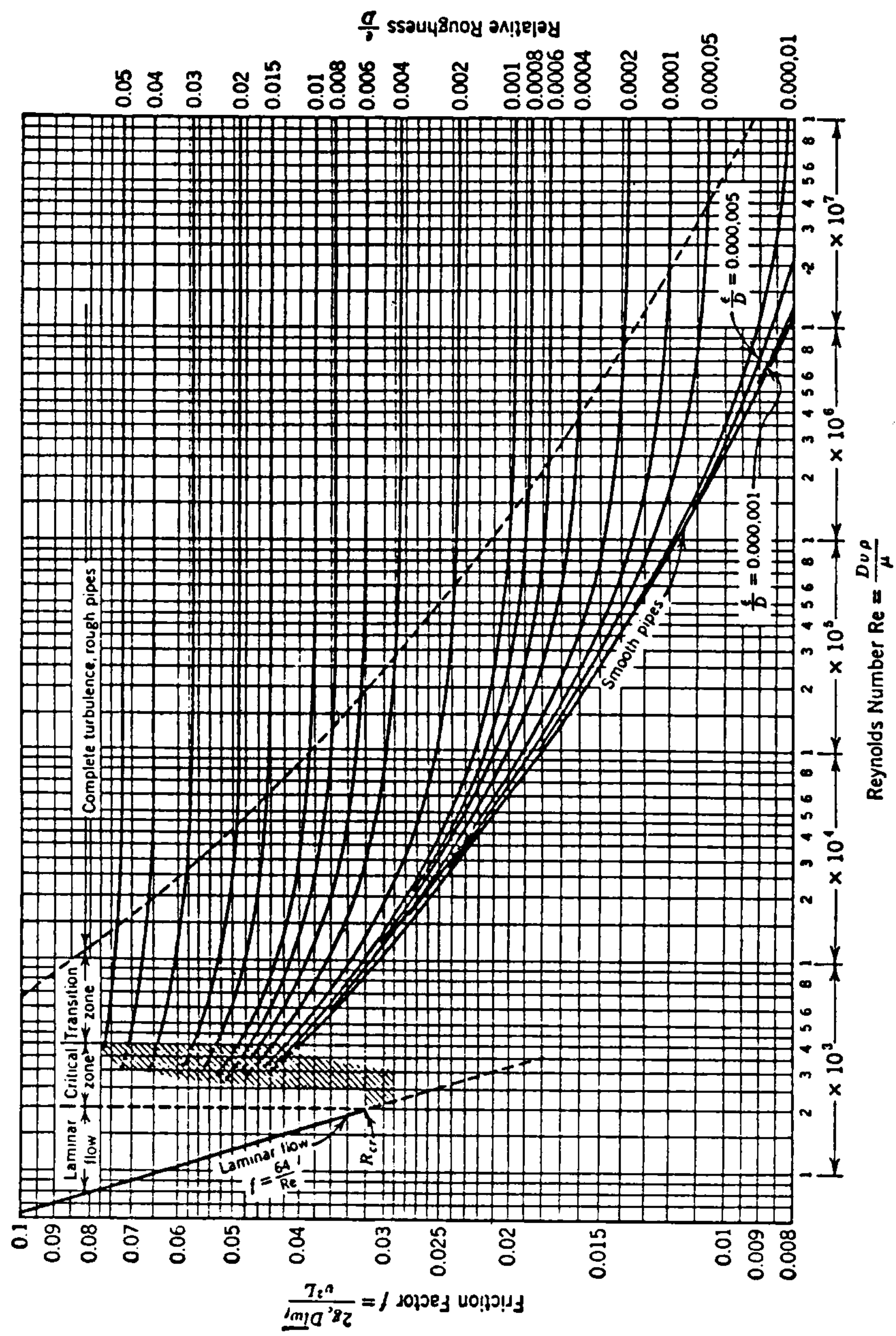
ความหมายทางฟิสิกส์ของ Reynold's number มีดังนี้คือ เมื่อพิจารณาเศษส่วนจะได้ว่าค่าของเศษเป็นค่าต่อปริมาตรคูณความเร็วการไหล (v) นั้นจะหมายถึงโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรของของไหล : $\text{kg/m}^3 \cdot \text{m}$ (โมเมนตัมเชิงเส้น $M = mv$) เมื่อนำค่าโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรของของไหลคูณด้วยความยาว ในที่นี้เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อจะได้ผลลัพธ์เป็นโมเมนตัมของโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตร (Moment of momentum per unit volume) จึงสรุปได้ว่าค่าเศษของ Reynold's number จะแสดงถึงค่าแนวโน้มของปริมาตรหนึ่งหน่วยของของเหลวที่จะก่อให้เกิดแรงจลน์ (dynamic force) หรือแรงเฉื่อย (inertia force)

หากพิจารณาค่าส่วนของ Reynold's number ค่าความหนืด (viscosity) จะเป็นตัวบ่งบอกให้รู้ถึงแนวโน้มของปริมาตรหนึ่งหน่วยที่จะก่อให้เกิดแรงหนืดหรือแรงเสียดทาน (viscous or frictional forces) จึงพอสรุปได้ว่า Reynold's number เป็นค่าแสดงบ่งบอกถึงสัดส่วนระหว่าง 2 ปริมาณคือ แรงจลน์กับแรงเสียดทานว่าในกรณีเฉพาะหนึ่งๆแรงชนิดใดมีผลเด่นกระทำต่อระบบการไหล 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

จากการทดลองการไหลภายในท่อเพื่อหา 3 สถานะการไหล เป็นดังนี้

- การไหลแบบ laminar flow $Re_p \geq 2000$
- การไหลแบบ transient flow (critical zone) $2000 \geq Re_p \geq 4000$
- การไหลแบบ turbulent flow $Re_p \geq 4000$

36 Moody Friction-Factor Chart



Moody friction-factor chart. [Reproduced by permission from L. F. Moody, *Trans. ASME*, 66, 671 (1944).]
(Note: See Fig. 4.2, page 120, for ϵ/D .)

การเปลี่ยนสถานะการไหลจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่งเกิดขึ้นที่ค่า $Re_D = 2320$ ซึ่งเรียกว่า **สภาวะวิกฤต (critical state)** ดังนั้น **ความเร็ววิกฤต (critical velocity)** เมื่อสภาวะการไหลแบบ laminar flow เปลี่ยนไปคือ

$$v_{cr} = 2320 \frac{v}{D}$$

6. ความยาวการไหลอยู่ตัว (Flow Stabilization Length) เมื่อให้ทางเข้าท่อเป็นการไหลแบบ laminar flow แต่จริงๆแล้วจะไม่เป็นการไหลแบบ laminar flow โดยสมบูรณ์

การไหลจะเป็นแบบ laminar flow สมบูรณ์ก็ต่อเมื่อไหลผ่านท่อไปได้ระยะห่างค่าหนึ่ง, l ค่าระยะทางดังกล่าวหาได้จาก

$$l = 0.028 Re_D D \quad \text{m.}$$

เช่นที่ $Re_D = 2000$ ความยาวท่อที่ทำให้การไหลเกิดเป็นแบบ laminar flow สมบูรณ์คือ $l = 60D$

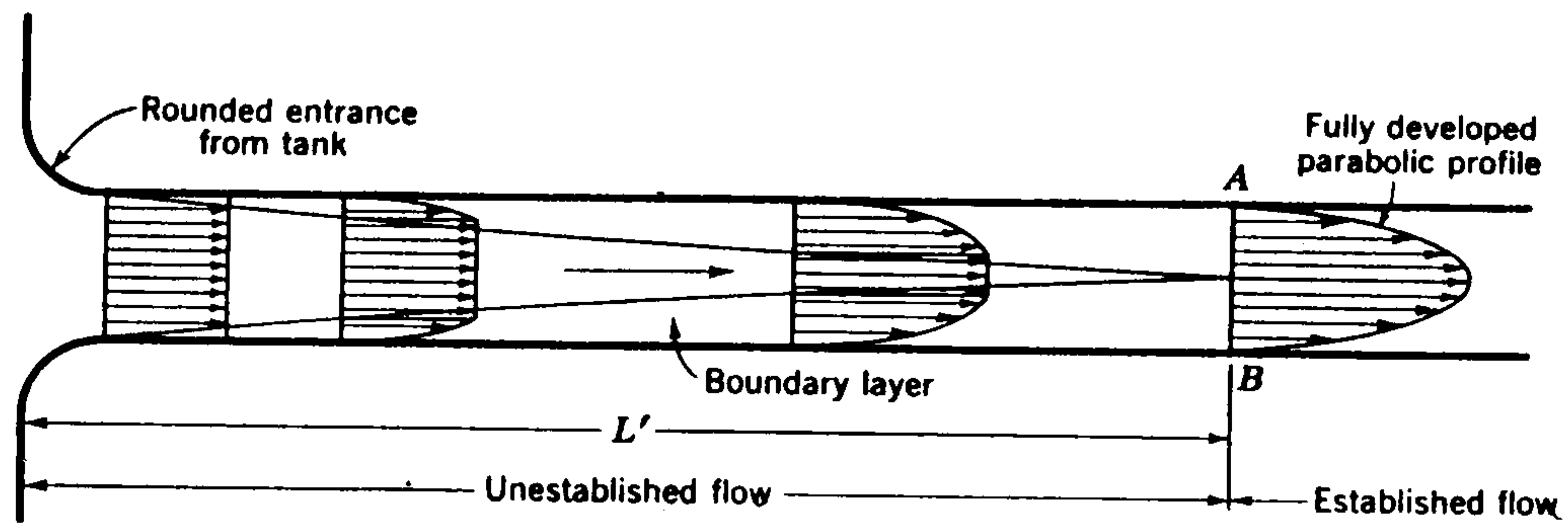
สำหรับการไหลแบบ turbulent flow สภาวะการไหลจะสมบูรณ์เมื่อของเหลวไหลผ่านท่อไปเป็นระยะทางเท่ากับ

$$l = 10^5 \frac{D}{Re_D} \quad \text{m.}$$

ดังนั้นเมื่อ	$Re_D = 10^4$	จะได้	$l = 10D$
	$Re_D = 10^5$	จะได้	$l = D$
	$Re_D = 10^6$	จะได้	$l = 0.1D$

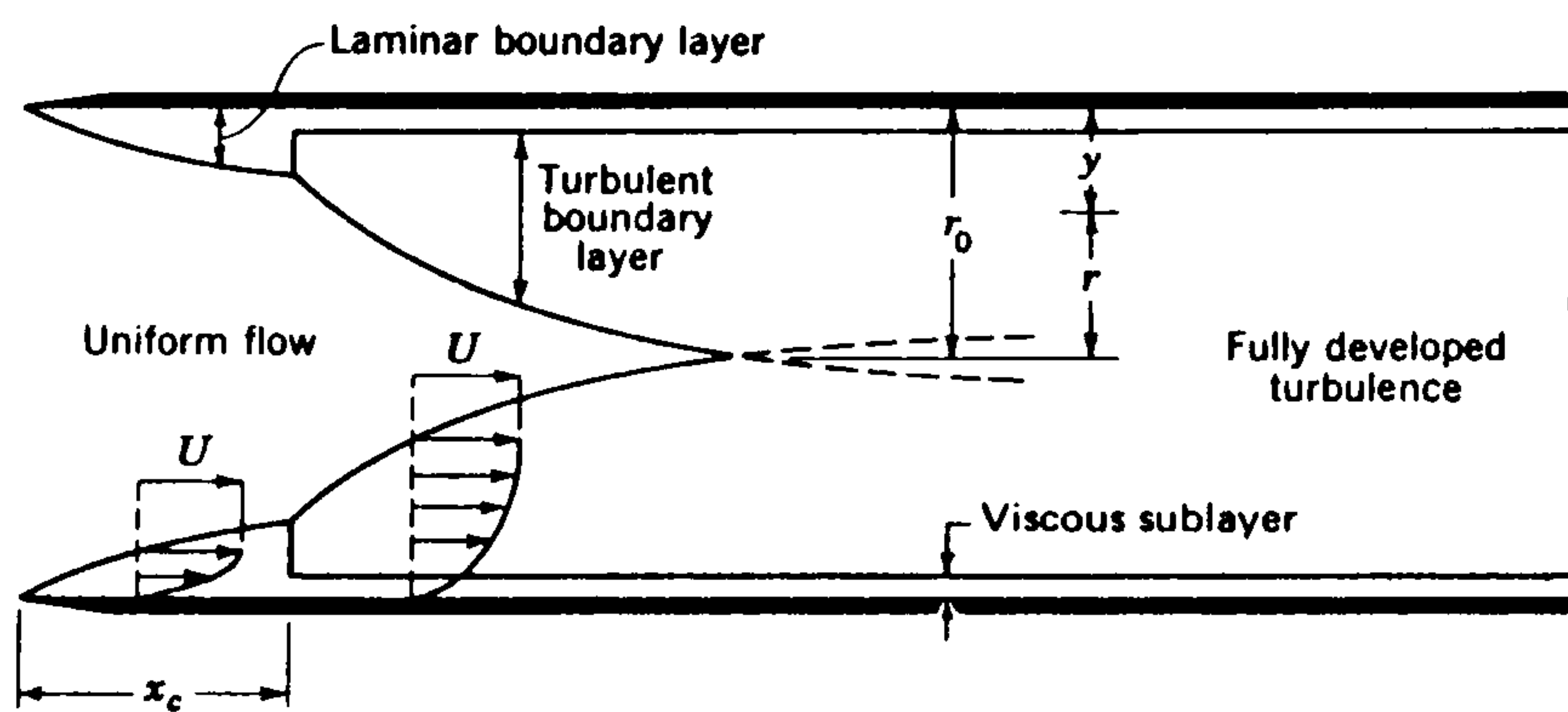
สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

เป็นสมการที่สำคัญที่สุดสมการหนึ่งในการศึกษาและอธิบายปรากฏการณ์ของการไหล สำหรับของเหลวซึ่งไหลภายในท่อ และของเหลวเป็นของเหลวอัดตัวไม่ได้ (incompressible liquid) , ไหลอย่างคงที่ (steady flow) , ไม่มีพลังงานสูญเสียพลังงาน ณ.ตำแหน่งใดๆในท่อ คือผลรวมของ velocity head , pressure head , และ elevation head จะมีค่าคงที่ตลอดตามแนวเส้นทางการไหล (stream line) ภายในท่อ ดังนั้นพลังงานที่จุดใดๆในระบบมีความสัมพันธ์ ณ.ระนาบอ้างอิงระนาบหนึ่งคือ



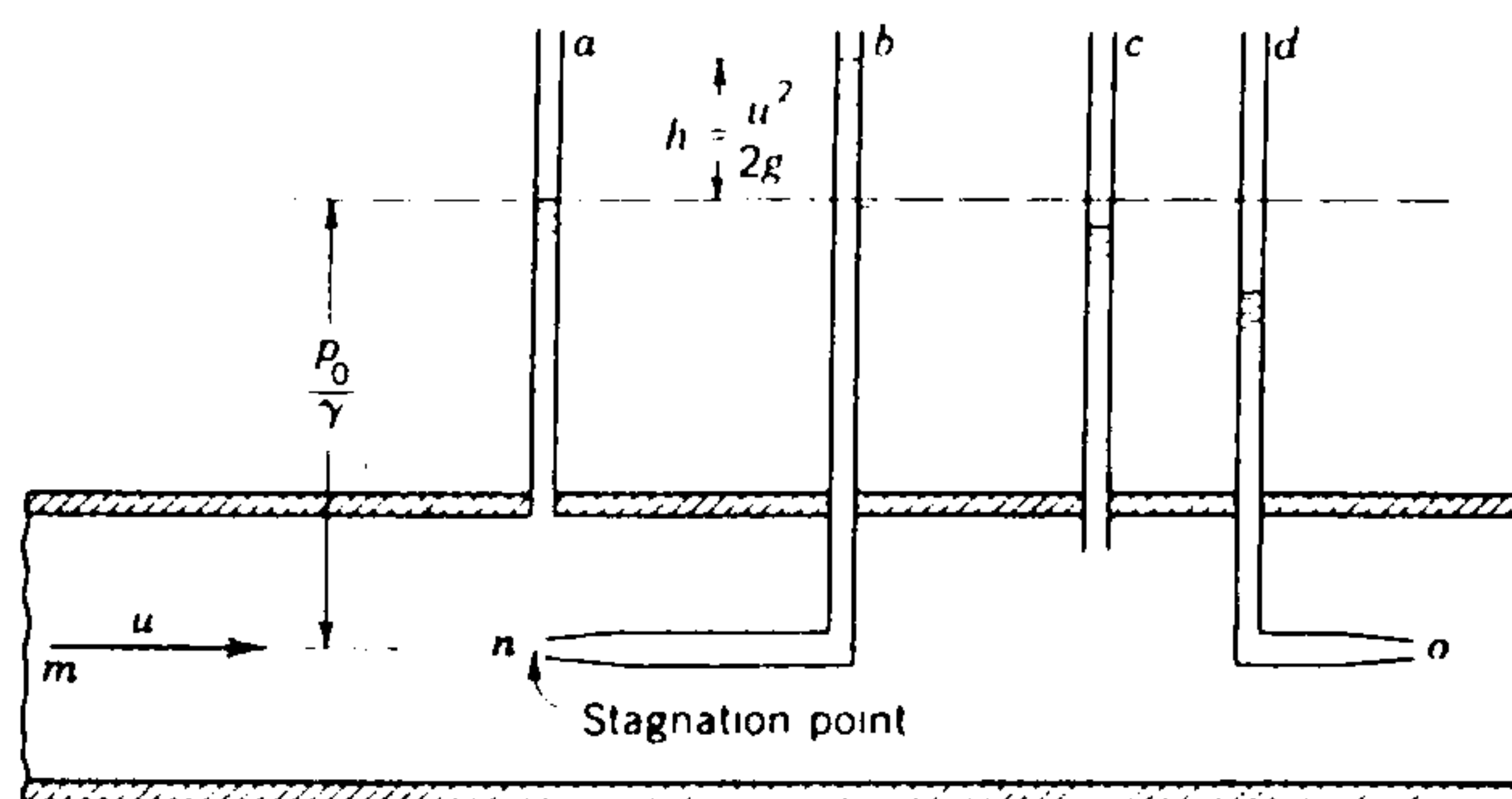
Velocity profiles along a pipe in laminar flow.

รูป 37 ขั้นตอนการเกิดรูปแบบการไหลแบบ Laminar Flow ภายในท่อตรง



Development of boundary layer in a pipe (scales much distorted).

รูป 38 การเกิดชั้นการไหลภายในท่อตรง



¹ J. S. McNown, H. M. Lee, M. B. McPherson, and S. M. Engez, Influence of Boundary Proximity on the Drag of Spheres, *Proc. 7th Intern. Congr. Appl. Mech.*, 1948.

รูป 39 การแสดงความดัน ณ จุดต่างๆภายในท่อ

$$H = \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + Z$$

เมื่อ	H	=	พลังงาน (total head) ของระบบ , ft.lb/lb หรือ ft (N . m/N หรือ m)
	V	=	ความเร็ว ft/s (m/s)
	g	=	ความเร่งโน้มถ่วงของโลก 32.17 ft/s ² (9.807 m/s ²)
	p	=	ความดัน lb/ft ² (N/m ²)
	γ	=	น้ำหนักจำเพาะ (specific weight) ของของเหลว lb/ft ³ (N/m ³)
	Z	=	ระดับสูงกว่า (+) หรือต่ำกว่า(-) ระบายที่เลือกไว้

Velocity head คือพลังงานจลน์ (kinematic energy) ;K ในมวลของของเหลวที่ไหลอยู่

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{W}{g} \right) V^2$$

หารตลอดด้วย W

$$\frac{K}{W} = \frac{1}{2} \left(\frac{W}{g} \right) V^2 \frac{1}{W} = \frac{V^2}{2g}$$

นั่นคือพลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก (kinetic energy per unit weight of liquid)

Pressure head หรือ flow work ในของเหลวคือ p/γ นั่นคือของเหลวที่มีความดันมีความสามารถจะทำงานหรือให้งานออกมาได้ เช่นงานของการเคลื่อนที่ลูกสูบซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A เคลื่อนที่ด้วยช่วงชัก (stroke) ยาว L ทำให้ปริมาณของเหลวที่ต้องการให้เคลื่อนลูกสูบเคลื่อนที่ได้ครบรอบหนึ่งรอบคือ γAL ดังนั้นงานจึงเท่ากับแรงคูณระยะทางที่ลูกสูบเคลื่อนที่

$$\text{Work} = \text{force} \times \text{stroke}$$

$$= pA \cdot L$$

หารตลอดด้วย γAL (น้ำหนัก)

$$\begin{aligned} \frac{\text{Work}}{\gamma AL} &= \frac{pAL}{\gamma AL} \\ &= \frac{p}{\gamma} = \frac{p}{\rho g} \end{aligned}$$

ดังนั้นงานต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก (work per unit weight) เท่ากับ p/γ เมื่อ $\gamma = \rho g$

Elevation head ระดับพลังงาน (elevation energy) หรือ พลังงานศักย์ (potential energy) ภายในของเหลว คือ ระยะในแนวตั้งที่วัดจากระนาบแนวนอนที่เลือกกำหนดระดับใดระดับหนึ่ง ดังนั้นของเหลวซึ่งอยู่เหนือระนาบแนวระดับอ้างอิงจะมีค่าพลังงานศักย์เป็นบวกเพราะของเหลวดังกล่าวสามารถตกลงมาด้วยระยะ Z นั่นคือต้องการพลังงานจลน์ (kinetic energy) หรือ Vertical head เท่ากับ Z หรืองานที่ยกน้ำหนักของไหล : W lb. (N) ให้สูงขึ้นจากระนาบอ้างอิง Z ft.(m.) จึงเท่ากับ

$$Work = WZ$$

หารตลอดด้วย W

$$\frac{Work}{W} = \frac{WZ}{W} = Z$$

นั่นคืองานต่อหน่วยน้ำหนักของเหลวในการยกน้ำหนัก W ให้สูงเหนือกว่าระดับอ้างอิง Z ft. มีค่าเท่ากับ Z

แต่สมการดังกล่าวข้างบนค่อนข้างมีความซับซ้อนเพื่อให้ง่ายและวิเคราะห์สมรรถภาพกับเทอร์ไบน์มิเตอร์ (turbine meter) เท่านั้น สมการ Bernoulli's Equation จึงลดรูปเหลือ

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const}$$

นั่นแสดงให้เห็นว่า ณ ตำแหน่งระดับใดระดับหนึ่ง ความเร็วของของเหลวเมื่อมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่าความดันของของเหลวจะมีค่าลดลงทันที และในทางกลับกัน เมื่อค่าความดัน ณ จุดนั้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ความเร็วก็จะลดลงทันที

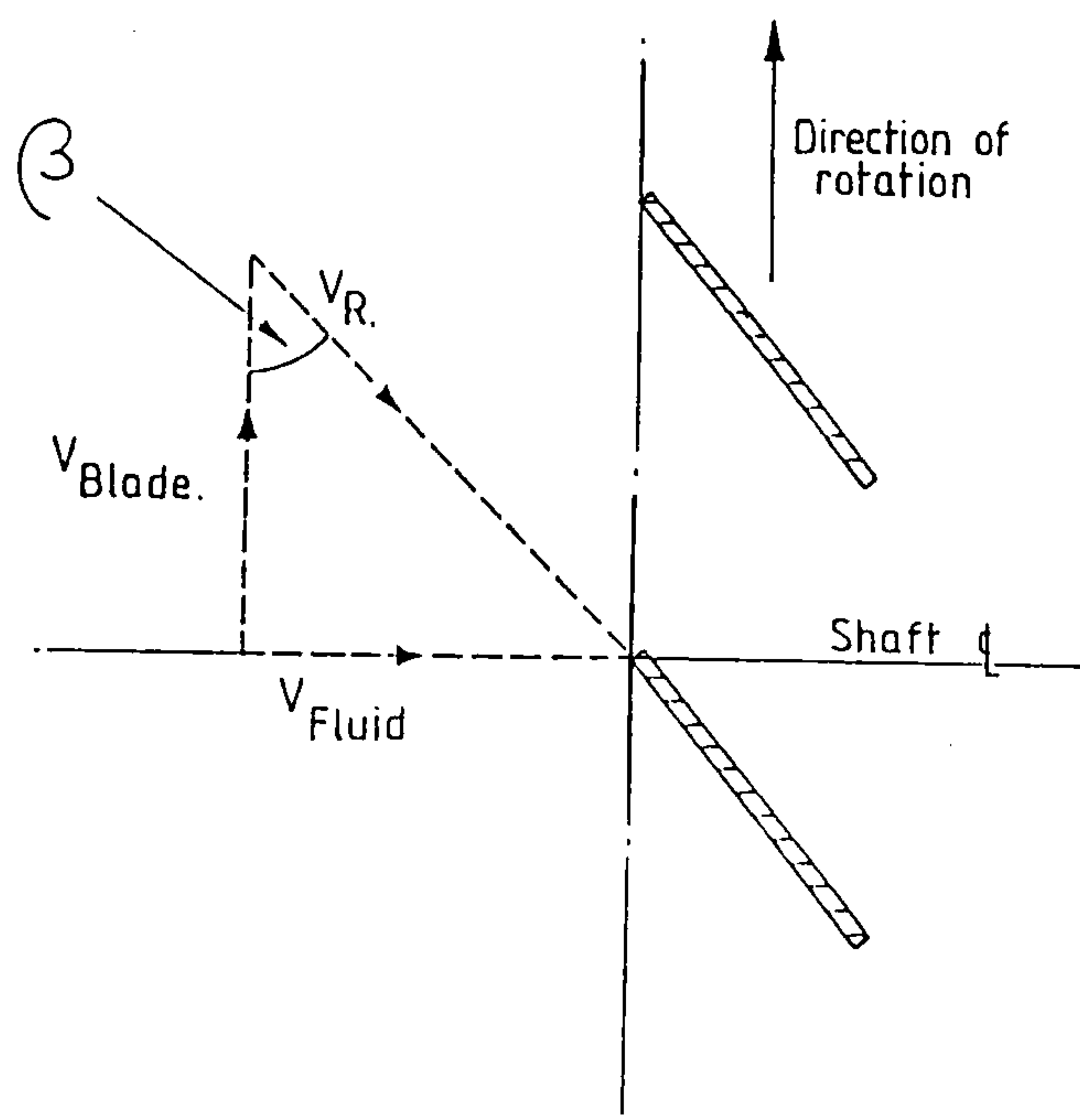
ไดอะแกรมเวกเตอร์ความเร็วของเทอร์ไบน์มิเตอร์ (The Turbine Meter Velocity Diagram)

ก่อนที่จะใช้ Bernoulli's equation วิเคราะห์พฤติกรรมของเทอร์ไบน์มิเตอร์จำเป็นต้องรู้ความเร็วสัมพัทธ์ (relative velocity) ระหว่างของไหลตามมา (flowing fluid) กับใบพัดเทอร์ไบน์ (turbine meter blade) จากการวิเคราะห์ไดอะแกรมเวกเตอร์ความเร็วทางเข้า (inlet velocity vector diagram) ดังรูป 40 . 41

จะพบว่า

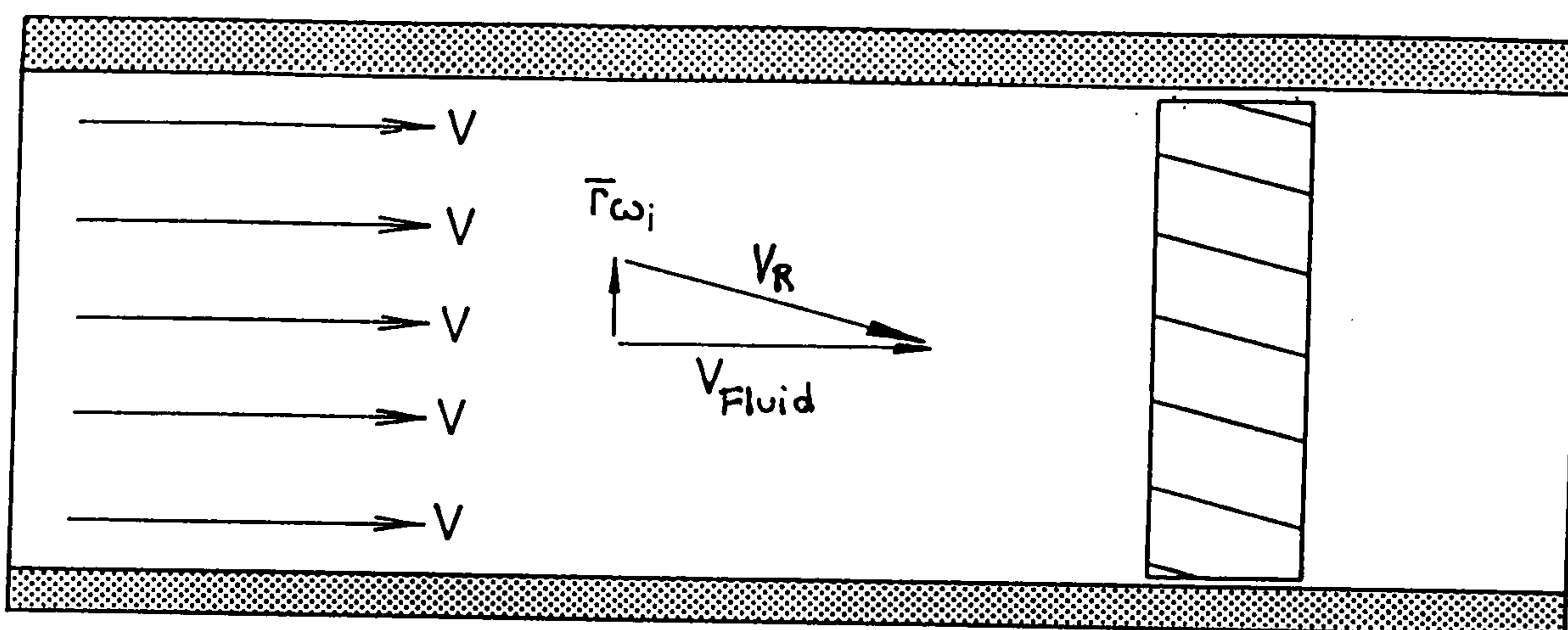
$$\vec{V}_{Blade} + \vec{V}_R = \vec{V}_{Fluid}$$

เมื่อ $\vec{V}_{Blade}$ = ความเร็วใบพัดเทอร์ไบน์



INLET VELOCITY DIAGRAM.

รูป 40 โคอแกมเวกเตอร์ความเร็วทางเข้าเทอร์ไบน์มีเตอร์



รูป 41 รูปแบบเวกเตอร์ความเร็วกระทำต่อใบพัดเทอร์ไบน์มีเตอร์

$$\begin{aligned}\bar{V}_R &= \text{ความเร็วสัมพัทธ์การไหล} \\ \bar{V}_{Fluid} &= \text{ความเร็วของเหลวก่อนทางเข้าเทอร์ไบน์มีเตอร์}\end{aligned}$$

เมื่อของเหลวไหลผ่านวัตถุ ของเหลวที่ตกกระทบวัตถุนั้นจะก่อให้เกิดแรงยกตัว (lift force) และแรงฉุด (drag force) กระทำต่อวัตถุนั้นเกิดเป็นแรงลัพธ์

$$\bar{F}_L + \bar{F}_D = \bar{F}_R$$

$$\begin{aligned}\text{เมื่อ } F_L &= \text{แรงยกตัว (Lift force)} \\ &= C_L \rho V^2 (A/2) \\ F_D &= \text{แรงฉุด (drag force)} \\ &= C_D \rho V^2 (A/2) \\ V &= \text{ความเร็วของเหลว} \\ A &= \text{Characteristic area ขึ้นอยู่กับรูปทรงของวัตถุแต่ละชนิด}\end{aligned}$$

ด้วยเหตุนี้เมื่อของเหลวไหลเข้าเทอร์ไบน์มีเตอร์แล้วตกกระทบกับใบพัดซึ่งเอียงทำมุมกับความเร็วของเหลว จึงก่อให้เกิดการหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเป็นสัดส่วนกับอัตราการไหล

เมื่อศึกษาพฤติกรรมของเทอร์ไบน์มีเตอร์ โดยสมมุติฐานว่าความเร็วของเหลวมีค่าคงที่ตลอดพื้นที่หน้าตัดของท่อ ,ความหนาแน่นและความหนืดของเหลวมีค่าคงที่ , ของเหลวเป็นของเหลวชนิดไม่ยุบตัว (incompressible fluid) และ การไหลมีค่า Re_D คงที่ จากนั้นใช้สมการ Bernoulli's equation กับเวกเตอร์ของความเร็วสัมพัทธ์ซึ่งได้จากโคอะแกรมดังกล่าว จึงได้สมการสมดุลย์ (equation of equilibrium) ของเทอร์ไบน์มีเตอร์ ณ. ภาวะสมดุลย์ , ผลรวมของแรงทั้งหมดเท่ากับศูนย์ และ ผลรวมของโมเมนต์ทั้งหมดเท่ากับศูนย์ จึงได้ว่า

$$n \int_r^r \frac{1}{2} \rho V_R^2 (C_L \sin \beta - C_D \cos \beta) L r dr = T_{B+P}$$

$$\begin{aligned}\text{เมื่อ } n &= \text{จำนวนของใบพัดของมาตรวัด} \\ r_1 &= \text{รัศมีโคนใบพัด} \\ r_2 &= \text{รัศมีปลายใบพัด} \\ \rho &= \text{ความหนาแน่นของของเหลว} \\ C_L &= \text{สัมประสิทธิ์การยก (coefficient of lift)} \\ \beta &= \text{มุมความเร็วสัมพัทธ์ (relative velocity angle)} \\ C_D &= \text{สัมประสิทธิ์การฉุด (coefficient of drag)}\end{aligned}$$

- L = ความยาวใบพัด
 r = รัศมีใดๆ
 T_{B+P} = torque จากความเสียดทานแบร์ริง (bearing friction) และแรงฉุด (pickup drag)

เทอร์ไบน์มิเตอร์ในอุดมคติจะมีค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) คงที่ (constant meter factor) นั้นหมายถึงความเร็วของใบพัดเทอร์ไบน์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของเหลวที่ผ่านเทอร์ไบน์มิเตอร์ จากไดอะแกรมเวกเตอร์ความเร็วใบพัด ซึ่งจะมีเพียงกรณีเดียวเท่านั้นที่ ความเร็วเชิงมุมใบพัดเทอร์ไบน์จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความเร็วของเหลวที่ผ่าน ก็ต่อเมื่อ มุมความเร็วสัมพันธ์ (β) มีค่าเหมือนกันหมดตลอดช่วงการไหล และอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า

- ความเร็วสัมพันธ์ (V_R) มีค่าคงที่
- ความหนาแน่น (ρ) คงที่

ดังนั้นสมการดังกล่าวข้างบนจะลดรูปเหลือ

$$AC_L = BC_D + \frac{T_{B+P}}{V_R^2}$$

เมื่อ A, B คือค่าคงที่ประกอบ (composite constants)

ที่สำคัญสมการดังกล่าวจะคงเป็นจริงอยู่ถ้าแต่ละเทอมภายในสมการยังคงเหมือนเดิมตลอดการไหล พบว่า เทอมแรกและเทอมที่ 2 ไม่สามารถทำให้สมการข้างบนเป็นจริงเพราะค่า C_L และ C_D จะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับค่า Reynold's number และ Mach Number ($M=V/C$; V =ความเร็วของเหลว, C =ความเร็วเสียงเดินทางในของเหลว) สำหรับเทอมที่ 3 ก็ไม่สามารถทำให้มีค่าคงที่เพราะว่าแรงบิด (torque) : T_{B+P} ได้รับผลกระทบและขึ้นอยู่กับความเสียดทานแบร์ริง (bearing friction) และแรงฉุด (pickup drag) อีกทั้งแรงบิด ; T_{B+P} ไม่ได้เพิ่มขึ้นในสัดส่วนกับความเร็วสัมพันธ์ยกกำลังสอง (square of the relative velocity) ทำให้ผลลัพธ์ (T_{B+P} / V_R^2) มีค่าไม่คงที่ ผลที่ตามมาในทางปฏิบัติก็คือเป็นไปได้เลยที่จะทำการผลิตเทอร์ไบน์มิเตอร์ให้มีค่าแฟคเตอร์ (K-factor) มีค่าคงที่ได้แต่เพียงผลิตให้เทอร์ไบน์มิเตอร์มีค่าแฟคเตอร์ (K-factor) มีค่าใกล้เคียงกับค่าคงที่ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ตลอดช่วงการทำงานที่กว้างเหมาะสมค่าหนึ่งของอัตราการไหล

ดังนั้นสมการข้างบนดังกล่าวจึงไม่สามารถใช้เพื่อทำนายสมรรถนะเทอร์ไบน์มิเตอร์จริงๆได้ เพราะสมการดังกล่าวได้มาจากการตั้งสมมุติฐานเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆ (เช่น สมมุติฐานให้รูปแบบการไหล (velocity profile) มีค่าคงที่ตลอดหน้าตัดของท่อ ณ.ตำแหน่งใดๆ ซึ่งจริงๆแล้วในระบบท่อเหตุการณ์ดังกล่าวไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลย) ที่จะทำให้อลดรูปสมการให้เหลืออยู่ในรูปที่น้อยที่สุด ดังนั้นหากทำการแก้ไขสมมุติฐานให้ถูกต้องตามปรากฏการณ์การไหลจริงๆภายในท่อ การแก้สมการ

ค่อนข้างยุ่งยากมากและซับซ้อนมาก และอีกทั้งจำเป็นต้องใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีขีดความสามารถสูงๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (flowrate) กับความเร็วเชิงมุม (angular velocity)

เทอร์ไบน์มิเตอร์ในอุดมคติจะพบว่า

$$\bar{V}_{Blade} + \bar{V}_R = \bar{V}_{Fluid}$$

เมื่อ

$$\bar{V}_{Blade} = \bar{r}\omega_i$$

และ

$$\tan \beta = \frac{\bar{r}\omega_i}{\bar{V}_{Fluid}}$$

ดังนั้น

$$\omega_i = \frac{\bar{V}_{Fluid} \cdot \tan \beta}{\bar{r}}$$

จากความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับความเร็วการไหล

$$Q = VA$$

เพราะฉะนั้นจึงได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความเร็วเชิงมุมของเทอร์ไบน์ (ω_i) ดังนี้

$$\omega_i = \frac{\tan \beta}{A \cdot \bar{r}} \cdot Q$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า อัตราการไหลของเทอร์ไบน์มิเตอร์ (Q) จะมีความสัมพันธ์สัดส่วนโดยตรงกับความเร็วเชิงมุม (ω_i) แต่ขณะเดียวกันก็มีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า $\tan \beta$ ซึ่งจะมีค่าน้อยลงเมื่อมุมของความเร็วสัมผัสมีค่าน้อยลง และจะมีค่ามากขึ้นเมื่อค่ามุมสูงขึ้น จึงสรุปได้ว่า

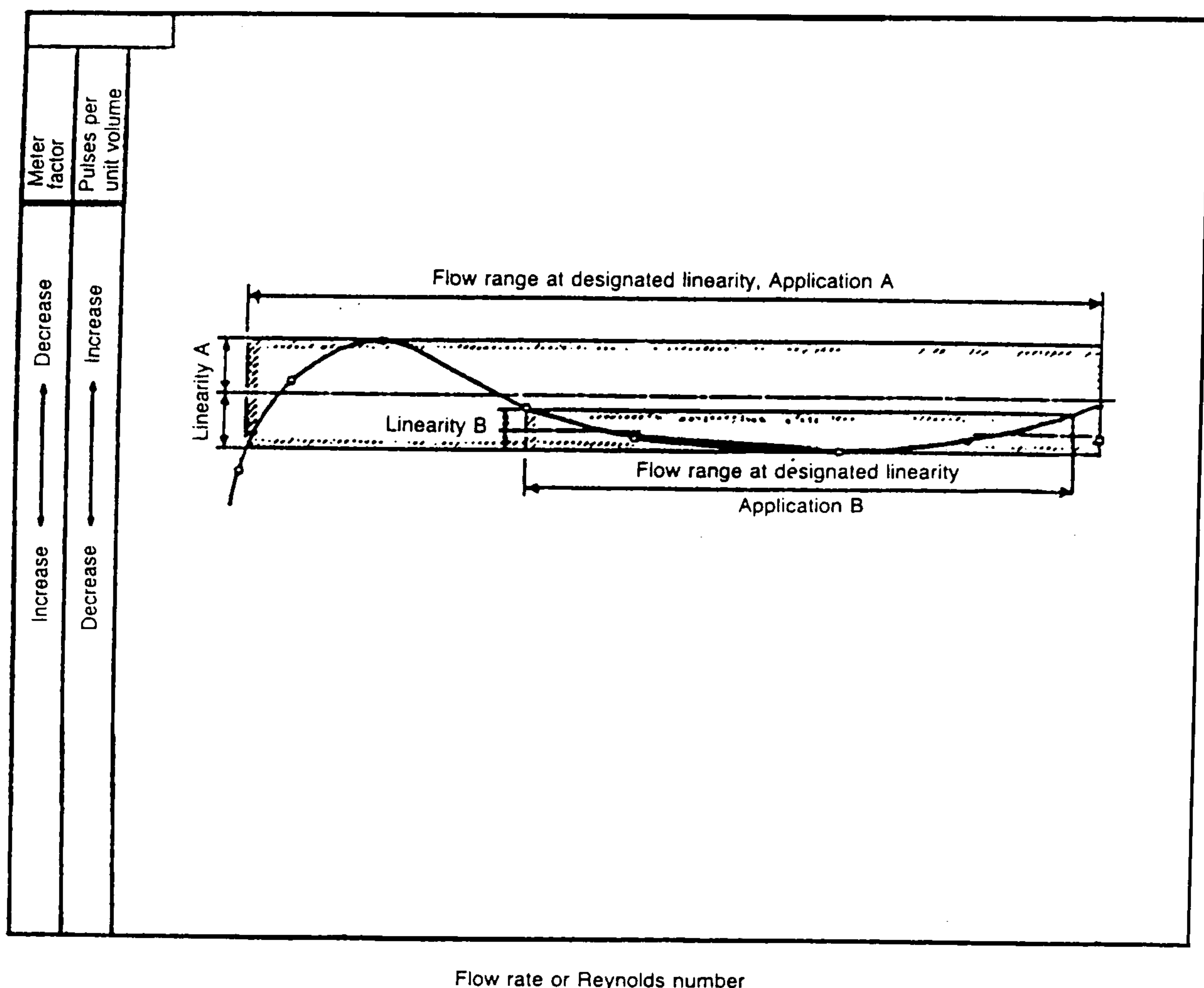
1. เมื่อมุมของความเร็วสัมผัส (β) มีค่าน้อย จะทำให้ความเร็วเชิงมุม (angular velocity) มีค่าน้อย และส่งผลให้สูญเสียค่า repeatability เนื่องจากการเสียดลอค (slip) ของเหลวผ่านเทอร์ไบน์มิเตอร์หรือเนื่องจากผลอิทธิพลของความหนืด

2. เมื่อมุมของความเร็วสัมผัส (β) มีค่ามาก จะทำให้ความเร็วเชิงมุม (angular velocity) มีค่ามาก นั่นจะเป็นสาเหตุเกิดแรงผลักดันในแนวเดียวกับแกนเพลารอเตอร์ (end thrust) มากเกินไปทำ

ให้เทอร์ไบน์มิเตอร์เกิดการสึกหรอเพราะความดันแตกต่างระหว่างก่อนและหลังตัวเทอร์ไบน์มิเตอร์
ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงให้มุมของใบพัดเทอร์ไบน์มีค่าอยู่ระหว่าง $20^{\circ} - 30^{\circ}$ เทียบกับทิศทางการไหล

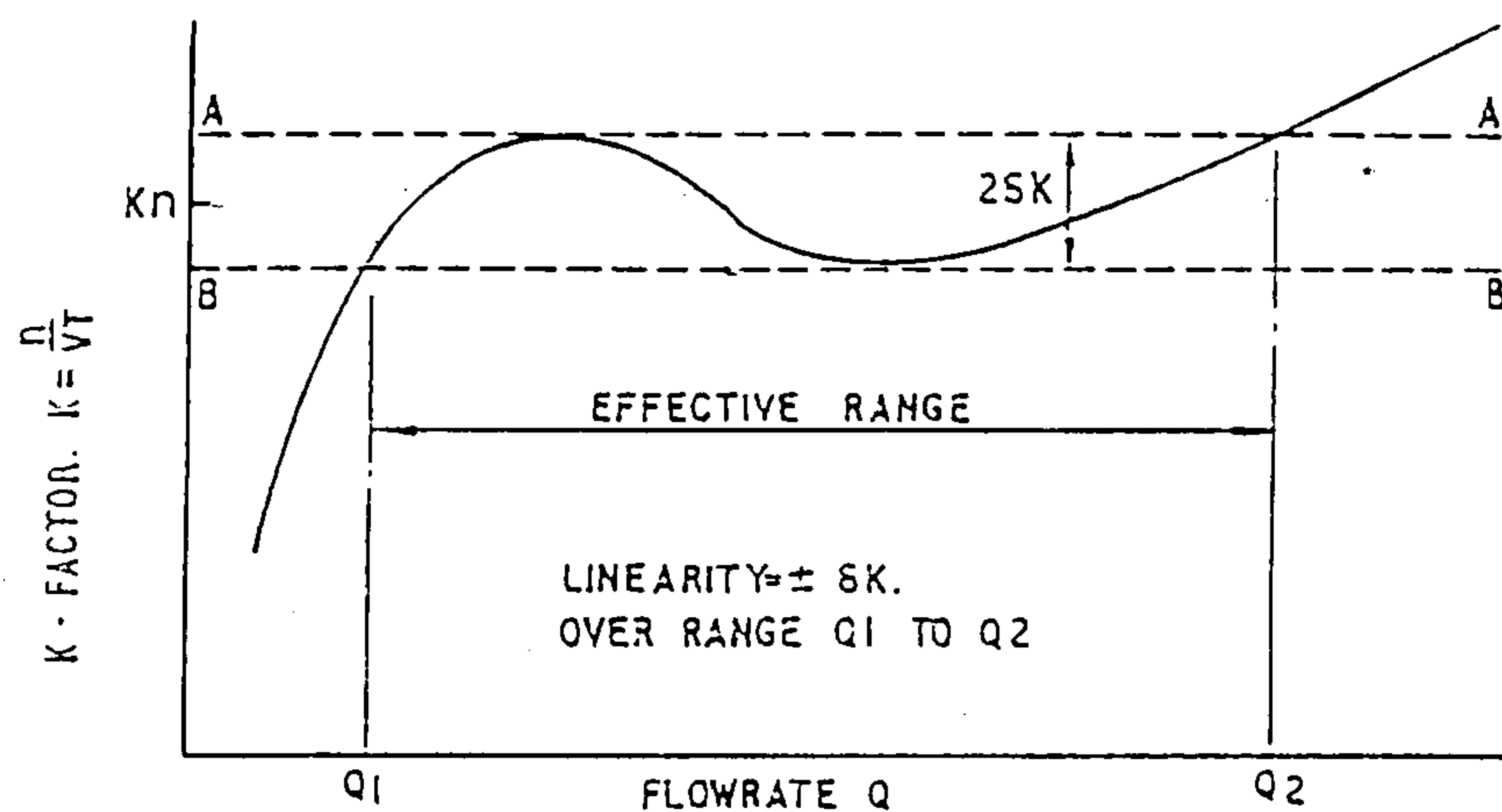
กราฟคุณสมบัติของเทอร์ไบน์มิเตอร์ (The Turbine Meter Characteristic Curve)

เทอร์ไบน์มิเตอร์ทุกตัวซึ่งใช้ในการวัดของเหลวมีกราฟแสดงลักษณะจำเพาะเป็นของตัวเอง (Characteristic Curve) ทำได้ด้วยการเขียนกราฟเขียนจุดความสัมพันธ์ระหว่างค่าเคแฟคเตอร์ (Kfactor) กับค่าอัตราการไหล (flowrate) (ดูรูป 42 , 43)



Note: This figure is illustrative only and should not be construed as representing the likely performance of any given model or size of turbine meter. The curve represents the characteristic performance of a turbine meter under stable operating conditions for flow rates within the manufacturer's capacity rating.

รูป 42 คุณสมบัติสมรรถนะทั่วไปของเทอร์ไบน์มิเตอร์



TURBINE METER CHARACTERISTIC CURVE.

รูป 43 กราฟลักษณะของเทอร์ไบน์มิเตอร์

เคแฟคเตอร์ (K-factor) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ประจำตัวของเทอร์ไบน์มิเตอร์มีหน่วยเป็น “พัลส์(Pulse)/หน่วยปริมาตร” เช่น Pulse/ลูกบาศก์เมตร ซึ่งทางบริษัทกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ตัวนี้ว่า “มิเตอร์แฟคเตอร์ (Meter-factor)” มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร/Pulse

เทอร์ไบน์มิเตอร์ที่ดีที่สุดจะมีค่าลักษณะความเป็นเชิงเส้น (Linearity) เท่ากับ $\pm K$ แต่ในบางครั้งจะมีค่าภายใน $\pm 0.25\%$ ของ nominal K-factor ; K_n ตลอดช่วงประสิทธิภาพของอัตราการไหล (an effective range of flowrates) ซึ่งเท่ากับ 10:1

ในทางอุดมคติ ค่าเคแฟคเตอร์ (K-factor) ของเทอร์ไบน์มิเตอร์จะเป็นเส้นตรงมีค่าคงที่ทุกๆ อัตราการไหล แต่ในความเป็นจริงปกติแล้วค่าเคแฟคเตอร์ (K-factor) จะเปลี่ยนแปลงและมีค่าต่ำที่อัตราการไหลต่ำ ซึ่งทำให้เราไม่สามารถใช้มาตรวัดเพื่อทำการวัดในช่วงอัตราการไหลต่ำๆ ทั้งนี้ก็เพราะค่า C_D (coefficient of drag) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Reynold's number มีค่าต่ำ อีกทั้งความเสียดทานแบร์ริง (Bearing friction) เพิ่มมากขึ้นขณะที่เทอร์ไบน์มิเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบต่ำ

เมื่ออัตราการไหลมีค่าสูงขึ้นมากๆ ค่าเคแฟคเตอร์ (K-factor) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกันจนไม่สามารถยอมรับได้เพราะค่าเคแฟคเตอร์ (K-factor) ไม่ได้ให้ผลการวัดที่น่าเชื่อถือถูกต้องแม่นยำ ทั้งนี้ก็เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นปรากฏการณ์การไหล (complex hydrodynamic effects) มีความซับซ้อนมากขึ้น

การใช้งานเทอร์ไบน์มิเตอร์จะใช้งานในช่วงที่ค่าเคแฟคเตอร์ (K-factor) มีค่าคงที่หรืออยู่ในย่านที่มีค่าผิดพลาดอยู่ในพิสัย เช่น 0.25% หรือ 0.50 % ค่าเคแฟคเตอร์ (K-factor) นี้เป็นค่าสำคัญเพราะเมื่อมีค่าเปลี่ยนไปหมายถึงค่าที่วัดได้จะผิดไปด้วย

ดังนั้นจุดประสงค์ที่สำคัญในการพัฒนาทฤษฎีเทอร์ไบน์มิเตอร์ของผู้ผลิตออกแบบมาตรวัดดังกล่าวนี้ จะช่วยพัฒนาปรับปรุงความเป็นเชิงเส้นตรงของมาตรวัด (Linearity of meter) ให้มีค่ามากขึ้นภายในช่วงการวัดได้ อีกทั้งขยายช่วงการวัดได้ของเทอร์ไบน์มิเตอร์ด้วย

การออกแบบและการติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์ **(TURBINE METERS-DESIGN AND INSTALLATION)**

เทอร์ไบน์มิเตอร์ประกอบด้วยตัวเรือนเป็นท่อนสั้นๆท่อนหนึ่ง ภายในจะมีลูกปืน (bearing) ติดตั้งอยู่ตรงกลางท่อ ระหว่างลูกปืนจะมีเทอร์ไบน์ (turbine) จำนวน 1 ตัวหรือ 2 ตัวแล้วแต่บริษัทผู้ผลิต เส้นผ่าศูนย์กลางเทอร์ไบน์ (turbine) จะมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อที่เป็นตัวเรือนของเทอร์ไบน์มิเตอร์ ตัวโรเตอร์จะหมุนได้อิสระด้วยลูกปืนรองรับการหมุนดังกล่าวและจะหมุนก็ต่อเมื่อมีของเหลวหรือก๊าซไหลผ่านมาตรวัด ดังนั้นโรเตอร์ของเทอร์ไบน์มิเตอร์ (turbine meter rotor) จะเป็นตัวบ่งบอกปริมาตรของเหลวที่ไหลผ่าน (ได้จากอัตราการหมุนของโรเตอร์) โดยจะเป็นสัดส่วน (หรืออยู่ในค่าขอบเขตค่าหนึ่ง) กับความเร็วการไหลของเหลว จึงยากต่อการคำนวณหาปริมาตรที่เคลื่อนผ่านไปในแต่ละรอบการหมุนของโรเตอร์เนื่องจากของไหลที่ไหลผ่านไปไม่ได้ถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆเหมือนเช่นเดียวกับมาตรวัดชนิด Positive displacement เพราะฉะนั้นก่อนที่จะนำเทอร์ไบน์มิเตอร์ (turbine meter) เพื่อทำการวัดอัตราการไหลจึงจำเป็นต้องได้รับการตรวจสอบ (proving) เสียก่อน

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและการติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์เพื่อใช้วัดของเหลวซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวสถานะเดียวเท่านั้น โดยไม่ครอบคลุมถึงการไหลของเหลวแบบ 2 สถานะ (two-phase fluid) นั่นคือมีสถานะทั้งของเหลวและไอน้ำภายในระบบท่อ

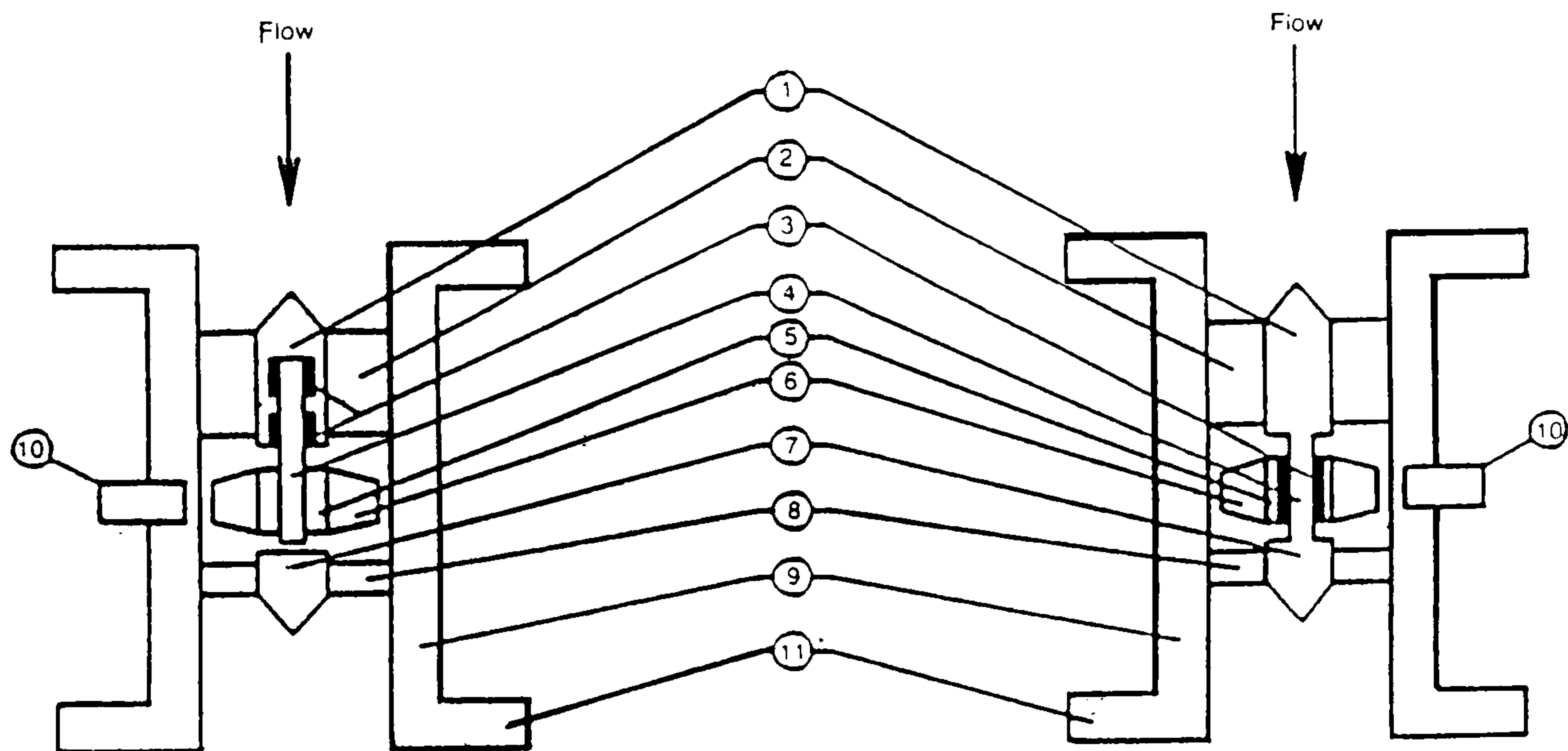
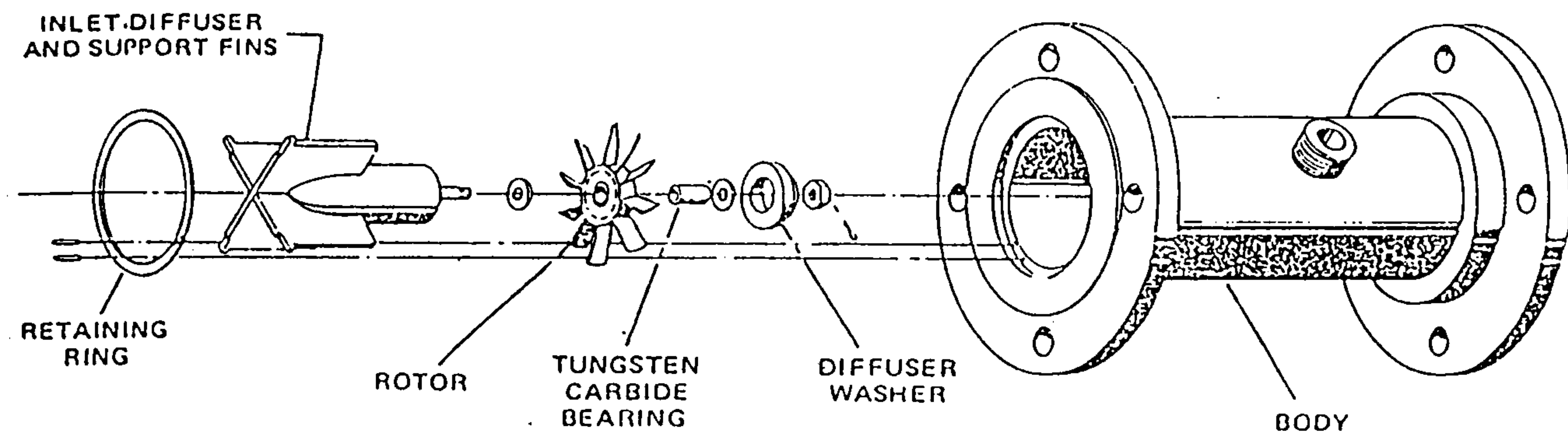
การบันทึกค่าปริมาตร (Volume Registration)

เนื่องจากปริมาตรของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดเป็นสัดส่วนหรือ (อยู่ในค่าขอบเขตค่าหนึ่ง) กับจำนวนรอบการหมุนของโรเตอร์ ดังนั้นเพื่อที่จะให้รู้จำนวนรอบการหมุนดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้วิธีการใดวิธีการหนึ่งดังต่อไปนี้

1. ใช้กลไกการนับ (mechanical counter) ซึ่งต่อกับเพลลาของโรเตอร์
2. นับจำนวนสัญญาณพัลส์ (pulse) ซึ่งผลิตโดยโรเตอร์ขณะกำลังหมุนอยู่
3. การส่องฉายแสงแล้วตรวจจับด้วย optical instrument

แต่ในทางปฏิบัติแล้ววิธีการในข้อที่ 1 ตัวนับ (counter) จะถูกขับเคลื่อนโดยกลไก จึงทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน เพราะให้ค่าเค-แฟคเตอร์ (K-factor) มีค่าความเป็นเชิงเส้นตรง (linearity) ได้ในช่วงแคบๆอีกทั้งหากต้องการมาตรวัดซึ่งให้ค่าความแม่นยำสูงวิธีการดังกล่าวก็ไม่ควรนำมาใช้กับการหาจำนวนรอบการหมุนโรเตอร์ ด้วยเหตุนี้มาตรวัดที่ใช้งานในการวัดคำนวณภาวอากาศหรือการคำนวณจึงไม่นิยมใช้วิธีการที่ 1.

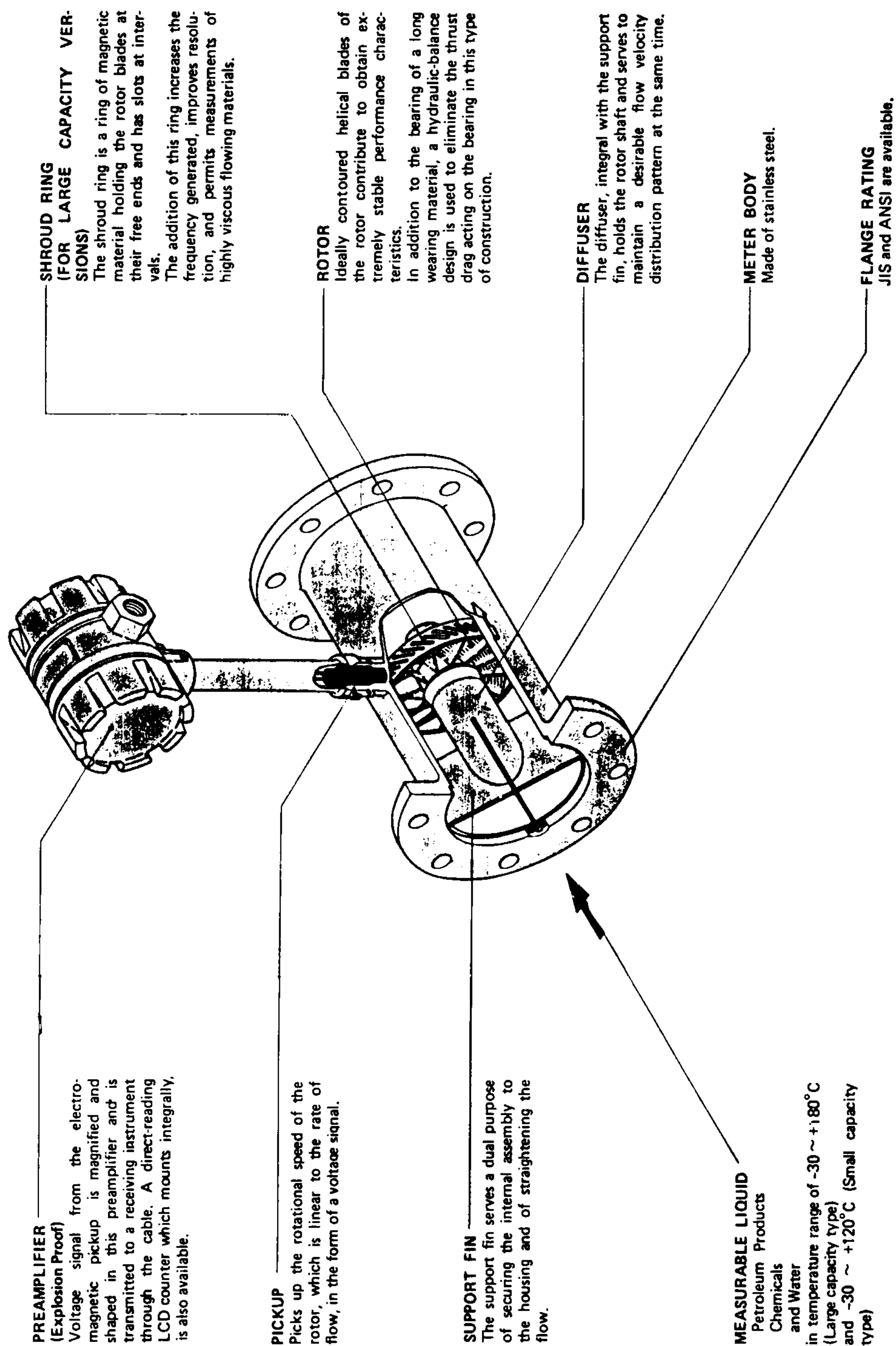
TYPICAL TURBINE METER



1. Upstream stator.
2. Upstream stator supports.
3. Bearings.
4. Shaft.
5. Rotor hub.
6. Rotor blade.

7. Downstream stator.
8. Downstream stator supports.
9. Meter housing.
10. Pickup.
11. End connections.

รูป 44 ส่วนประกอบพื้นฐานเทอร์ไบน์มิเตอร์



รูป 45 ส่วนประกอบและหน้าที่ของแต่ละชิ้นส่วนของเทอร์ไบน์มิเตอร์

วิธีการสร้างห้วงพัลส์ (Pulse generation)

เมื่อการวัดจำนวนรอบการหมุนโรเตอร์ด้วยวิธีการนับอิเล็กทรอนิกส์พัลส์ (electronic pulse) ถูกนำมาใช้ การสร้างห้วงพัลส์ในเทอร์ไบน์มิเตอร์ จะมีด้วยกัน 2 วิธี

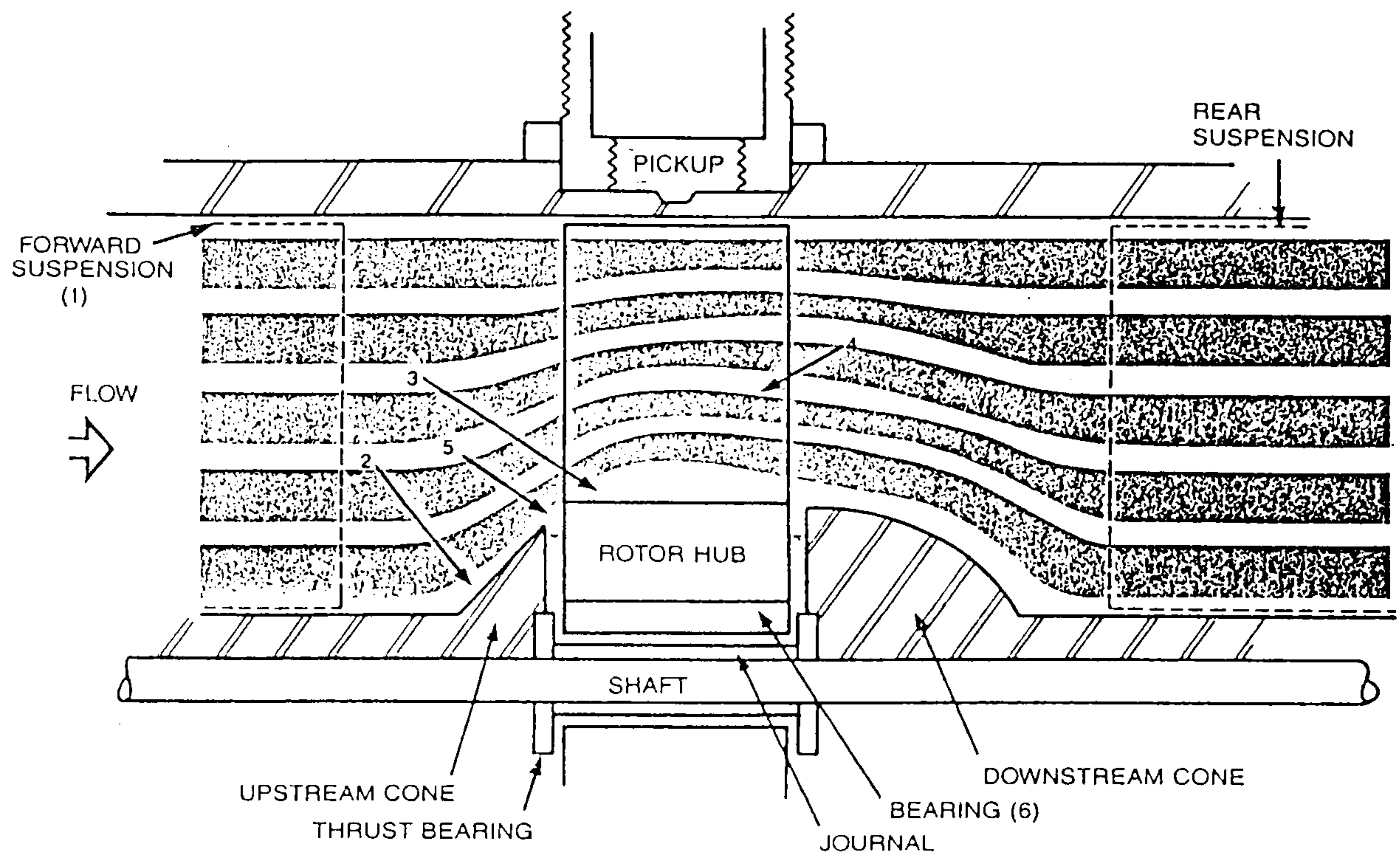
1. การเหนี่ยวนำ (Inductance) เมื่อโรเตอร์หมุนเนื่องจากของไหลไหลผ่าน turbine แม่เหล็กถาวรติดตั้งอยู่บนปลายโรเตอร์ (rotor vane tips) หรืออยู่ในกระดุม (hub) หรือเพลลาของโรเตอร์จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในขดลวดรับ (pick-up coil) เพราะว่าการทำให้ฟลักซ์สนามแม่เหล็ก (magnetic flux) เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการหมุนของแม่เหล็กถาวรจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นในขดลวด

2. รีลักแตนซ์แปรค่า (variable reluctance) เมื่อโรเตอร์ของเทอร์ไบน์มิเตอร์เป็นโรเตอร์แม่เหล็ก (a ferrous rotor) ได้หมุนผ่านปลายขดลวดรับ ซึ่งเป็นขดลวดพันอยู่บนแกนเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (magnetized core) ดังนั้นการหมุนของโรเตอร์เวน (rotor vane) ในแต่ละครั้งจะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กภายในขดลวดรับแปรเปลี่ยนไป สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่มีออกมาในรูปของพัลส์ (pulse) ของแรงดันไฟฟ้าซึ่งมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ โดยที่ความถี่ของพัลส์เป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับความเร็วเชิงมุม (angular velocity) ของโรเตอร์และอัตราการไหล พัลส์จะถูกนับจำนวนรวมทั้งหมดด้วยตัวนับอิเล็กทรอนิกส์ (electronic counter) จากนั้นตัวนับอิเล็กทรอนิกส์ก็จะทำการแปรค่าสัญญาณรวมทั้งหมดให้เป็นค่าปริมาตรรวมทั้งหมด (total volume) ส่วนความถี่ของพัลส์ก็จะเป็นตัวบ่งบอกอัตราการไหล (rate of flow)

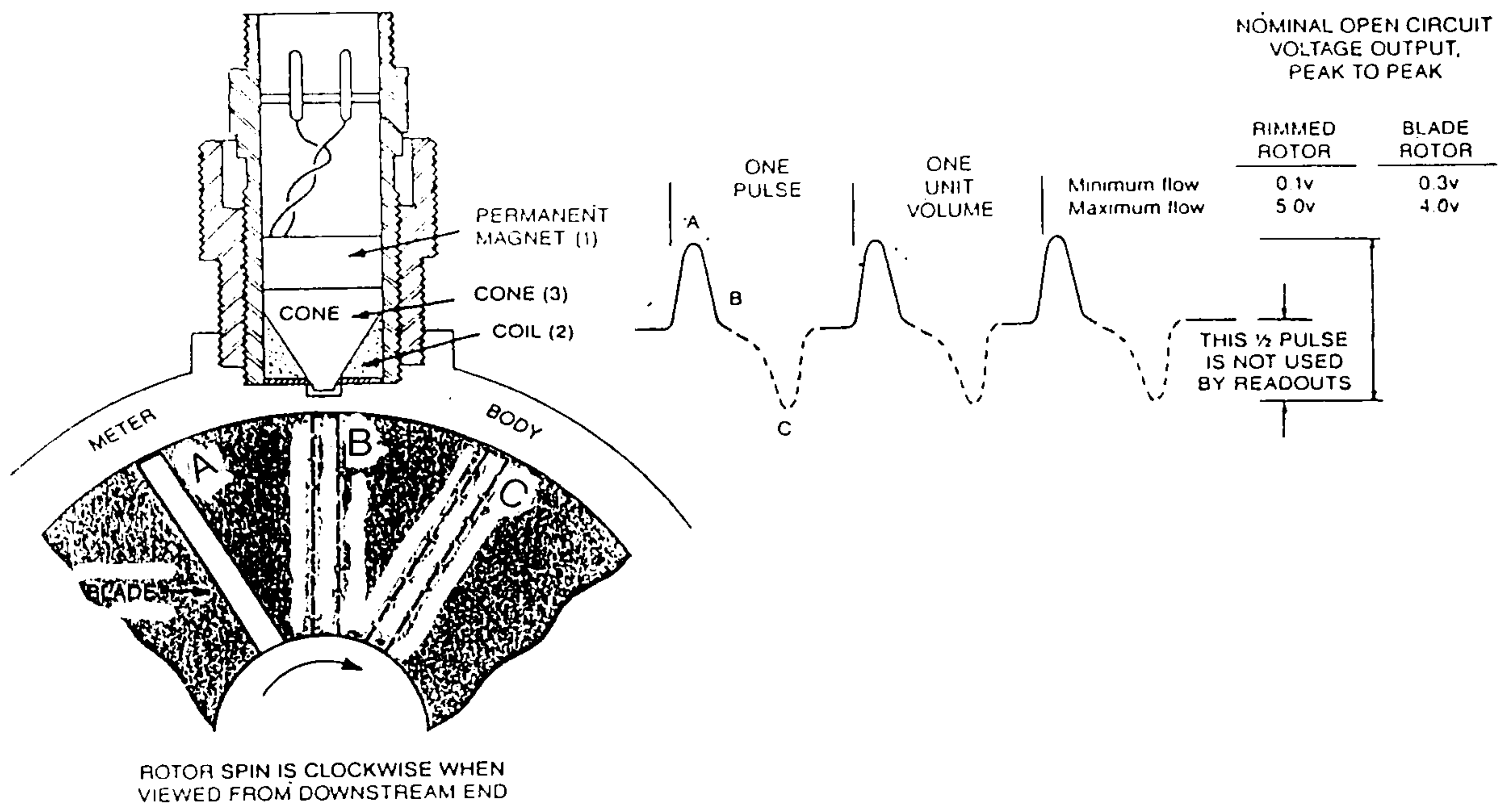
แต่ละพัลส์จะเป็นสัดส่วนกับปริมาตรของเหลวหน่วยเล็กๆค่าหนึ่ง จากรูป 47 จะเห็นได้ว่าแม่เหล็กถาวร (1) จะผลิตสนามแม่เหล็กผ่านขดลวด (2) โดยชิ้นส่วนรูปโคน (3) จะเป็นตัวทำให้สนามแม่เหล็กเข้มข้นเป็นจุดบริเวณปลายโคน เมื่อใบพัดเทอร์ไบน์หมุนเริ่มจากตำแหน่ง (A) เคลื่อนเข้าใกล้จุดของรูปโคน (3) สนามแม่เหล็กจะถูกรบกวนเพราะตัวใบพัดซึ่งเป็นแม่เหล็ก จึงก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นภายในขดลวดเมื่อใบพัดอยู่ในตำแหน่งรูปโคน ณ ตำแหน่ง (B) แรงดันไฟฟ้าดังกล่าวจะลดลงแต่จะเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามเมื่อใบพัดเริ่มเคลื่อนที่ห่างออกไปจากจุดปลายโคน ณ ตำแหน่ง (C) เพราะใบพัดทำให้สนามแม่เหล็กเปลี่ยนไปในทิศทางตรงข้าม ดังนั้นเมื่อใบพัดแต่ละตัวหมุนผ่านชิ้นส่วนปลายโคนก็จะก่อให้เกิดพัลส์แรงดันไฟฟ้าขึ้นเป็นจังหวะๆแตกต่างกันไปเป็นพัลส์ๆ ด้วยเหตุนี้พัลส์แต่ละพัลส์จึงแทนปริมาตรหน่วยหนึ่งซึ่งล้อมรอบแต่ละใบพัด

3. Photoelectric system เมื่อใบพัดโรเตอร์ (หรือชิ้นส่วนที่ได้รับการออกแบบมาโดยเฉพาะ) หมุนผ่านลำแสงที่ผลิตอยู่ตลอดเวลา เมื่อลำแสงถูกบังเป็นจังหวะขึ้นอยู่กับจำนวนใบพัดโรเตอร์หรือชิ้นส่วนที่ได้รับการออกแบบทำให้มีการผลิตสัญญาณพัลส์เกิดขึ้น

4. Magnetic Reed-Switch System หน้าสัมผัสของสวิทช์ (a reed switch) จะถูกทำให้เปิดหรือปิดโดยแม่เหล็กซึ่งฝังอยู่ในโรเตอร์หรือในชิ้นส่วนที่ได้รับการออกแบบและถูกขับให้หมุนโดย โร

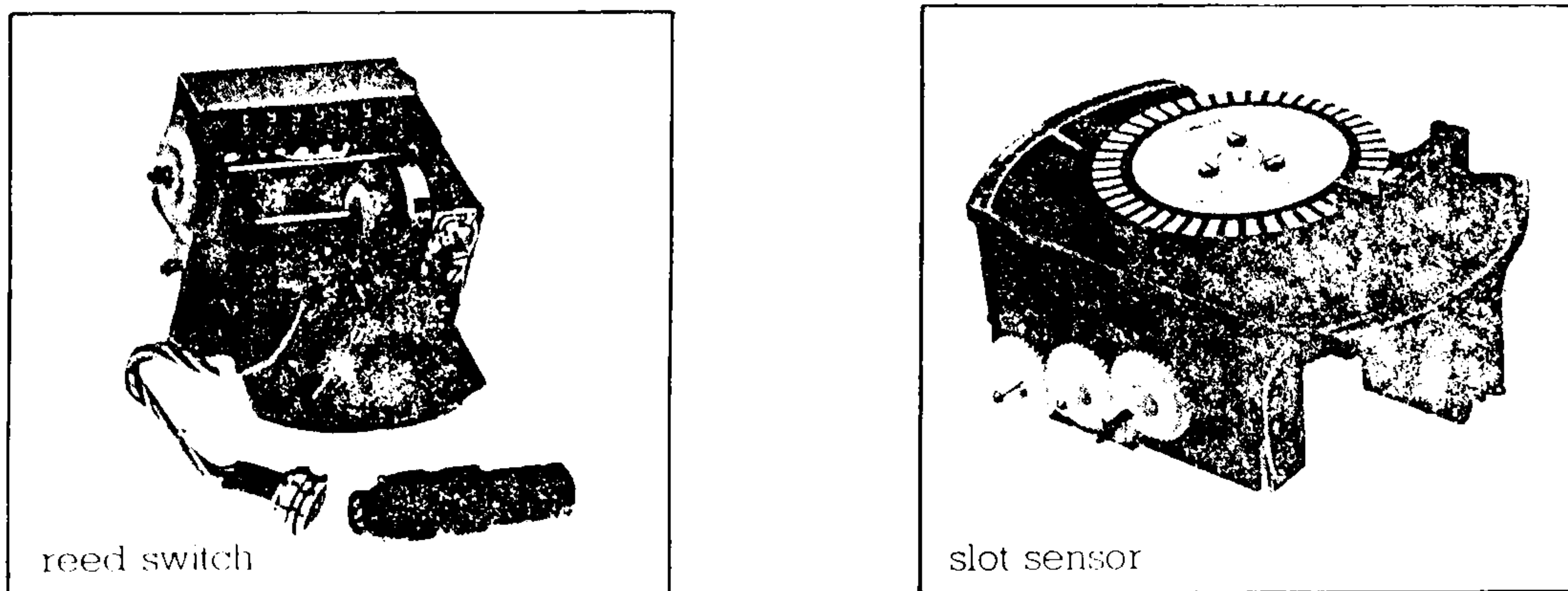


รูป 46 รูปตัดแสดงการทำงานของ Pickup Coil

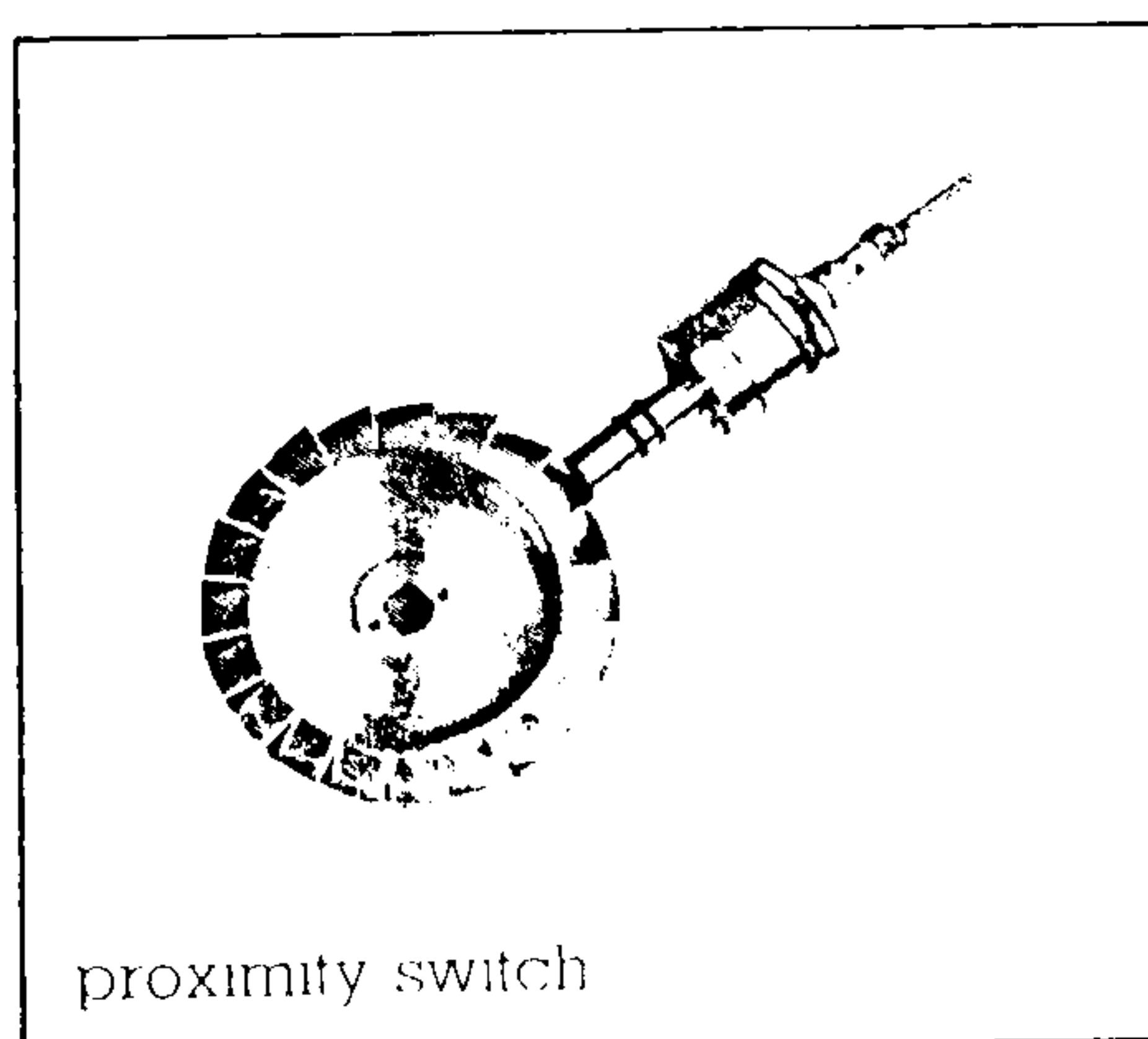


รูป 47 ขั้นตอนการกำเนิดพัลส์ของเทอร์ไบน์มิเตอร์

เตอร์ การปิดเปิดของสวิทช์ดังกล่าวจะเป็นตัวตัดตอนสัญญาณที่ป้อนเข้ามาอย่างสม่ำเสมอเป็นผลให้เกิดพัลส์ (ดูรูป 48)

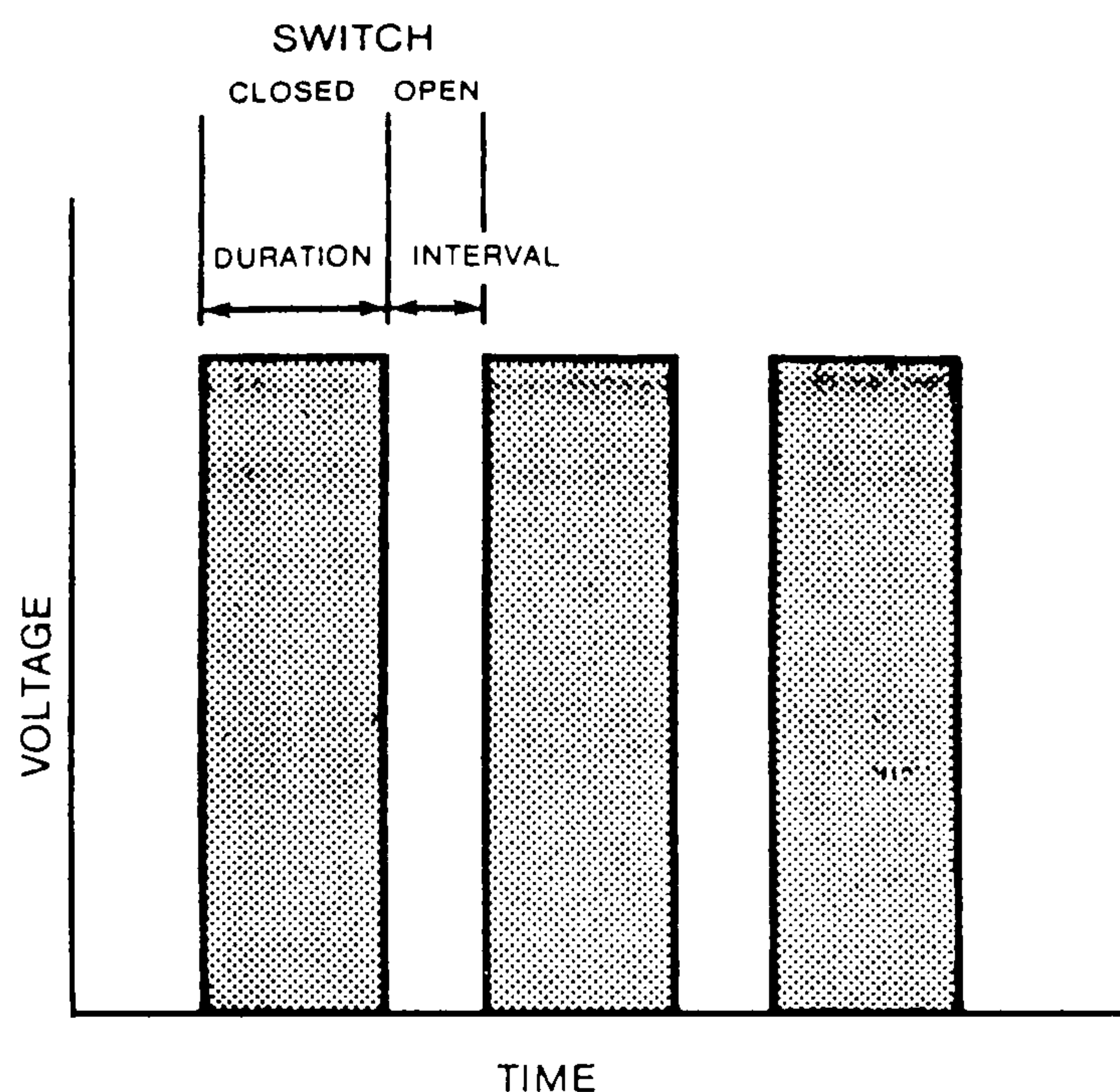


รูป 48 ตัวกำเนิดความถี่ต่ำ (Low-Frequency Pulser)



รูป 49 ตัวกำเนิดความถี่สูง (High-Frequency Pulser)

เมื่อพิจารณาถึงหลักการทำงานของทั้ง 4 วิธีแล้ว พบว่าวิธีที่ 1 และวิธีที่ 2 เป็นตัวกำเนิดสัญญาณพัลส์โดยแท้จริง เพราะความถี่ของสัญญาณและขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตออกมาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วรอบของโรเตอร์ ส่วน Photoelective system และ Magnetic Reed-Switch System เป็นการใชความดันไฟฟ้าคงที่จากแหล่งภายนอกตัวมาตรวัด โดยทำให้เกิดการตัดตอนหรือสัญญาณขาดเป็นช่วงๆเกิดเป็นสัญญาณพัลส์มีลักษณะแทบจะเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (square-wave) ดูรูป 50 ถึงแม้ความถี่ของสัญญาณที่ผลิตออกมาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วรอบโรเตอร์



รูป 50 สัญญาณพัลส์

แต่ขนาดแรงดันไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงระยะค่าศูนย์ถึงค่าแรงดันที่ป้อนมาจากภายนอกไม่มีความสัมพันธ์หรือเกี่ยวเนื่องกับความเร็วรอบของ โรเตอร์แต่อย่างใด สัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นมีความแรงของสัญญาณสูง (high-level signal) ซึ่งง่ายต่อการแทรกสอดจากสัญญาณภายนอก

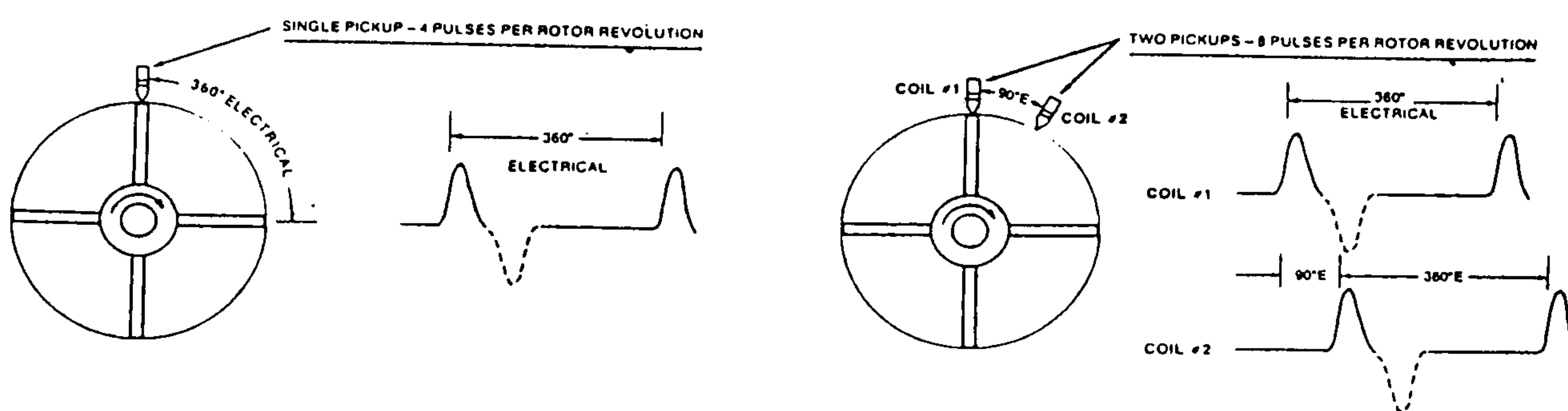
ไม่ว่าระบบการบันทึกปริมาณจะใช้กลไกการนับหรือนับสัญญาณพัลส์ ก็ได้รับผลกระทบในบางช่วงการวัดจากแรงดูด (pick-up drag) บนโรเตอร์เช่นกัน อย่างไรก็ตามตัวนับแบบกลไก (mechanical counter) ต้องการแรงบิดเพื่อขับเคลื่อนกลไกการนับจำนวนมากกว่าแรงบิดที่ใช้เพื่อผลิตสัญญาณพัลส์เพื่อส่งไปยังตัวนับอิเล็กทรอนิกส์ (electronic counter) ในกรณีที่ต้องการให้มีการแสดงค่าปริมาณติดตั้งอยู่บนตัวมาตรวัดสามารถใช้ได้ทั้งตัวนับแบบกลไก (mechanical counter) หรือ เป็นตัวนับแบบอิเล็กทรอนิกส์ (electronic counter) ซึ่งก็ต้องจัดหาแหล่งพลังงานไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับขดลวดรับ (pick-up coil) ด้วย

การรักษาความปลอดภัยของสัญญาณพัลส์ (Pulse security)

เมื่อสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์พัลส์ (electronic pulses) ซึ่งผลิตเนื่องจากการหมุนของโรเตอร์ภายใน เทอร์ไบน์มิเตอร์ถูกส่งไปยังตัวบันทึกค่าปริมาณ แต่เนื่องจากว่าสัญญาณดังกล่าวมีความแรงของสัญญาณต่ำมากๆ (very low-level signal) ในบางครั้งมีค่าเพียง 2-3 มิลลิวัตต์เท่านั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องให้ความสำคัญต่อสัญญาณดังกล่าวไม่ให้เกิดการสูญเสียหรือเพิ่มเติม (loss or gain signal) ระหว่างการส่งสัญญาณจากตัวมาตรวัดไปยังตัวนับพัลส์ (pulse counter) อย่างเด็ดขาดเพราะมีผลต่อความแม่นยำในการวัด

ดังนั้นการรักษาความปลอดภัยของสัญญาณเพื่อไม่ให้เกิดการแก้ไขปรับปรุงผิดเพี้ยนไปจากพัลส์ที่ผลิตจริง จึงเป็นเรื่องที่ยากและซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตามก็มีระบบที่มีความละเอียดอ่อนสามารถทำการตรวจสอบการทำงานของระบบการวัดได้ด้วยตนเองเพื่อป้องกันความผิดพลาดและการแก้ไข แต่เป็นระบบค่อนข้างมีราคาแพงจึงไม่ค่อยจะพบเห็นบ่อยมากนัก

ผู้ผลิตมาตรวัดได้พัฒนาการรักษาความปลอดภัยของสัญญาณด้วยการติดตั้งขดลวดรับ (pick-up coil) เพิ่มขึ้น 1 หรือ 2 ตัวเข้ากับมาตรวัด รูป 51 ดังนั้นมาตรวัดบางตัวจะมีขดลวดรับทั้งหมด 2 หรือ



รูป 51 การเพิ่มตัว Pickup Coil เป็น 2 ตัว

3 ตัว เพื่อให้สัญญาณที่ส่งไปยังตัวนับจำนวนพัลส์ที่อยู่ห่างไกล (remote batch counter) จะได้รับพัลส์ (pulses) อย่างเดียวกับพัลส์ (pulses) ซึ่งผลิตโดยมาตรวัด ด้วยการป้อนสัญญาณ pulse ต่างกัน 2 ชุดให้กับตัวนับจำนวนสัญญาณ 2 ตัวที่ต่างกันเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณที่นับจริงซึ่งผลิตจากมาตรวัด ในกรณีมีขดลวดรับ (pick-up coil) จำนวน 3 ตัว ขดลวดตัวที่ 3 อาจจะเหลือไว้สำหรับการตรวจสอบมาตรวัด (proving)

ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดการส่งสัญญาณพัลส์จากมาตรวัดไปยัง ตัวนับอิเล็กทรอนิกส์ (electronic counter) สูญเสียหรือเปลี่ยนแปลงจำเป็นต้องแน่ใจว่า

1. สายสัญญาณควรเป็น screened type และทำการต่อสายกราวด์ (grounding) กับตัวนับ (counter) เท่านั้น รวมทั้งสายสำรองด้วย
 2. ต้องไม่ให้เกิดการลัดวงจรระหว่างฉนวนสาย (cable shield) กับท่อร้อยสาย (cable conduit) หรือสายตัวนำ (conductor cable)
 3. ต้องไม่เดินสายสัญญาณใกล้หรือขนานกับสายไฟฟ้าแรงดันสูง เพราะอาจเกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กขึ้นได้
 4. ควรมีแนวทางการเดินสายสัญญาณที่แน่นอนว่าสายใดเป็นอย่างไร
- นอกจากนี้สัญญาณวิทยุติดต่อกันระหว่างเรือ กับสถานีชายฝั่ง หรือ platforms ในทะเลจะมีผลกระทบต่อสายสัญญาณเช่นกัน

ค่าความละเอียดการวัด (Pulse/Volume resolution)

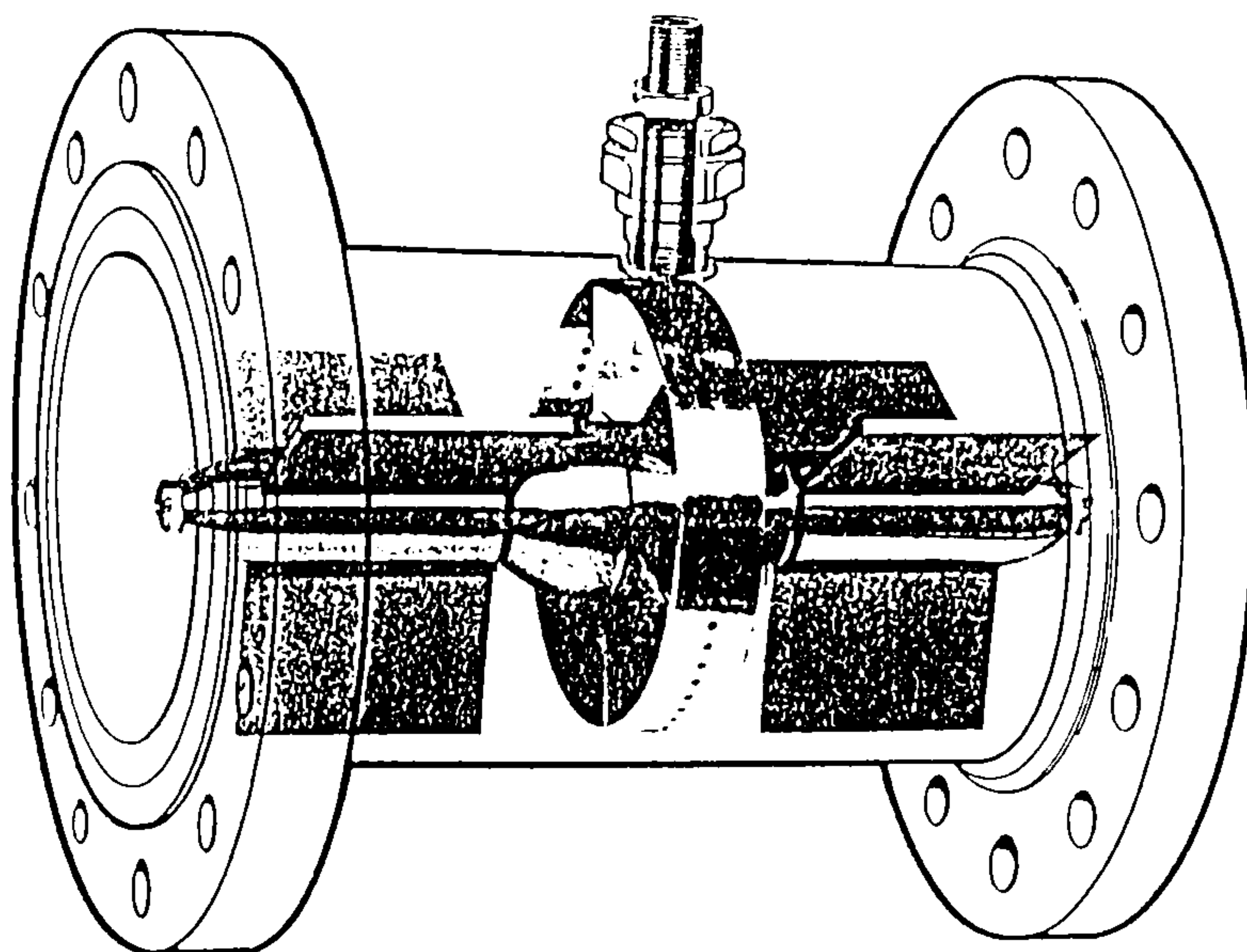
โดยทั่วไปแล้วเทอร์ไบน์มิเตอร์ขนาดเล็กหมุนด้วยความเร็วรอบสัมพัทธ์สูง ทำให้ผลิตจำนวนพัลส์ (pulse) ต่อ หน่วยปริมาตรจำนวนมาก แต่ขณะเดียวกันเทอร์ไบน์มิเตอร์ขนาดใหญ่ตั้งแต่ 3 นิ้วขึ้นไปมีแนวโน้มหมุนด้วยอัตราความเร็วรอบสัมพัทธ์ช้ากว่าในขณะที่ปริมาตรต่อการหมุนโรเตอร์มีค่ามาก ด้วยเหตุนี้จึงเห็นได้ชัดว่าค่าความละเอียดของ pulse/volume มีค่าต่ำ (poor pulse/volume resolution)

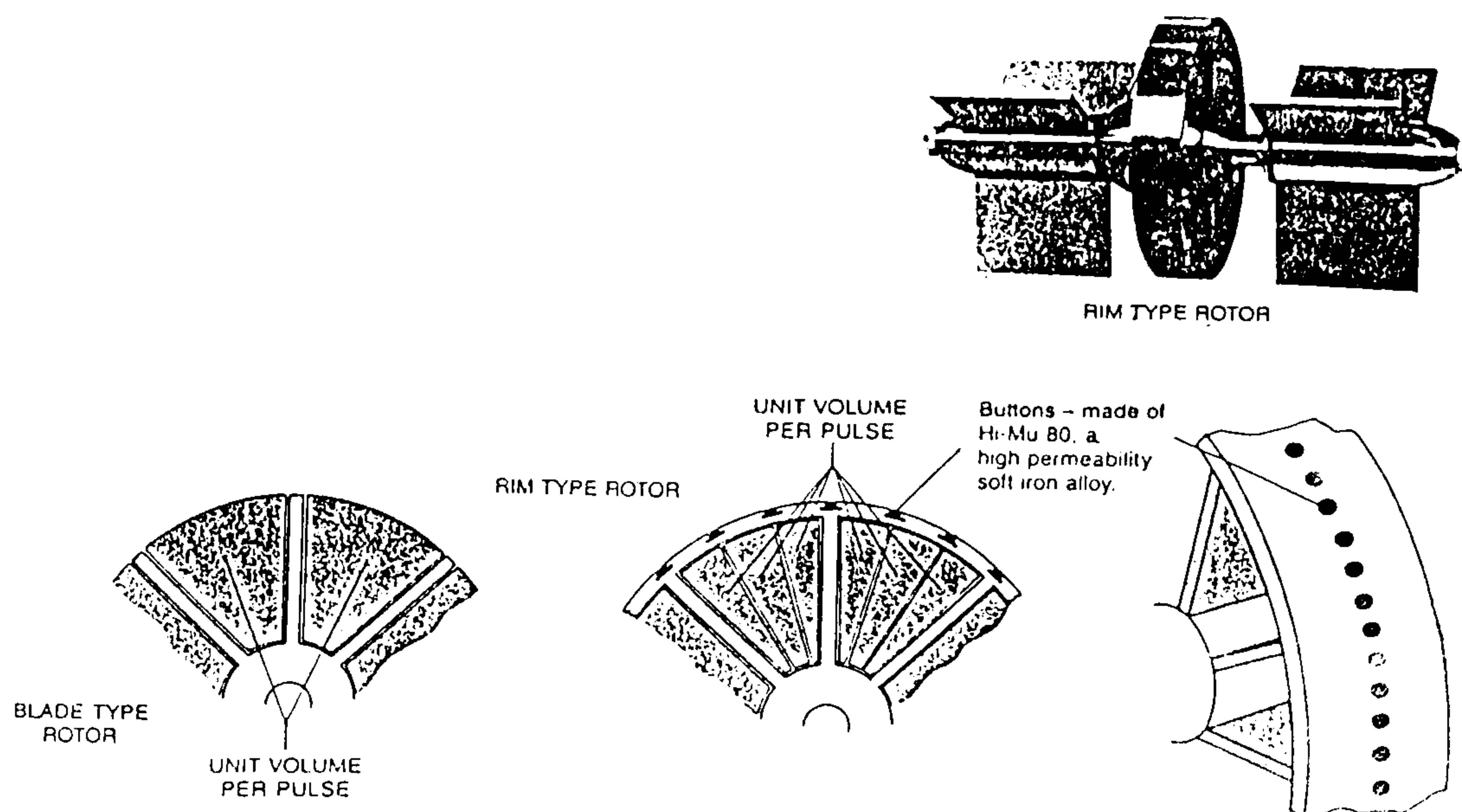
ความละเอียด pulse/volume ของเทอร์ไบน์มิเตอร์อาจปรับให้มีค่าความละเอียด (resolution) มากขึ้นด้วยวิธี

- แก้ไขด้วยกลไก (Mechanical solution)

1. ลดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวเรือนมาตรวัดจะทำให้ความเร็วของเหลวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จำนวนรอบและจำนวนพัลส์ที่เกิดขึ้นที่อัตราการไหลหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะเดียวกันก็มีผลเสียคือเมื่อจำนวนรอบการหมุนเพิ่มขึ้น อายุการใช้งานของลูกป็นซึ่งทำหน้าที่รองรับการหมุนของโรเตอร์สั้นลง อีกทั้งยังทำให้ความดันตก (pressure drop) ในตัวมาตรวัดเพิ่มมากขึ้น เมื่อความดันด้านก่อนเข้าและด้านออกจากตัวมาตรวัดมีค่าความดันต่างกันมากอันเนื่องมาจากความดันตกระหว่างตัวมาตรวัดมีค่าเพิ่มขึ้นอาจก่อให้เกิด Cavitation ขึ้นได้ ดังนั้นวิธีการลดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตัวเรือนมาตรวัดก็อาจจะไม่ได้ผลดีเท่าที่ควร แต่อย่างไรก็สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยใส่คอคอด (throttle) เพื่อเพิ่มความดันกลับ (back pressure) ให้มีค่าสูงขึ้น Cavitation ก็ไม่เกิดขึ้นแต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้ลดอัตราการไหลผ่านตัวมาตรวัด

2. เพิ่มจำนวนใบพัด (vanes) หรือ จำนวนแม่เหล็กถาวร (permanent magnetic slugs) ซึ่งติดอยู่บนปลายใบพัด (vane) แต่ละตัว ในทางปฏิบัติจะประสบปัญหาเรื่องการจัดวงแหวน (shrouding ring) ซึ่งมีจำนวนแม่เหล็กตัวกำเนิดสัญญาณ (signaling magnets) มาก (ดูรูป 52)





รูป 52 วิธีการปรับเทอร์โมมิเตอร์ให้แสดงค่าให้ละเอียดเพิ่มขึ้น

- แก้ไขด้วยอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic solution)

1. สามารถเพิ่มจำนวนพัลส์ให้เป็น 2 เท่าได้ด้วยการใส่ตัวแปรคูณสองเท่า (X2 factor) เข้าไปในตัวนับอิเล็กทรอนิกส์ (electronic counter) โดยแต่ละพัลส์ที่เกิดขึ้นจะถูกแสดงค่าเป็น 2 พัลส์ แต่ไม่คิดช่วงเวลา (time interval) ระหว่างแต่ละพัลส์ ด้วยเหตุนี้ระบบการแก้ไขด้วยวิธีการนี้จึงไม่ได้เพิ่มความแม่นยำการวัดแต่อย่างใด

2. โดยปกติแล้วตัวนับอิเล็กทรอนิกส์ (electronic counter) จะเริ่มนับด้วยการกระตุ้นจากพัลส์ (pulse) เมื่อถึงตำแหน่งต้นพัลส์ของแต่ละพัลส์ที่มีตามมา เมื่อเพิ่มการกระตุ้นให้ตัวนับดังกล่าว นับสัญญาณในตำแหน่งปลายสัญญาณพัลส์ขึ้นมาอีกจะทำให้ค่าความละเอียดการวัด (resolution) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าและให้นับช่วงเวลาแต่ละพัลส์ด้วย

ช่วงระยะพัลส์ (pulse interval) จะมีความสำคัญก็ต่อเมื่อมีการนับพัลส์แต่ละชุด (batch) หรือแต่ละการทดสอบ (meter proving) ซึ่งขณะนั้นมีจำนวนน้อยๆ แต่ถ้าหากจำนวนพัลส์มีจำนวนมากและใช้แบบมาตรวัดชนิด pipe prover ในการสอบเทียบมาตรวัดพบว่าความเป็นระเบียบสม่ำเสมอของช่วงระยะพัลส์ก็จะเป็นไม่มีความสำคัญแต่อย่างใด

3. การสอดแทรก pulse (pulse interpolation) คือไม่เพียงแต่นับจำนวนแต่ละพัลส์ ยังตรวจสอบและประเมินช่วงระยะพัลส์อีกด้วย วิธีการนี้ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นอย่างมากเมื่อต้องการเพิ่มค่าความละเอียดการวัด (pulse/volume resolution)

การติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์ (Installation)

โดยทั่วไปแล้วเทอร์ไบน์มิเตอร์ค่อนข้างจะมีความกระตือรือร้นมากกว่าเมื่อเทียบกับมาตรวัดชนิด positive displacement meter ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและอัตราการไหลที่เท่ากัน

แต่อย่างไรก็ตามหากทำการติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์เพื่อให้ได้ผลการวัดแม่นยำเป็นที่น่าเชื่อถือ เทอร์ไบน์มิเตอร์ต้องการเนื้อที่ในการติดตั้งและอุปกรณ์เสริมการทำงานมากกว่า displacement meter ก็ เพราะว่าการไหลในท่อส่วนใหญ่ซึ่งเกิดขึ้นจริงมีลักษณะเป็นแบบการไหลปั่นป่วน (turbulent flow) และเทอร์ไบน์มิเตอร์ก็ถูกออกแบบเพื่อให้ใช้งานกับการไหลแบบปั่นป่วน (a fully developed turbulent flow profile) โดยเฉพาะอยู่แล้ว แต่เนื่องจากรูปแบบการไหล (velocity profile) ของการไหลแบบปั่นป่วนง่ายต่อการถูกทำลายไป เช่นเมื่อไหลผ่านข้อหรือมีเนื้อโลหะหลุดเชื่อมยื่นล้ำเข้าไปในท่อด้าน ในเนื่องจากการเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน , หน้าแปลนท่อไม่ได้แนวตรงกันมีการเหลื่อมกัน เป็นต้น การ ที่ให้รูปแบบการไหลที่ถูกทำลายไปกลับคืนมาเป็นรูปแบบการไหลสมบูรณ์เหมือนเดิมเป็นเรื่องที่ต้องใช้ ระยะเวลาานานพอสมควร ดังนั้นถ้ารูปแบบการไหลของการไหลแบบปั่นป่วนได้ถูกทำลายไปแล้วไหล ผ่านเทอร์ไบน์มิเตอร์จะส่งผลก่อให้เกิดค่าความผิดพลาดและไม่น่าเชื่อถือในการวัด ในขณะที่เดียวกัน อัตราการหมุนของโรเตอร์ก็จะไม่สะท้อนผลจริงๆของจำนวนของไหลซึ่งไหลผ่านเทอร์ไบน์มิเตอร์ อีกทั้งโรเตอร์จะหมุนไปอย่างสับสนไม่แน่นอนเนื่องจากความเร็วการไหลมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

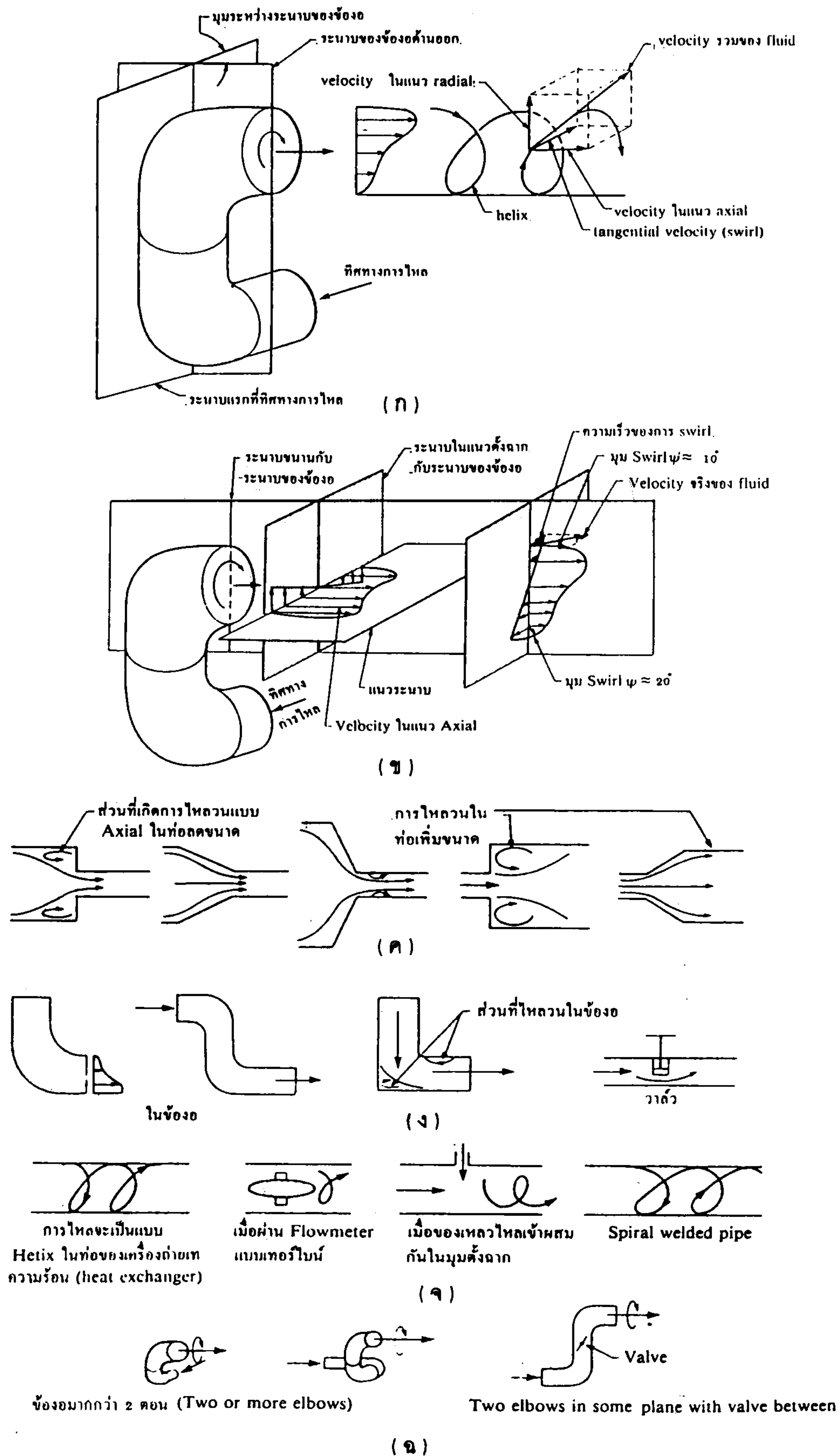
ผลการวัดด้วยเทอร์ไบน์มิเตอร์ในกรณีที่เลวร้ายที่สุด เกิดขึ้นเมื่อมีการไหลหมุนวน (swirl) เกิดขึ้นภายในท่อ รูป 53 การไหลหมุนวนเป็นการไหลโดยที่ของเหลวมีการหมุนรอบแกนทั้ง 3 มิติ (3-dimensional rotation) ผลการวัดจึงขึ้นกับการไหลหมุนวนดังกล่าวจะมีทิศการหมุนวนไปในทิศทางเดียวกับการหมุนของโรเตอร์หรือหมุนวนในทิศทางตรงข้ามกับการหมุนของโรเตอร์ ด้วยเหตุนี้ จะทำให้อัตราการหมุนของเทอร์ไบน์เร่งเพิ่มขึ้น หรือหน่วงลดลง นั้นหมายถึงอาจจะมิของเหลวไหล ผ่านมาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์น้อยเกินไปหรือมากเกินไป ตามลำดับ

เพื่อหลีกเลี่ยงรูปแบบการไหลที่ถูกทำลายไปรวมทั้งปัจจัยต่างๆที่ต้องพิจารณาอย่างระมัดระวัง ก่อนที่จะทำการติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์

- เทอร์ไบน์มิเตอร์ที่นำมาติดตั้งควรสามารถทำงานได้ที่อัตราการไหลสูงสุดและต่ำสุด (maximum and minimum flowrate) , ความดันใช้งานสูงสุด (maximum operating pressure) และช่วง อุณหภูมิใช้งานและสามารถใช้กับชนิดของเหลวที่จะทำการวัดได้โดยไม่มีปัญหาเช่นการกัดกร่อน เป็นต้น และถ้าจำเป็นก็ควรคำนึงถึงอุปกรณ์ป้องกันอื่นๆ เพื่อให้เทอร์ไบน์มิเตอร์สามารถใช้งานได้ ตามที่ออกแบบไว้

- การติดตั้งต้องคำนึงถึงอายุการใช้งานของเทอร์ไบน์มิเตอร์ให้มีอายุการใช้งานสูงสุดเท่าที่จะทำ ได้ เช่นมีการป้องกันมาตรวัดจากของแข็ง , ฟองอากาศที่แผ่มากับของเหลวซึ่งทำการวัดอยู่ เป็นต้น โดยใช้ strainer , filter , air/vapor eliminator หรืออุปกรณ์อื่นๆเทียบเท่า

- ต้องคำนึงถึงเมื่อติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์แล้วระบบการวัดจะมีความดันเพียงพอทำให้ของเหลว อยู่ในสถานะเดียวตลอดเวลาที่ทุกๆอุณหภูมิการใช้งาน



รูป 58 แสดงการเปลี่ยนแปลงทิศทางของ Velocity ในข้อต่อและข้องอรวมถึงอุปกรณ์แบบอื่น.

- ต้องจัดให้มีวิธีการสอบเทียบ (proving) มาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์ได้หลังจากติดตั้ง โดยที่ยังคงมีสภาวะการทำงาน (เช่น ความดัน , อัตราการไหล , อุณหภูมิ และอื่นๆ) ไม่ต่างจากสภาวะขณะใช้งานทำการวัดปกติ
- ต้องไม่ให้สถานะภาพของเหลวทั้งก่อนและหลังทางเข้ามาตรวัด รวมทั้งตัวมาตรวัดผิดเพี้ยนไปจากที่ได้ออกแบบ
- ต้องปฏิบัติตามกฎหมายของประเทศและคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต

คาวิเตชัน (Cavitation)

เป็นปัญหาที่สำคัญในการวัดปริมาตรของเหลวเพราะทำให้ผลการวัดไม่แม่นยำและไม่น่าเชื่อถือ อีกทั้งมีผลข้างเคียงเช่นลดอายุการใช้งานของมาตรวัดและอุปกรณ์อื่นๆภายในระบบการวัด

cavitation เกิดเป็นรูปของฟองอากาศ (vapor bubbles) ในการไหลเนื่องจากความดันที่กระทำต่อของเหลวมีค่าต่ำกว่าค่าความดันไอของเหลว ดังนั้นของเหลวจึงระเหยกลายเป็นไออยู่ในรูปของฟองอากาศ เมื่อฟองอากาศดังกล่าวไหลไปยังตำแหน่งซึ่งมีความดันสูงกว่าความดันไอ ฟองไอจะยุบตัวลงหรือระเบิดดังนั้นจึงจะก่อให้เกิดเสียงดังเป็นระยะ แต่สามารถป้องกันได้โดยรักษาความดันกลับ (back pressure) ให้มีค่าเพียงพอด้วยการติดตั้งวาล์วความดันกลับ (back-pressure valve) ในตำแหน่งด้านหลังตัวมาตรวัดเพื่อรักษาความดันภายในมาตรวัดและ prover ให้มีค่ามากกว่าความดันไอ (vapor pressure) ของเหลว

การเกิด cavitation จะส่งผลให้ค่าอัตราการไหลที่วัดได้ผิดไปจากความเป็นจริง

กรณีของเหลวมีความดันไอลด (low-vapor pressure) ค่าความดันกลับต่ำสุด (minimum back pressure) คำนวณได้จาก

$$P_b \approx 2\Delta p + 1.25p_v$$

เมื่อ P_b = ความดันกลับต่ำสุด (minimum back pressure) psig.
 Δp = ความดันตก (pressure drop) คร่อมมาตรวัดที่อัตราการไหลสูงสุดของการไหล , psi
 p_v = ความดันไอสมบูรณ์ (absolute vapor pressure) อุณหภูมิใช้งานสูงสุด , psia.

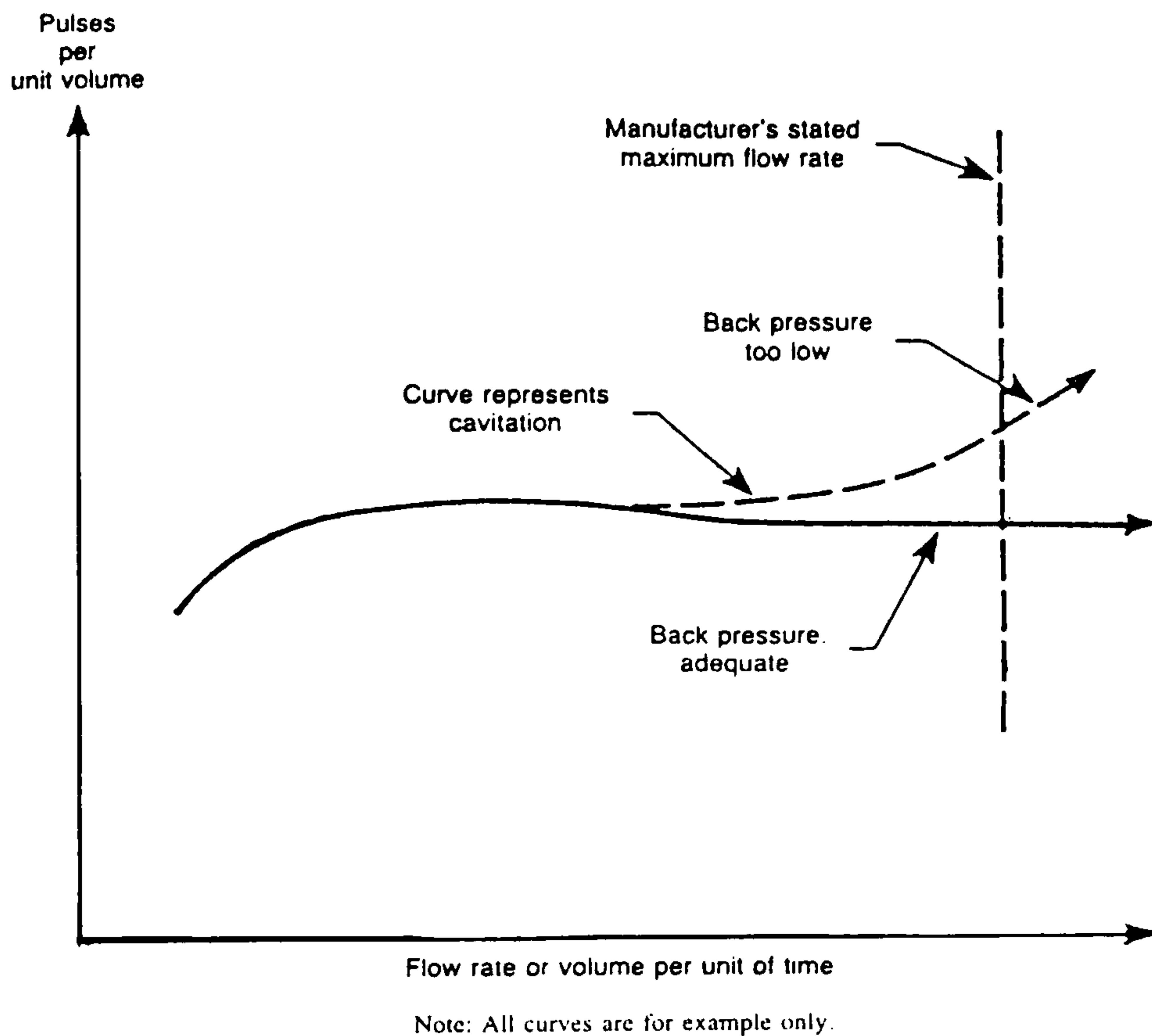
กรณีของเหลวมีความดันไอสูง (high-vapor-pressure) อาจจำเป็นต้องปรับค่าสัมประสิทธิ์ 1.25 ตามความเหมาะสมขึ้นกับการทดลองหรือพิจารณาตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต

ความแม่นยำในการวัดปริมาตรของเทอร์ไบน์มิเตอร์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นสภาพการไหลภายในท่อผ่านมาตรวัดที่ต้องไม่มีการไหลหมุนวน (swirl) หรือการไหลหมุน (rotation) ,

การไหลควรเป็นรูปแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ที่มีรูปแบบการไหล (velocity profile) เดิมรูปแบบไม่ถูกทำลายให้เปลี่ยนไป , การเปลี่ยนแปลงความหนืด , อุณหภูมิ , และความดันของเหลวที่ทำการวัด , การสึกหรอของตัวมาตรวัดหรืออาจจะเป็นการเสียดลอคของสิ่งแปลกปลอมเข้ามาในระบบ อีกทั้งหลังจากทำการติดตั้งเสร็จเรียบร้อยแล้วการปิดเปิดวาล์วควบคุม (control valve) ซึ่งติดตั้งอยู่ด้านหลัง (downstream) ของเทอร์ไบน์มิเตอร์ก็มีผลต่อความแม่นยำในการวัดปริมาณของเทอร์ไบน์มิเตอร์อีกเช่นกัน

ดังนั้นเพื่อลดปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัดปริมาณของเทอร์ไบน์มิเตอร์ การออกแบบและการติดตั้งมาตรวัดจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง

มาตรวัดที่ทำการติดตั้งใหม่ หากทำการติดตั้งมาตรวัดตัวใหม่กับระบบท่อใหม่เช่นกัน สิ่งที่ต้องระมัดระวังอย่างยิ่งก็คือสิ่งแปลกปลอมที่จะหลุดเข้าเทอร์ไบน์มิเตอร์ในช่วงแรกเริ่มทำการ

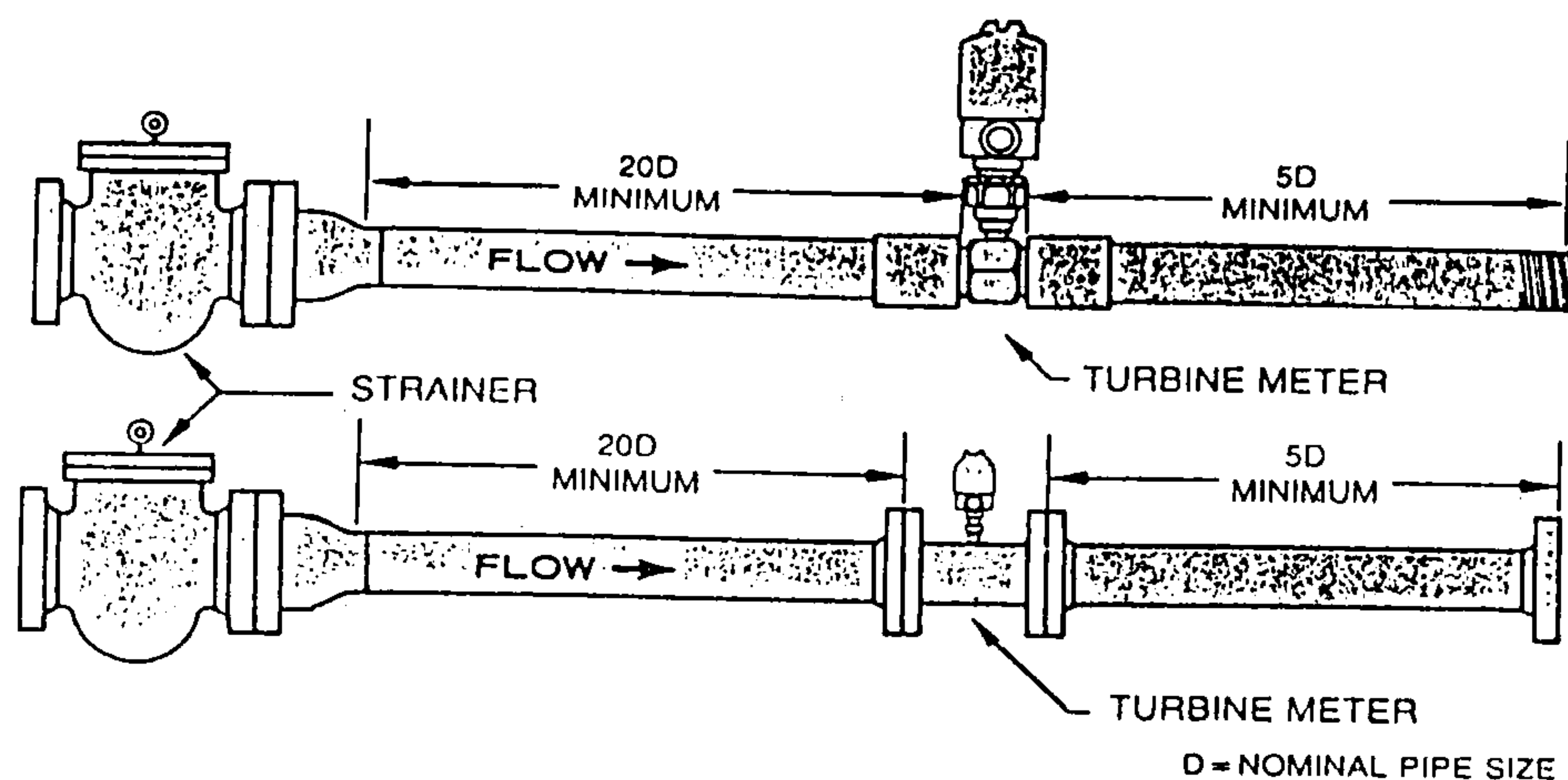


รูป 54 อิทธิพลการเกิด Cavitation ต่อความเร็วโรเตอร์

วัด เช่น จี๊ลวดเชื่อม (slag) , เศษลวดเชื่อม , หยดลวดเชื่อม (welding spatter) ,เศษขยะหรือจี๊ดิน เป็นต้น ควรทำการป้องกันเทอร์ไบน์มิเตอร์ด้วยวิธีการดังนี้

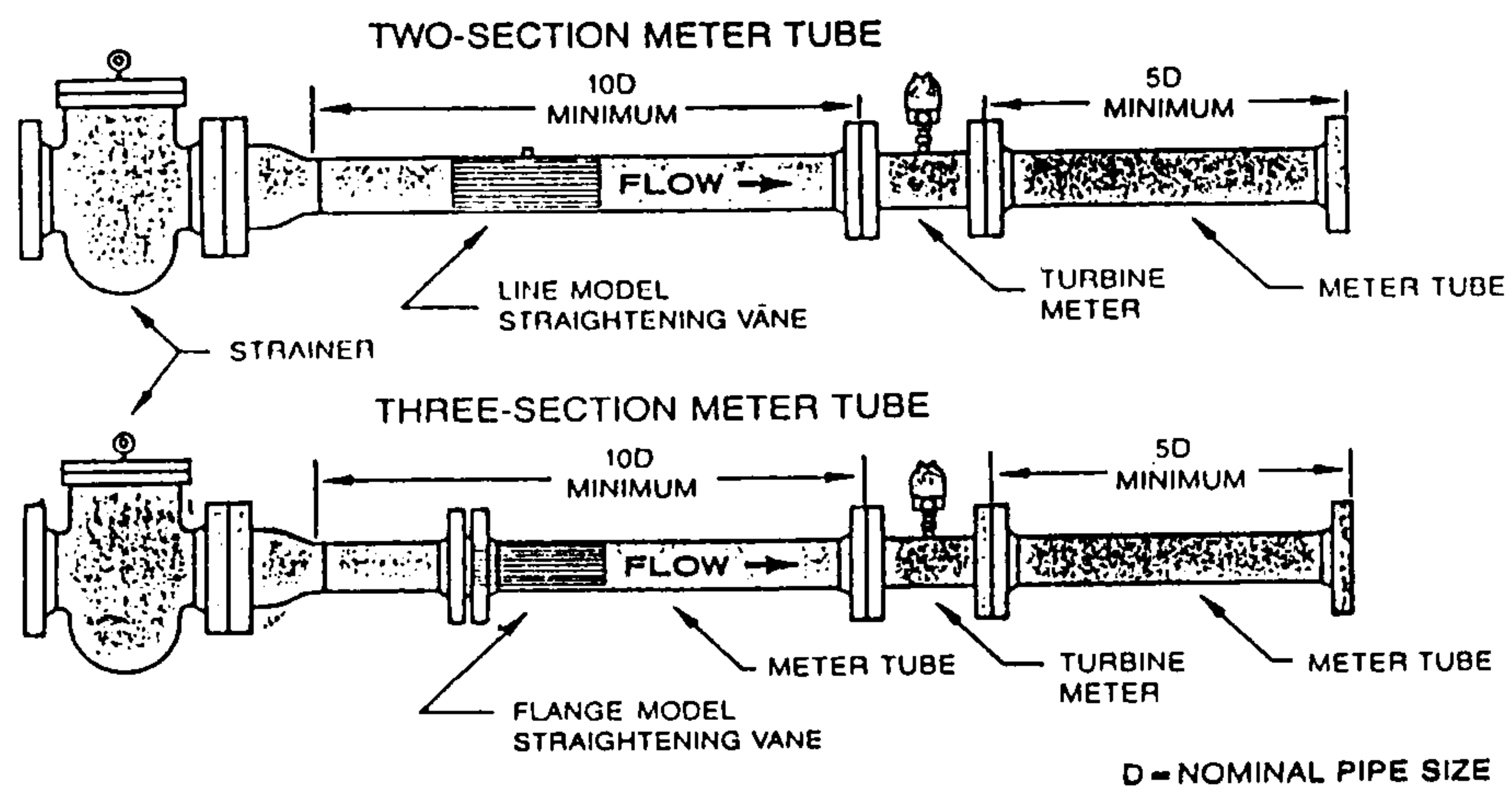
- ถอดเทอร์ไบน์มิเตอร์ออกจากระบบท่อ โดยใส่ท่อซึ่งมีขนาดและความยาวเท่ากับเทอร์ไบน์มิเตอร์ (spool pipe) แทน
- ติดตั้งท่อลัด (bypass) ให้ไหลอ้อมผ่านเทอร์ไบน์มิเตอร์
- ถอดชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่วัดปริมาตรออกจากตัวเทอร์ไบน์มิเตอร์
- ติดตั้งอุปกรณ์อุปกรณ์ป้องกันไว้ก่อนทางเข้าเทอร์ไบน์มิเตอร์ เช่น strainer

เทอร์ไบน์มิเตอร์ขนาดเล็ก เทอร์ไบน์มิเตอร์มีขนาดเล็กกว่า 2 นิ้ว ปกติแล้วจะทำการติดตั้งในระบบท่อโดยก่อนทางเข้าจะไม่มีอุปกรณ์ปรับการไหล (straightener) เพราะโอกาสเกิดการไหลหมุนวน (swirl) มีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับท่อใหญ่ อีกทั้งรูปแบบการไหล (velocity profile) จะคืนสู่สภาพปกติภายในระยะทางสั้นๆ ระยะท่อตรงก่อนทางเข้าเทอร์ไบน์มิเตอร์ปกติแล้วบริษัทส่วนใหญ่จะกำหนดเท่ากับ 20 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ และ 5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อสำหรับด้านทางออกมาตราวัด ดังรูป 55

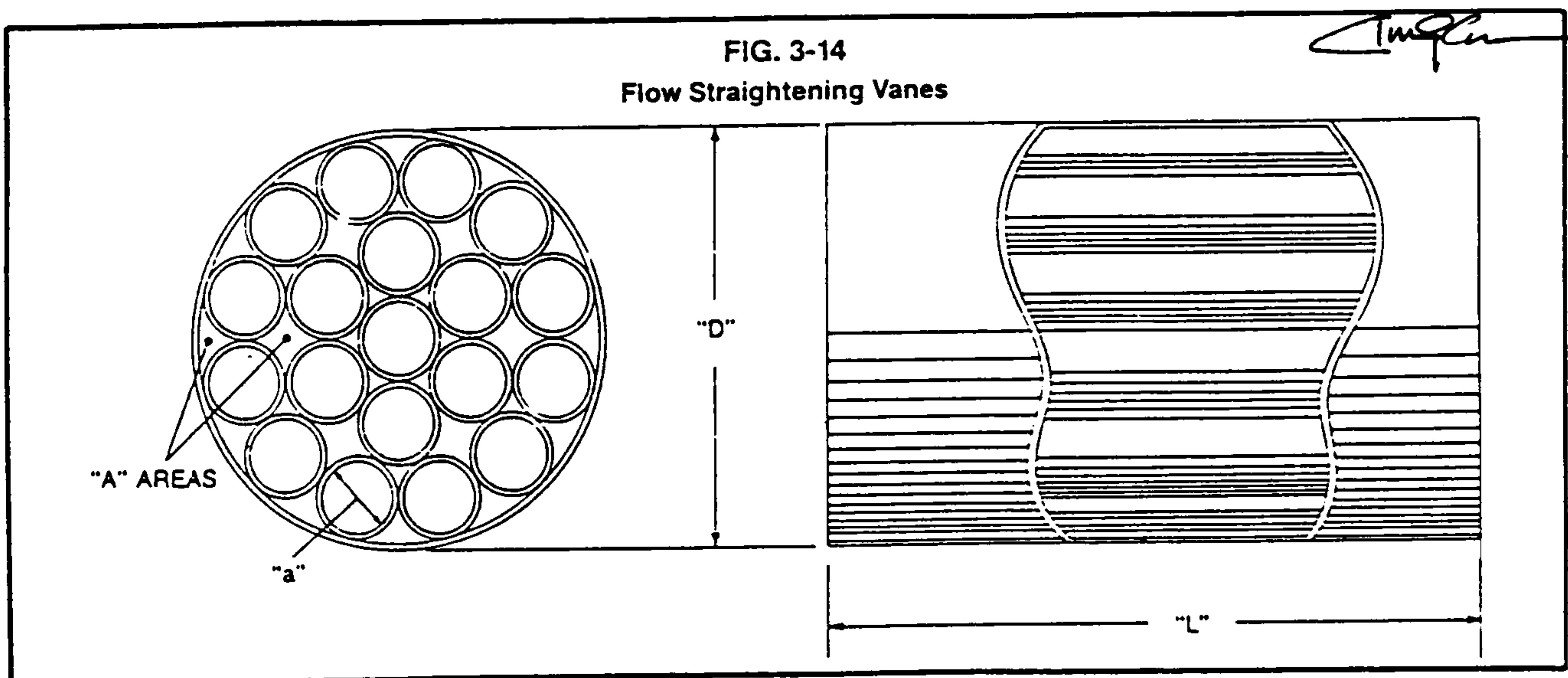


รูป 55 ข้อเสนอแนะการติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์ขนาดเล็ก

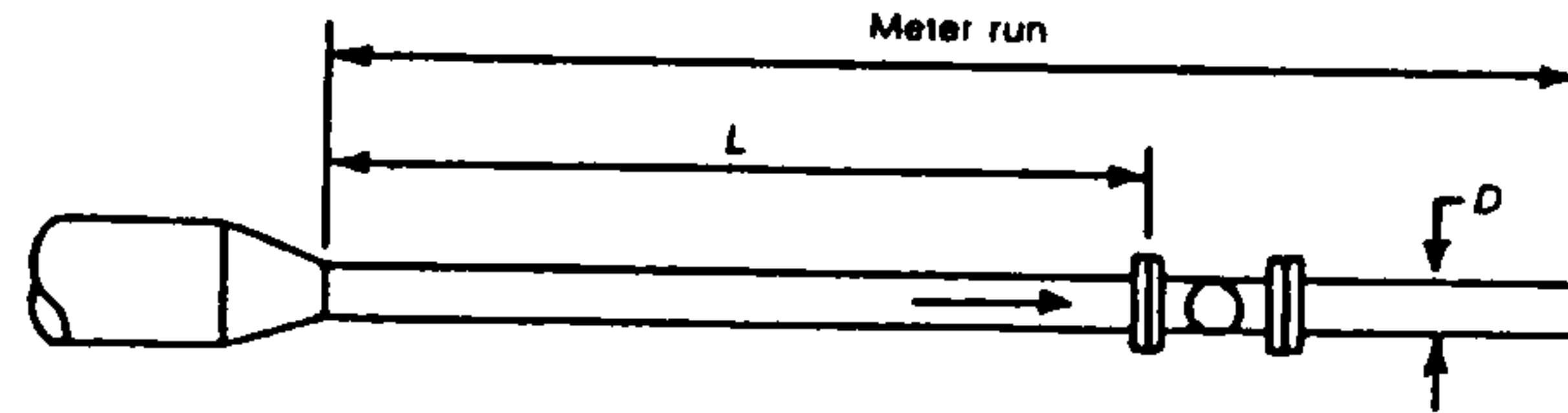
เทอร์ไบน์มิเตอร์ขนาดใหญ่ เทอร์ไบน์มิเตอร์มีขนาดใหญ่กว่า 2 นิ้วขึ้นไป ปกติจะจัดให้มีอุปกรณ์ปรับการไหล (straightener) ระยะท่อตรงก่อนทางเข้าเทอร์ไบน์มิเตอร์เท่ากับ 10 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ แต่บางบริษัทผู้ผลิตจะกำหนดให้เท่ากับ 20 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ ส่วนท่อตรงหลังทางออกมาตราวัดจะมีค่าเท่ากับ 5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (ดูรูป 56)



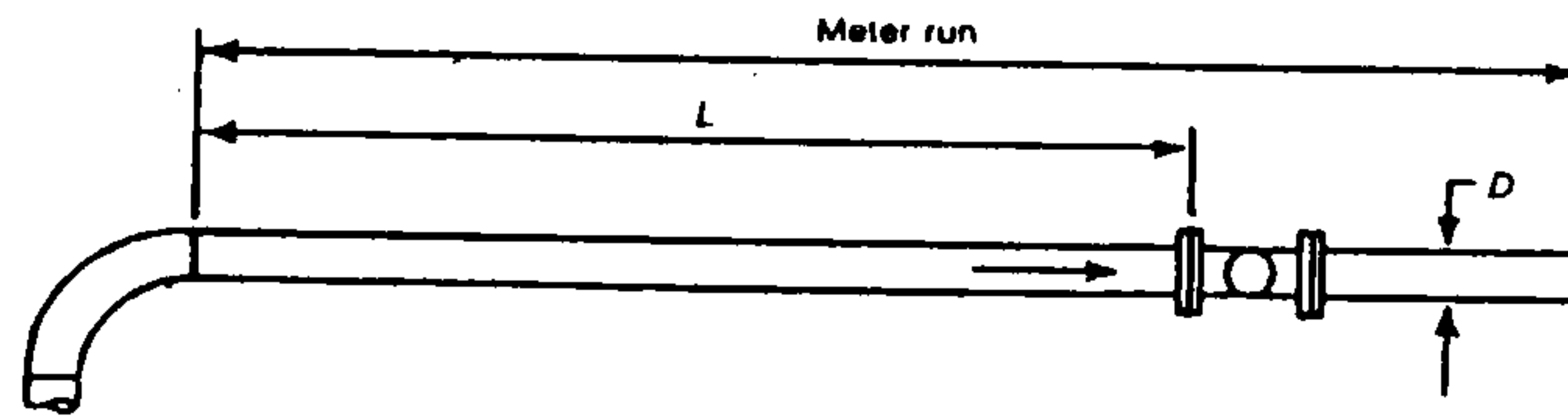
รูป 56 ข้อเสนอแนะการติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์ขนาดใหญ่



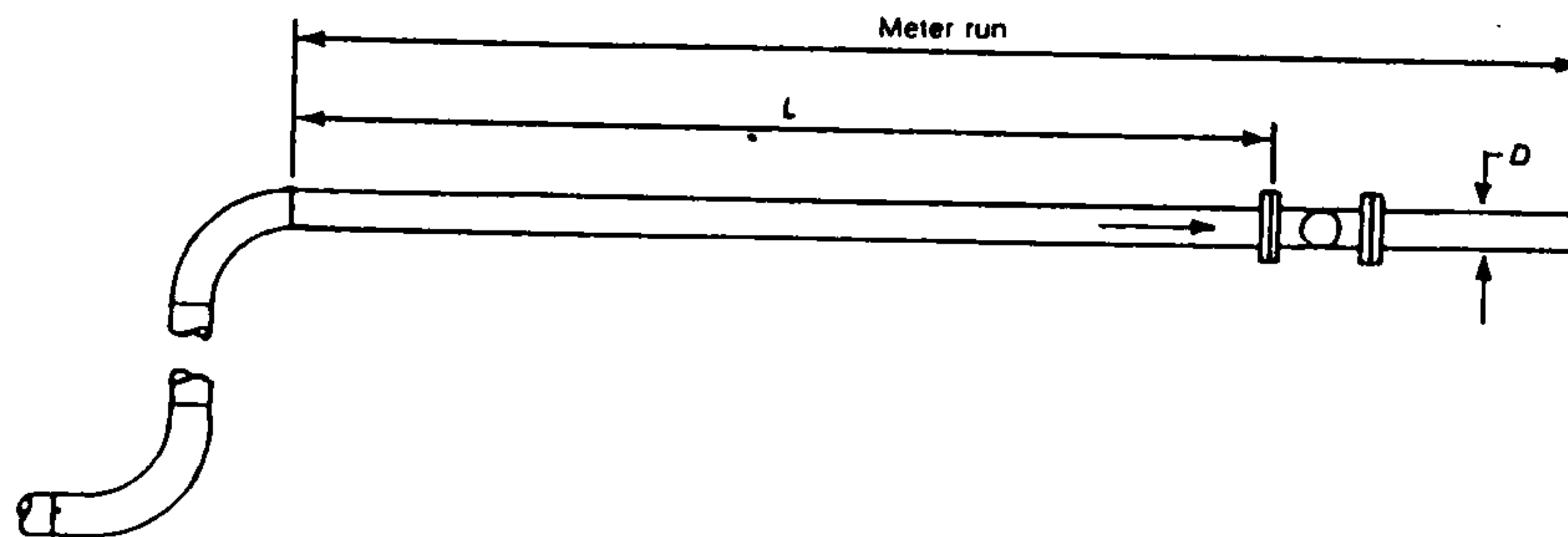
รูป 57 อุปกรณ์ปรับการไหล



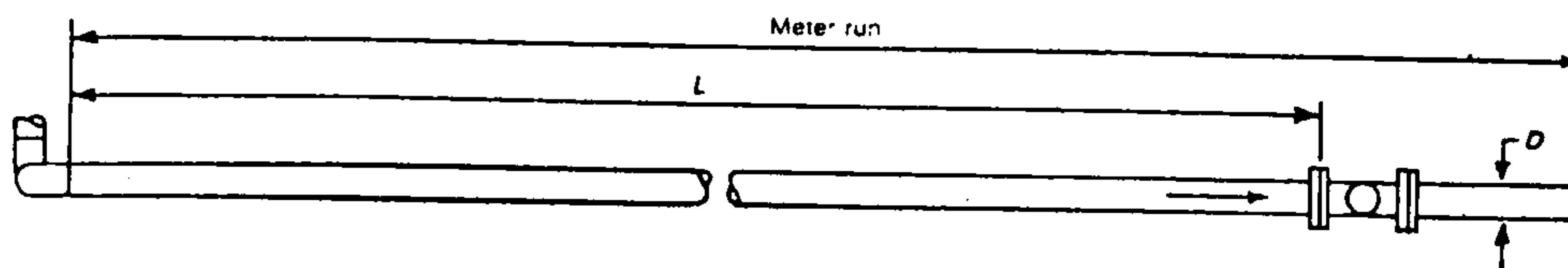
—Piping Configuration in Which a Concentric Reducer Precedes the Meter Run ($K_s = 0.75$)



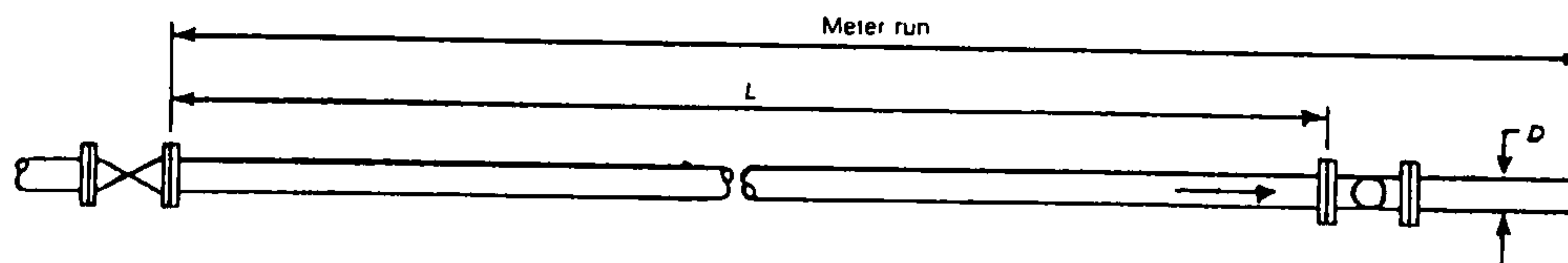
—Piping Configuration in Which a Sweeping Elbow Precedes the Meter Run ($K_s = 1.0$)



—Piping Configuration in Which Two Sweeping Elbows Precede the Meter Run ($K_s = 1.25$)



—Piping Configuration in Which Two Sweeping Elbows at Right Angles Precede the Meter Run ($K_s = 2.0$)



Note: When a fully open valve precedes the meter run, $K_s = 1.0$. When a partially open valve precedes the meter run, $K_s = 2.5$.

—Piping Configuration in Which a Valve Precedes the Meter Run

รูป 58 ข้อแนะนำการติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์ภายในระบบท่อแบบต่างๆ

นอกจากนี้ในบางครั้งบริษัทผู้ผลิตเทอร์ไบน์มิเตอร์จะกำหนดรายละเอียดและรูปแบบการติดตั้ง รวมทั้งอุปกรณ์ร่วมอื่นๆและอุปกรณ์ปรับการไหล (straightener) ซึ่งผู้ใช้ควรปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิตอย่างเคร่งครัด

ในส่วนของ American Petroleum Institute (API) ได้แนะนำวิธีการหาระยะท่อตรงก่อนทางเข้าเทอร์ไบน์มิเตอร์โดยที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ปรับการไหล (straightener) มีค่าเท่ากับ

$$L = 0.35D \left(\frac{K_s}{f} \right)$$

หรือ

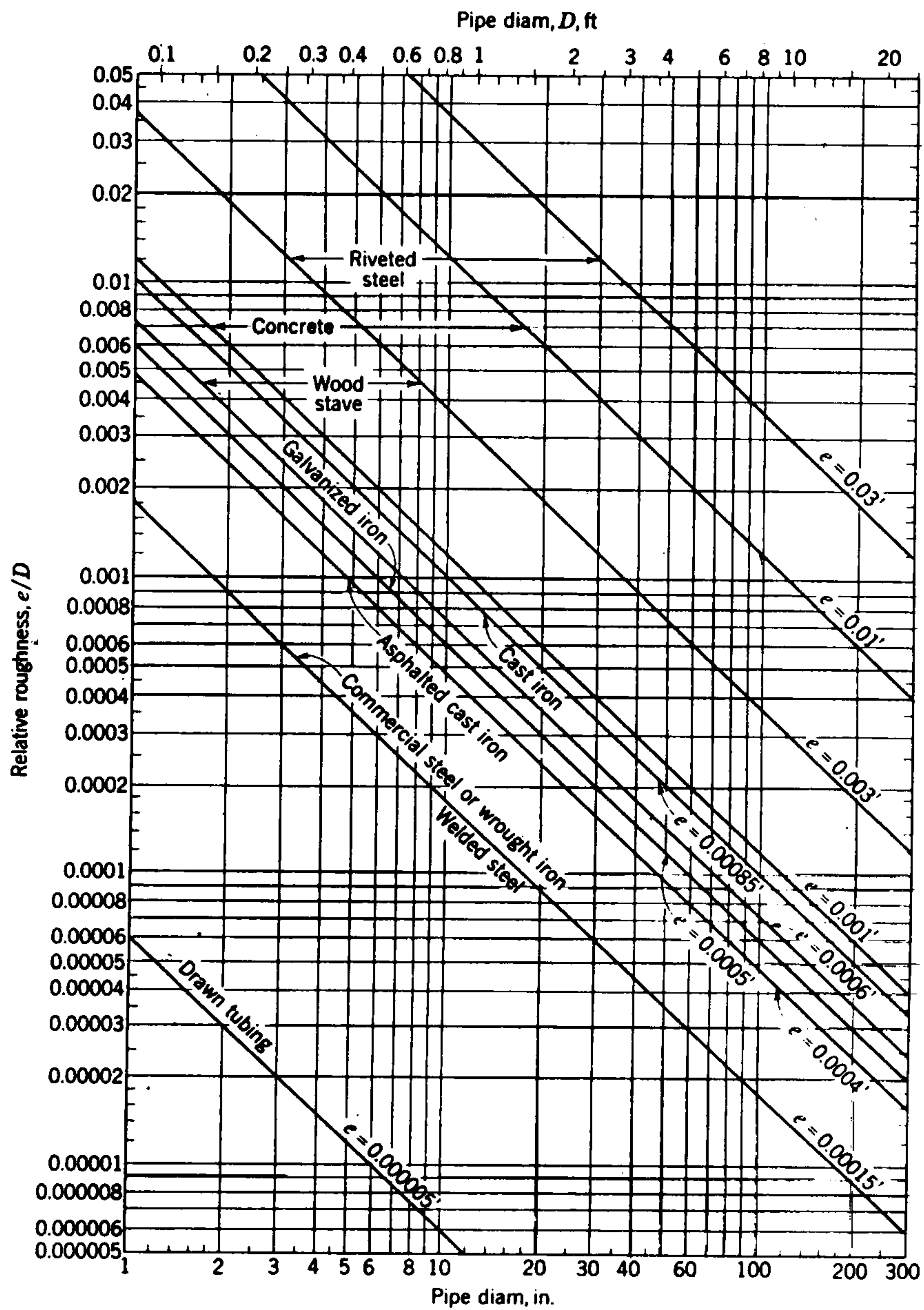
$$\frac{L}{D} = 0.35 \left(\frac{K_s}{f} \right)$$

เมื่อ L = ระยะท่อตรงก่อนทางเข้าเทอร์ไบน์มิเตอร์ , ฟุต
 D = nominal meter bore , ฟุต
 K_s = swirl-velocity ratio , ไม่มีหน่วย
 f = Darcy-weisbach friction factor , ไม่มีหน่วย

การหาค่า f (Darcy-weisbach friction factor) ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบของผิวท่อ (roughness) กับค่า Reynold number (Re_D) รูป 59 จาก “Friction Factor for Pipe Flow” ในบทความ Transaction of the American Society of Mechanical Engineers , November 1944 , Vol 66 ,P66

การติดตั้งระบบท่อ (Piping Installation)

ในระบบท่อเราเรียกท่อและข้อต่อ (fitting) ทางด้านบน (upstream) ก่อนทางเข้ามาตรวัดและทางด้านล่าง (downstream) หลังออกจากมาตรวัดว่า “ระบบมาตรวัด (meter run)” โดยปกติแล้วระบบมาตรวัด (meter run) จะเริ่มต้นตั้งแต่หน้าแปลนท่อลดศูนย์กลาง (concentric reducer) หากมีการลดขนาดท่อให้เท่ากับขนาดมาตรวัด ตามด้วยท่อตรงมีความยาวอย่างน้อย 10 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อทางด้านเข้ามาตรวัด แต่ก็มีกรณีติดตั้งหลายที่ใช้ท่อตรงยาว 20 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อภายในท่อตรงดังกล่าวจะติดตั้งด้วย straightening vane assembly หรือ straightener หรือ flow conditioner ซึ่งจะทำหน้าที่กำจัดการไหลหมุนวน (swirl) ที่อาจเกิดขึ้นได้และต้องได้รับการออกแบบไม่ก่อให้เกิดการไหลวนเองด้วย หากพิจารณาถึงหน้าตัดของอุปกรณ์การไหล (straightener) จะต้องมีการรูปร่างสมมาตร (uniform) และสมมาตร (symmetry) มากที่สุดเท่าที่ทำได้ จากนั้นทำการติดตั้งมาตรวัดด้านปลายของท่อตรง โดยปกติแล้วจะทำการติดตั้งมาตรวัดให้อยู่ในแนวระดับ (horizontal) หากมี



Roughness factors (e expressed in feet) for commercial pipes.

รูป 60 ค่า Roughness Factor

ความจำเป็นในเรื่องพื้นที่สำหรับการติดตั้งก็ควรทำการปรึกษาบริษัทผู้ผลิตเสียก่อน นอกจากนี้ต้องทำการติดตั้งมาตรวัดให้ปราศจากความสั่นสะเทือน , ความเค้น (stress) , หรือความเครียด (strain) จากภายนอก เช่น การขยายตัวหรือการหดตัวของท่อ (piping expansion or contraction) เป็นต้น เพื่อรักษารูปทรงเทอร์ไบน์มิเตอร์ไม่ให้เสียรูปหรือบิดเบี้ยวไป ถัดจากมาตรวัดจะเป็นท่อตรงอีกท่อหนึ่ง มีความยาวอย่างน้อย 5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ ตามด้วยตัวข้อลด (reducer) เพื่อขยายขนาดท่อให้มีขนาดเท่ากับท่อเดิม หลังจากทำการติดตั้งระบบมาตรวัด (meter run) เป็นที่เรียบร้อยแล้วต้องมั่นใจว่าไม่มีโลหะของลวดเชื่อมย่อยไหลเข้าไปในท่อหลังจากประกอบเชื่อมต่อ , การใส่ประเก็นระหว่างหน้าแปลนท่อเข้าไปในท่อ , หน้าแปลนท่อเอียงซึ่งกันและกัน , สิ่งสกปรกค้างอยู่ภายในท่อ และอื่นๆ สิ่งดังกล่าวเหล่านี้จะเป็นสาเหตุการทำลายรูปแบบการไหล (velocity profile) ได้ทั้งนั้น

อุปกรณ์เสริม

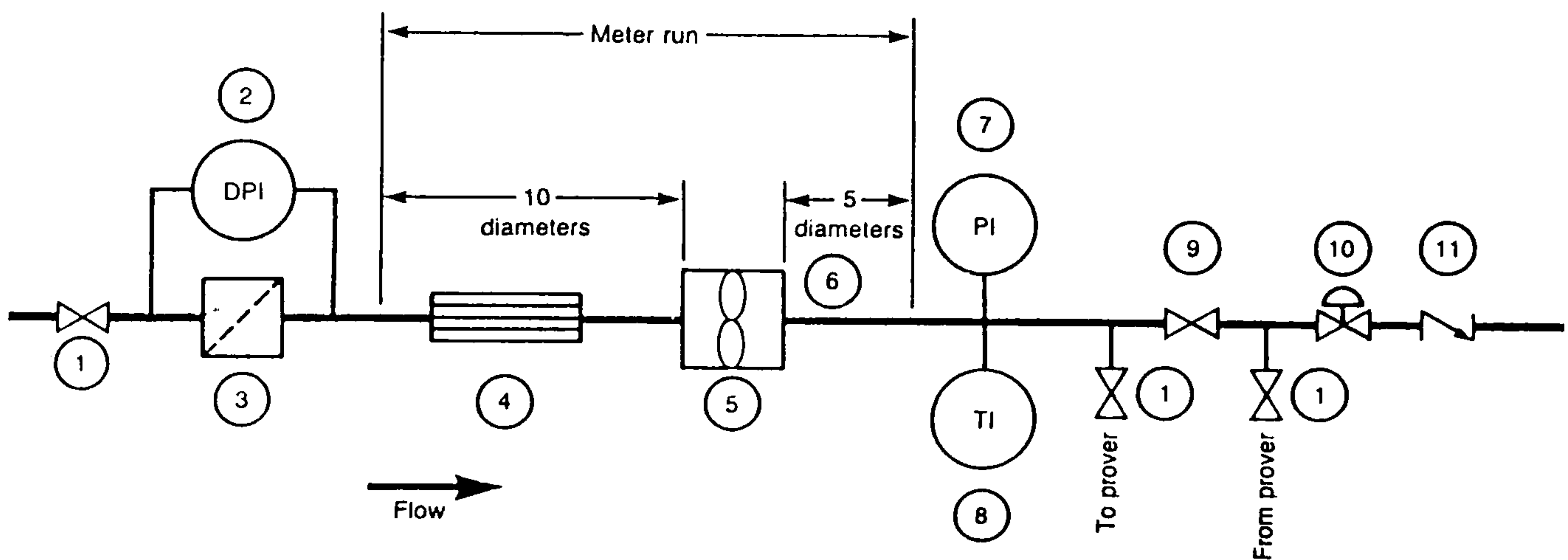
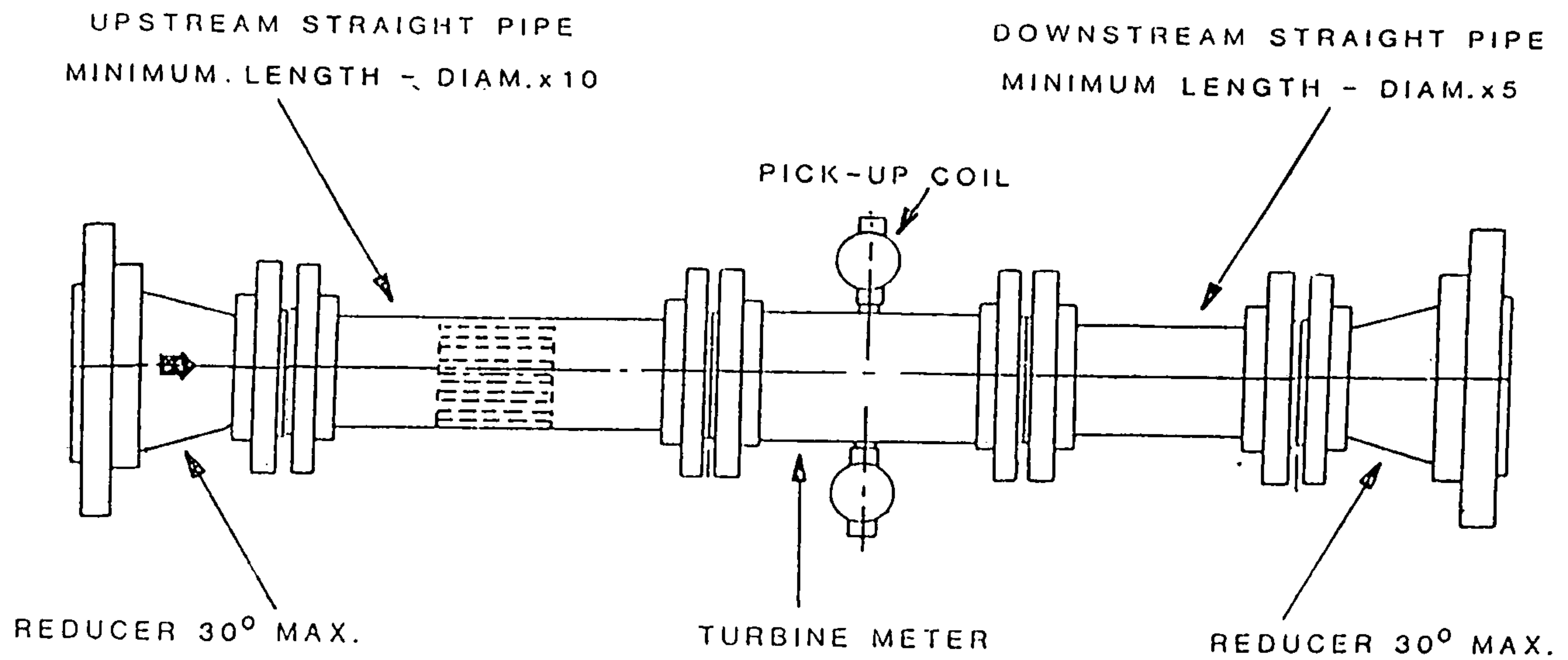
เพื่อให้เทอร์ไบน์มิเตอร์ทำการวัดปริมาตรได้ถูกต้องแม่นยำอีกทั้งป้องกันความเสียหายอันจะเกิดกับตัวเทอร์ไบน์มิเตอร์จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติมหลักๆดังนี้

- **Isolation valve** ปรกติทำการติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์หลายตัวให้อยู่เรียงขนานกันในพื้นที่หนึ่ง ดังนั้นจะมีการสลับการใช้เทอร์ไบน์มิเตอร์ได้ระหว่างแต่ละตัวขึ้นอยู่กับว่าอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามแต่การใช้งาน เพื่อให้แน่ใจว่ามาตรวัดแต่ละตัวทำงานที่อัตราการไหลออกแบบ วาล์วที่อยู่ระหว่างมาตรวัดหรือระหว่างมาตรวัดกับตัวสอบเทียบแบบมาตรวัด (prover) เช่น วาล์วเปลี่ยนทิศทางการไหล , วาล์วระบายของเหลว (drain valve) , วาล์วระบายก๊าซ (vent valve) ต้องได้รับการทดสอบการรั่วเสียก่อน (hydrostatic pressure testing) เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีการรั่วเมื่อทำการปิด ซึ่งอาจจะใช้วาล์วจำพวก a double block-and-bleed valve พร้อมทั้งมีตัวบ่งบอกตำแหน่งปิดเปิดของวาล์วนั้นๆด้วย

- **Pressure transducers** มีไว้เพื่อใช้ในการแก้ไขผลกระทบจากอิทธิพลของความดันกระทำต่อของเหลวและมาตรวัด อีกทั้งให้แน่ใจว่ามีความดันกลับ (back pressure) ภายในระบบมีค่ามากพอเพื่อป้องกันการเกิด Cavitation ดังนั้นควรติดตั้งใกล้ทางเข้าหรือออกของแต่ละมาตรวัด

- **filter และ Air/Vapor Separator** ปกติแล้วตัวแยกอากาศ (air separator) เป็นเพียงถังเล็กๆใบหนึ่งติดตั้งอยู่ระหว่าง strainer และตัวมาตรวัด ต้องไม่ติดตั้งใกล้ตัวมาตรวัดมากเกินไปจนอาจทำให้เกิดการไหลหมุนวน (swirl) หรือทำลายรูปแบบการไหล (flow profile) อีกทั้งเป็นตัวลดความเร็วของเหลว โดยยอมให้ของเหลวค้างอยู่ในถังเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง ในทางทฤษฎีช่วงเวลาดังกล่าวจะเป็นช่วงเวลานานพอที่ให้อากาศหรือไอน้ำเกิดขึ้นภายในของเหลวไหลไปตามท่อได้ลอยตัวขึ้นส่วนบนสุดของ air separator เป็นผลให้มีการแบ่งชั้นโดยอากาศหรือไอน้ำจะอยู่ส่วนบนสุดและของเหลวอยู่ด้านล่าง ส่งผลให้ระดับของเหลวลดต่ำลงหลังจากมีการแบ่งชั้น วาล์วซึ่งอยู่ส่วนบนสุด (a float-activated vent valve) จะทำการเปิดไล่อากาศหรือไอน้ำออกไป

TURBINE METER RUN



Note: All sections of line that may be blocked between valves should have provisions for pressure relief (preferably not installed between the meter and the prover).

Schematic Diagram of a Turbine Meter

รูป ๑1 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์และเทอร์ไบน์มิเตอร์ในระบบมาตรวัด

air separator ทำงานได้ดีหากอากาศหรือไอซึ่งปรากฏมากับของเหลวมีจำนวนมากๆ แต่ในทางปฏิบัติแล้วอากาศหรือไอมักจะมีขนาดเล็กๆและมีจำนวนน้อยเป็นฟองอากาศ ทำให้ไม่มีเวลาเพียงพอที่จะยอมให้อากาศลอยตัวขึ้นบนสุดของตัวแยกอากาศและเพื่อให้แน่ใจว่ายังมีของเหลวค้างอยู่ในตัวแยกอากาศมากพอที่จะไม่ให้เกิดการไหลวน (vortex) เมื่อของเหลวไหลออกไปจากตัวแยกอากาศอีกทั้งต้องหมั่นเอาใจใส่ดูแลให้มีการรั่วที่ตัวปั๊ม , ปะเก็นก้านวาล์ว (valve glands) และต้องทำให้ความดันกลับ (back pressure) ยังคงมีค่ามากพอในระบบเพื่อป้องกัน cavitation หากของเหลวที่ทำการวัดเป็นของเหลวระเหยได้ง่ายแล้ว เช่น น้ำมันดิบ ยังต้องให้ความสนใจเป็นพิเศษ

- **Thermometer** อยู่ในตำแหน่งใกล้มาตรวัดมากที่สุดเท่าที่ทำได้เพื่อสามารถตรวจสอบอุณหภูมิของมาตรวัดที่ใกล้เคียงมากที่สุด เพื่อใช้แก้ไขอิทธิพลของอุณหภูมิซึ่งมีผลต่อมาตรวัดและของเหลวที่ทำการวัดอัตราการไหลอยู่ขณะนั้น

- **Pressure relief** ในกรณีเทอร์โบมิเตอร์ใช้งานอยู่ติดต่อกันเป็นระยะเวลานานๆ หรือตลอดเวลา หากมีความดันเพิ่มสูงขึ้นผิดปกติอันเกิดจากอุณหภูมิสูงขึ้นหรือการขยายตัวของเหลว (thermal expansion) หรืออาจเกิดจากการปิดเปิดวาล์วผิดวิธี วาล์วระบายความดัน (pressure relief valve) ก็จะทำหน้าที่ระบายความดันที่มีค่าสูงเกินกว่าที่ออกแบบภายในระบบออกไป กรณีมีความดันเป็นจังหวะ (pressure pulsations) หรือเพิ่มขึ้นหรือลดลงภายในระบบมากเกินไปอาจจำเป็นต้องติดตั้ง surge tank หรือ expansion chambers หรือ pressure-limiting valve หรืออุปกรณ์อื่นๆที่จำเป็น

ในกรณีที่มีวาล์วระบายความดัน (pressure relief valve หรือ pressure-limiting valve) อยู่ ณ ตำแหน่งระหว่างมาตรวัดกับตัวสอบเทียบแบบมาตรา (prover) จะต้องมียุทธวิธีตรวจสอบเช็คการรั่วไหลของวาล์วดังกล่าวด้วยเพราะเมื่อทำการตรวจสอบ (proving) แล้วจะได้ไม่มีผลกระทบต่อความแม่นยำในการสอบเทียบ

- **Prover studs** ใช้เพื่อต่อเชื่อมระหว่างระบบมาตรวัดกับตัวสอบเทียบแบบมาตรานิคเคลื่อนที่ (mobil prover) โดยมี block-bleed valve เป็นตัวปิดเปิดติดต่อกัน ทำให้ง่ายและสะดวกหากว่าการสอบเทียบ (proving) ในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งตัวสอบเทียบแบบมาตรา (prover) ชนิดถาวร

- **Flow control valve** ตำแหน่งติดตั้งเหมาะสมที่สุดควรอยู่ด้านหลังมาตรวัด (downstream) เป็นวาล์วที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับมาตรวัดชนิดเทอร์โบมิเตอร์มากกว่ามาตรวัดชนิด displacement meter เพราะเป็นตัวรักษาความดันกลับภายในระบบให้มีค่ามากพอตลอดเวลาเพื่อป้องกันไม่ให้เกิด cavitation อีกทั้งวาล์วควรสามารถปิดเปิดได้รวดเร็วและราบเรียบไม่สะดุดเพื่อป้องกันการไหลกระแทก (shock) และการเพิ่มขึ้นหรือลดลง (surge) ของเหลวอีกด้วย

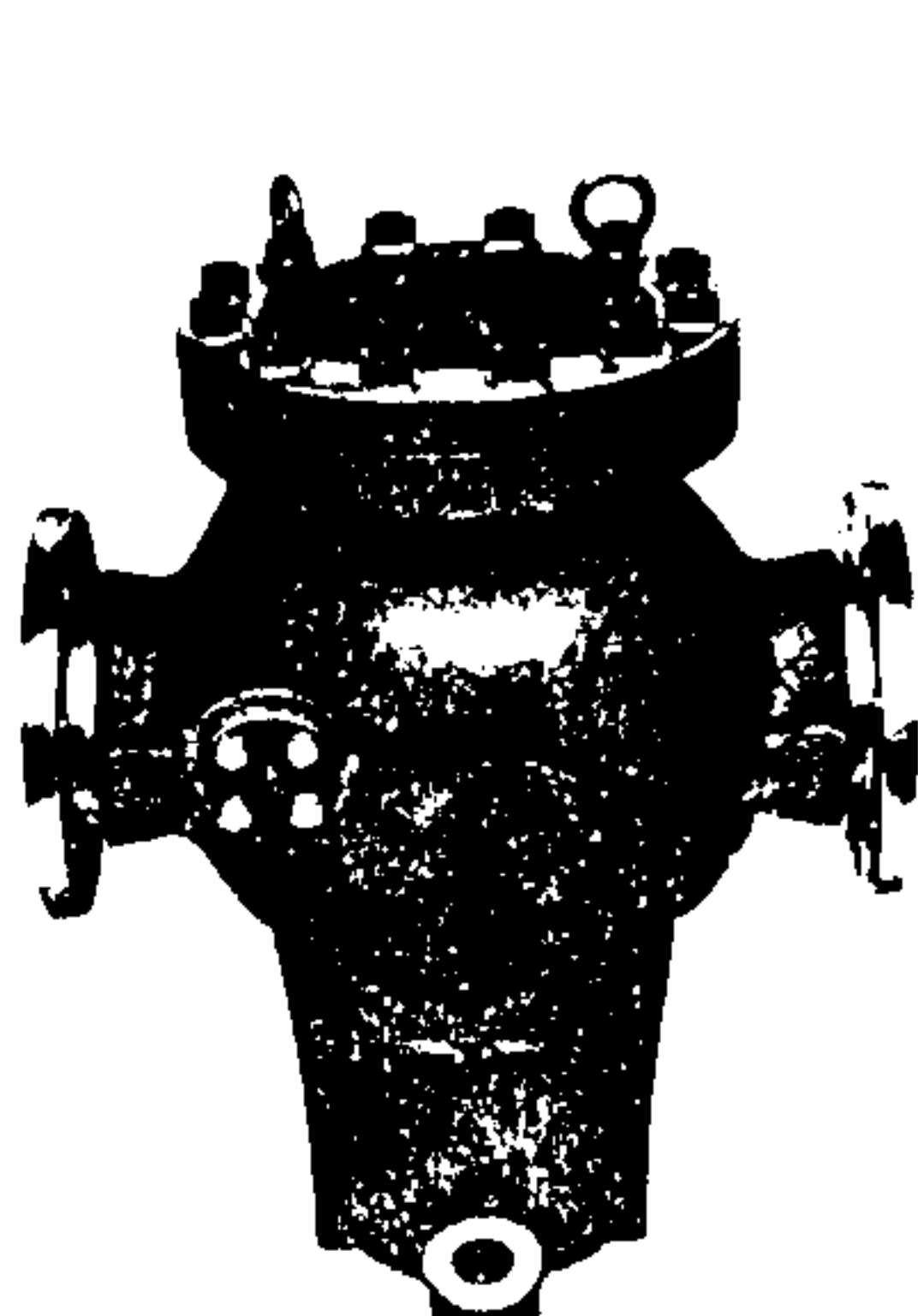
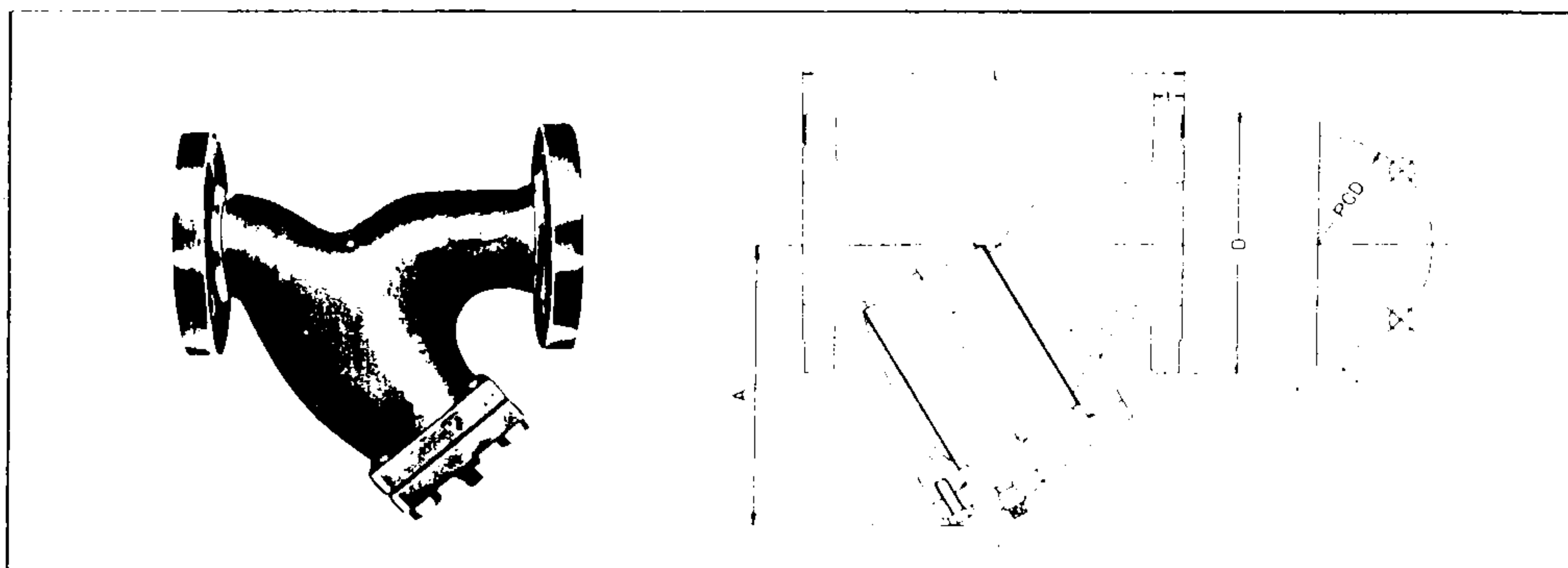
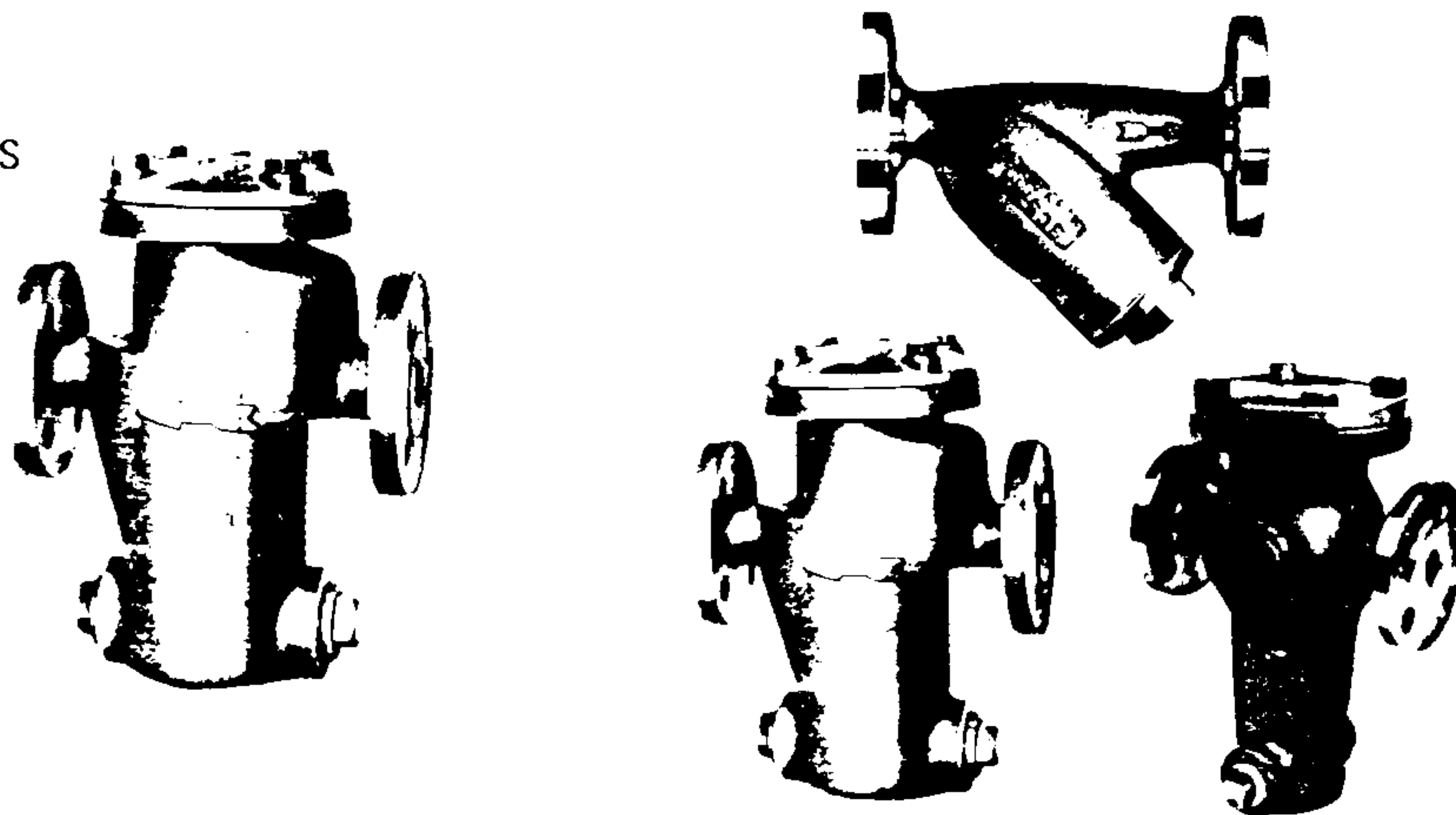
- **non-return valve** หรือ check valve ถึงแม้ว่าเทอร์โบมิเตอร์ส่วนใหญ่จะสามารถบันทึกวัดค่าการไหลได้ทั้ง 2 ทิศทางก็ตาม แต่เป็นการยากที่จะให้การไหลของแต่ละทิศทางผ่านมาตรวัดมีค่า K-factor ที่เท่ากัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งวาล์วกันกลับ (check valve) เพื่อทำหน้าที่ป้องกันของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดไปแล้วไม่ให้ไหลย้อนกลับมา ถึงแม้ว่าเหตุการณ์ดังกล่าวจะก่อให้เกิดการบันทึกค่าปริมาตรผิดพลาดในกรณีมาตรวัดชนิด displacement meter ก็ตาม ส่วนเทอร์โบมิเตอร์ที่มีตัว

บันทึกค่าเป็นแบบ digital counter และรับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จากการหมุนของโรเตอร์เป็นตัวผลิตพัลส์ พบว่าหากทิศการหมุนของโรเตอร์จะเปลี่ยนไปก็ไม่มีผลต่อจำนวนพัลส์ที่ผลิตออกมาแต่อย่างใด นั่นหมายถึงอัตราการไหลที่วัดได้ไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง

- **Blind** ในกรณีถ้ามีการอนุญาตให้มีท่อลัด (bypass) รอบๆมาตรวัด หรือ battery of meter ได้ ควรจัดหาแผ่นเหล็กตัน (blind) หรือ positive shutoff-double block-and-bleed valve พร้อมตัวบ่งบอกตำแหน่งปิดเปิดวาล์วติดตั้งกับท่อลัด

- หากต้องการติดตั้งอุปกรณ์จำกัดการไหล (flow-limiting device หรือ restricting orifice) ควรทำการติดตั้งอยู่ในตำแหน่งทางด้านออกของระบบมาตรวัด (meter run) และอาจติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพื่อเตือนให้รู้หากการไหลผ่านมาตรวัดต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ แต่ถ้าหากทำการติดตั้งอุปกรณ์จำกัดการไหลก่อนทางเข้า (upstream) ของระบบมาตรวัด (meter run) ต้องติดตั้งให้ห่างจากมาตรวัดมากพอที่

STRAINERS



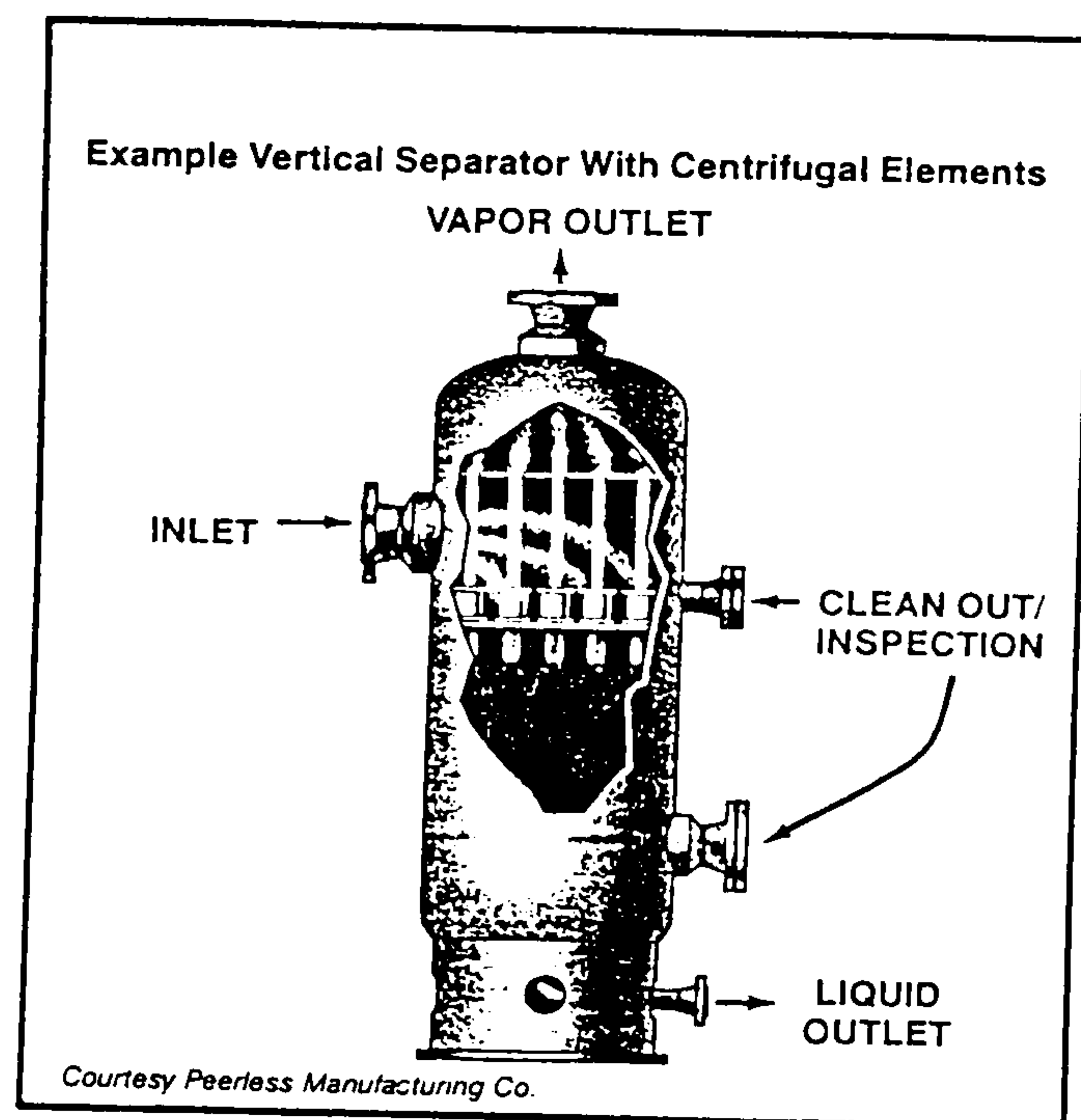
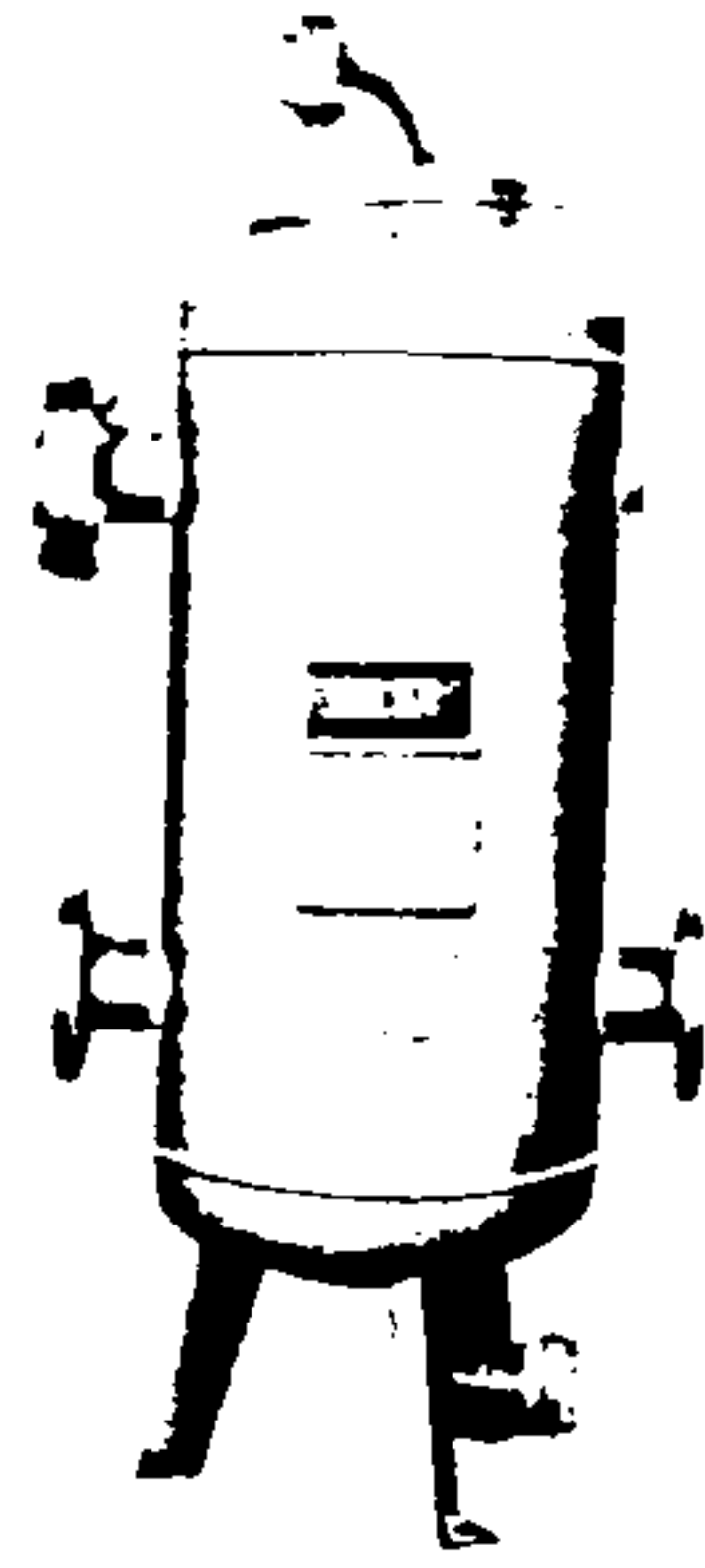
Strainer



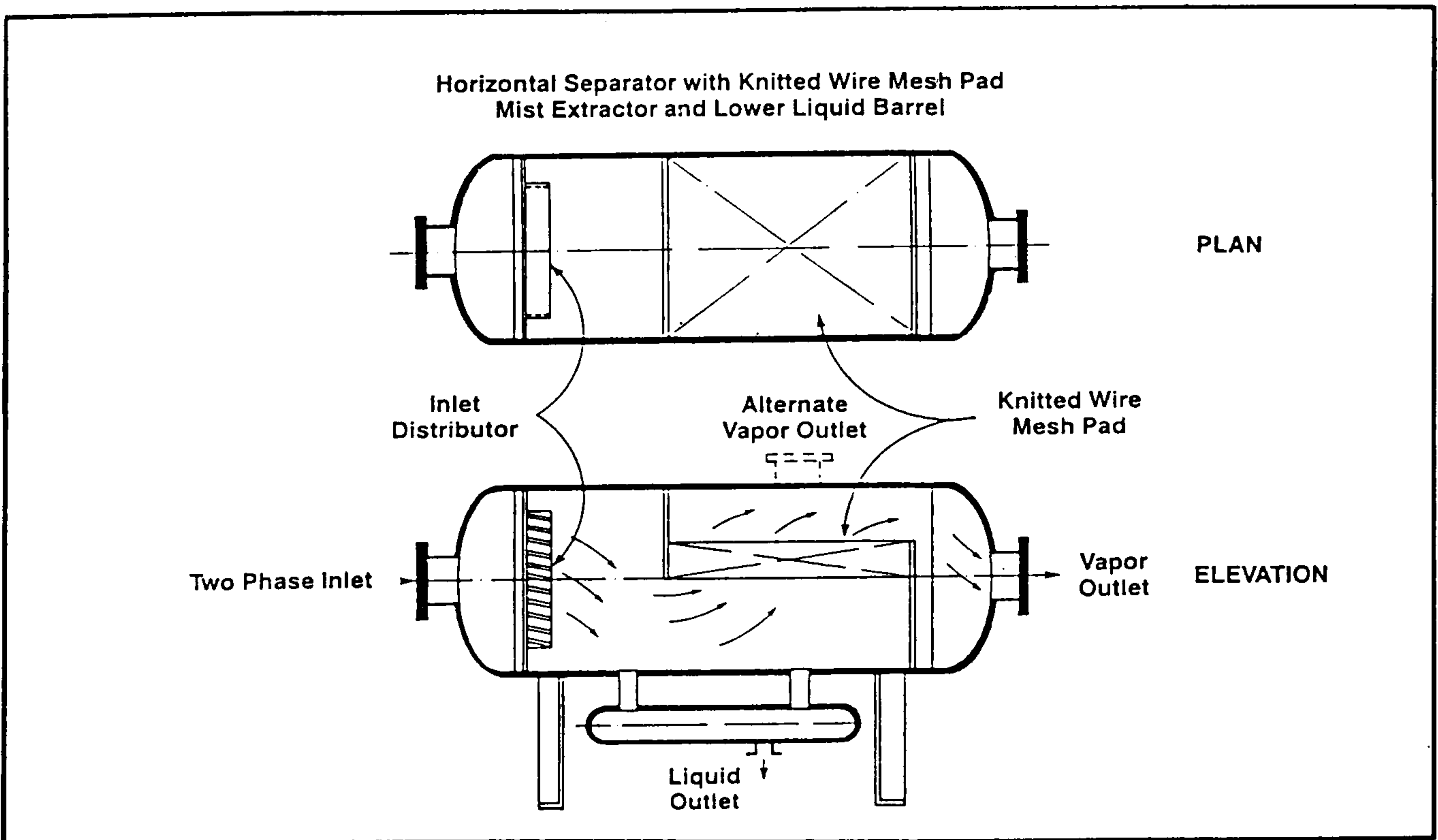
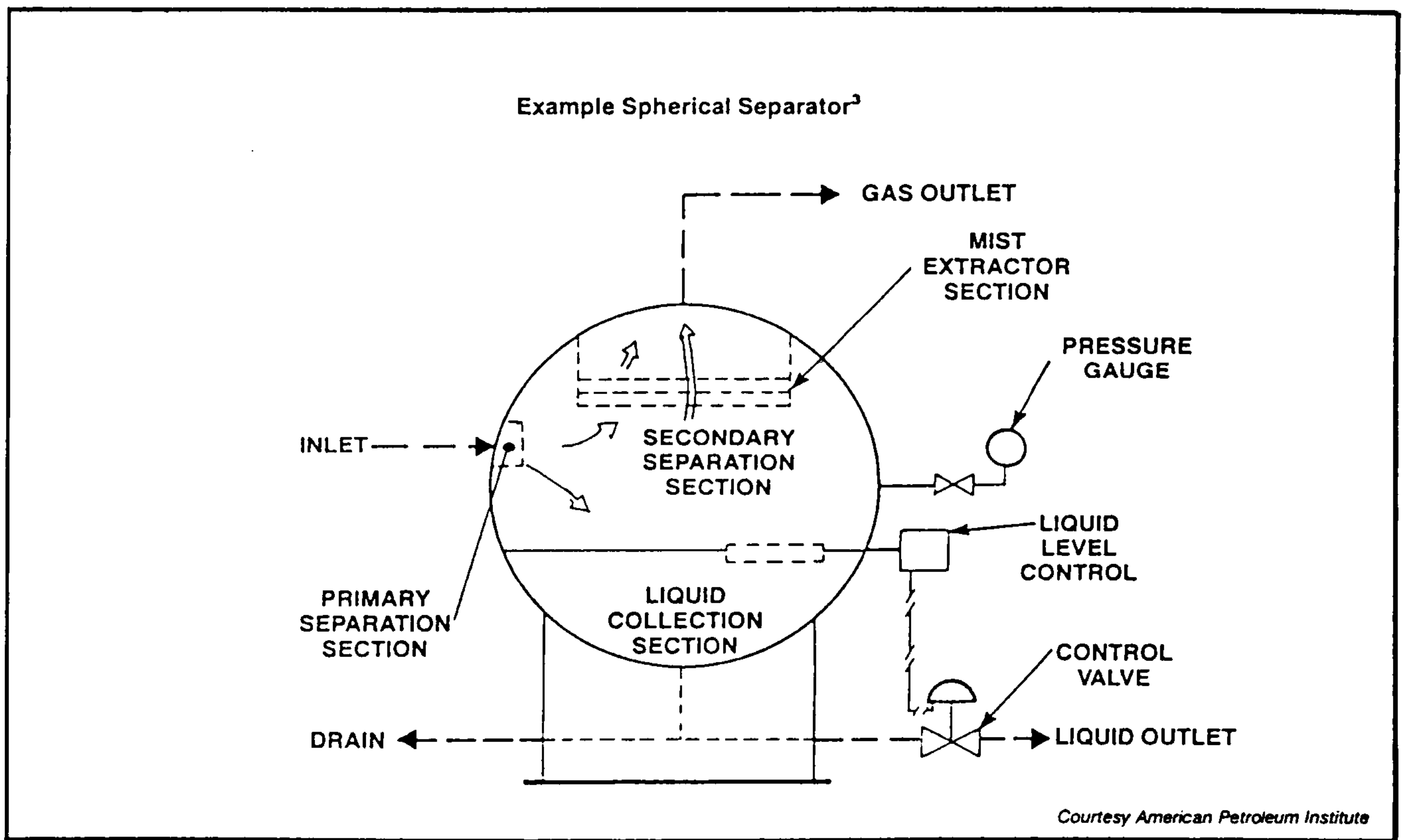
Air Eliminator

รูป 62 ตัวกำจัดอากาศ / ไข
และตัวกรองรูปแบบต่างๆ

AIR ELIMINATORS

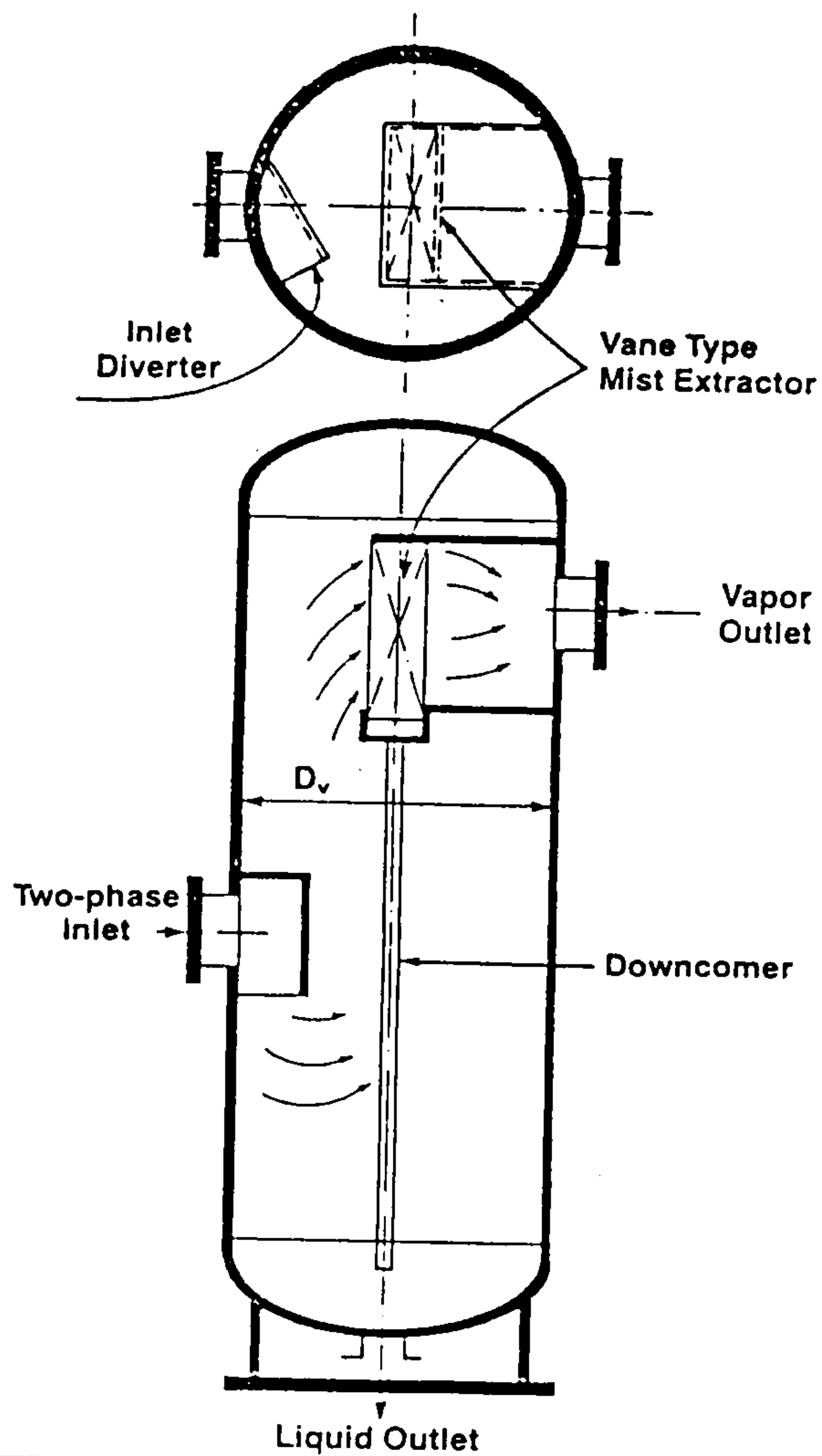


รูป 63 ตัวกำจัดไอน้ำ / อากาศ



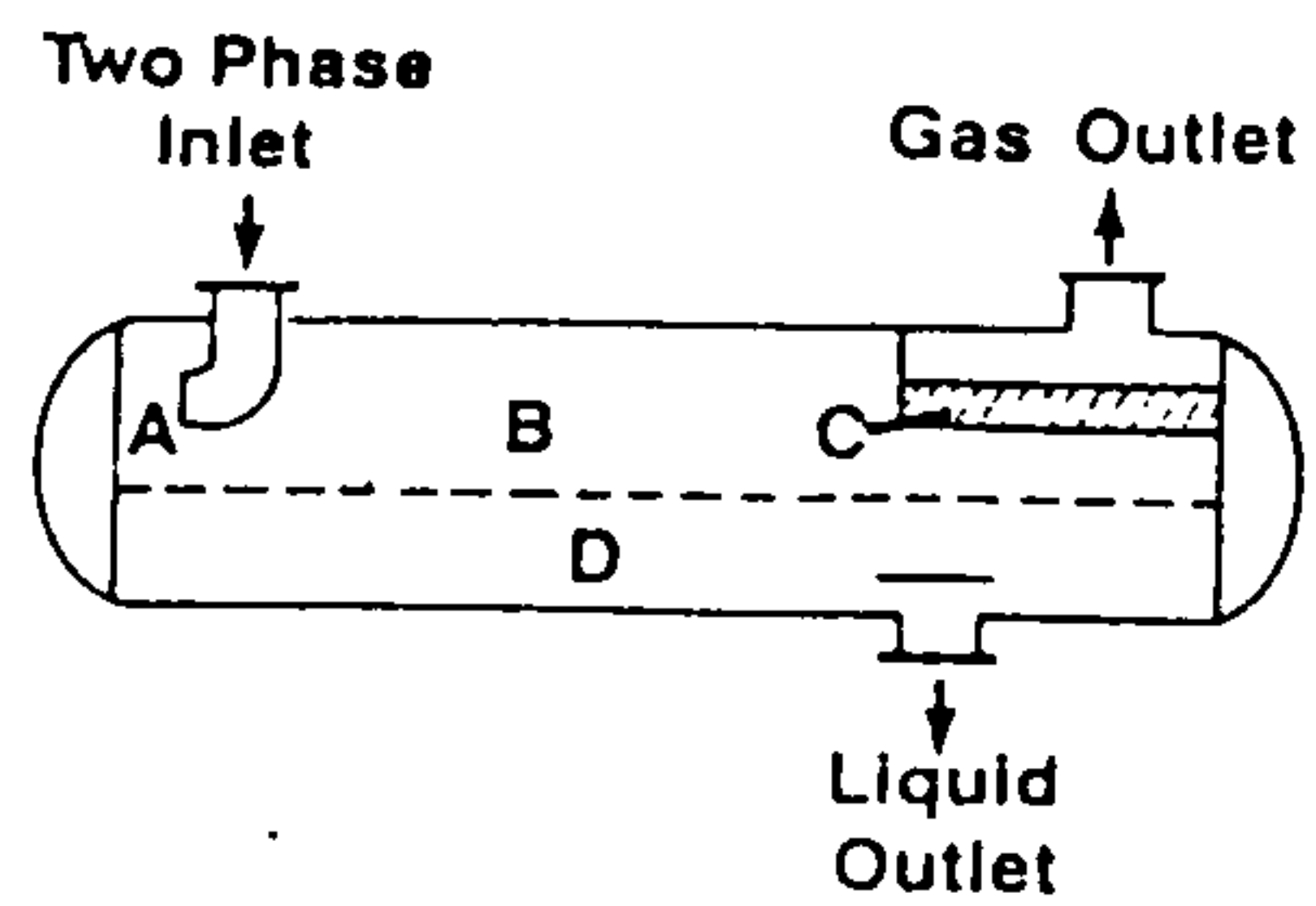
รูป 64 ลักษณะการทำงานของตัวกำจัดไอน้ำ / อากาศ รูปแบบต่างๆ

Example Vertical Separator with Vane Type Mist Extractor

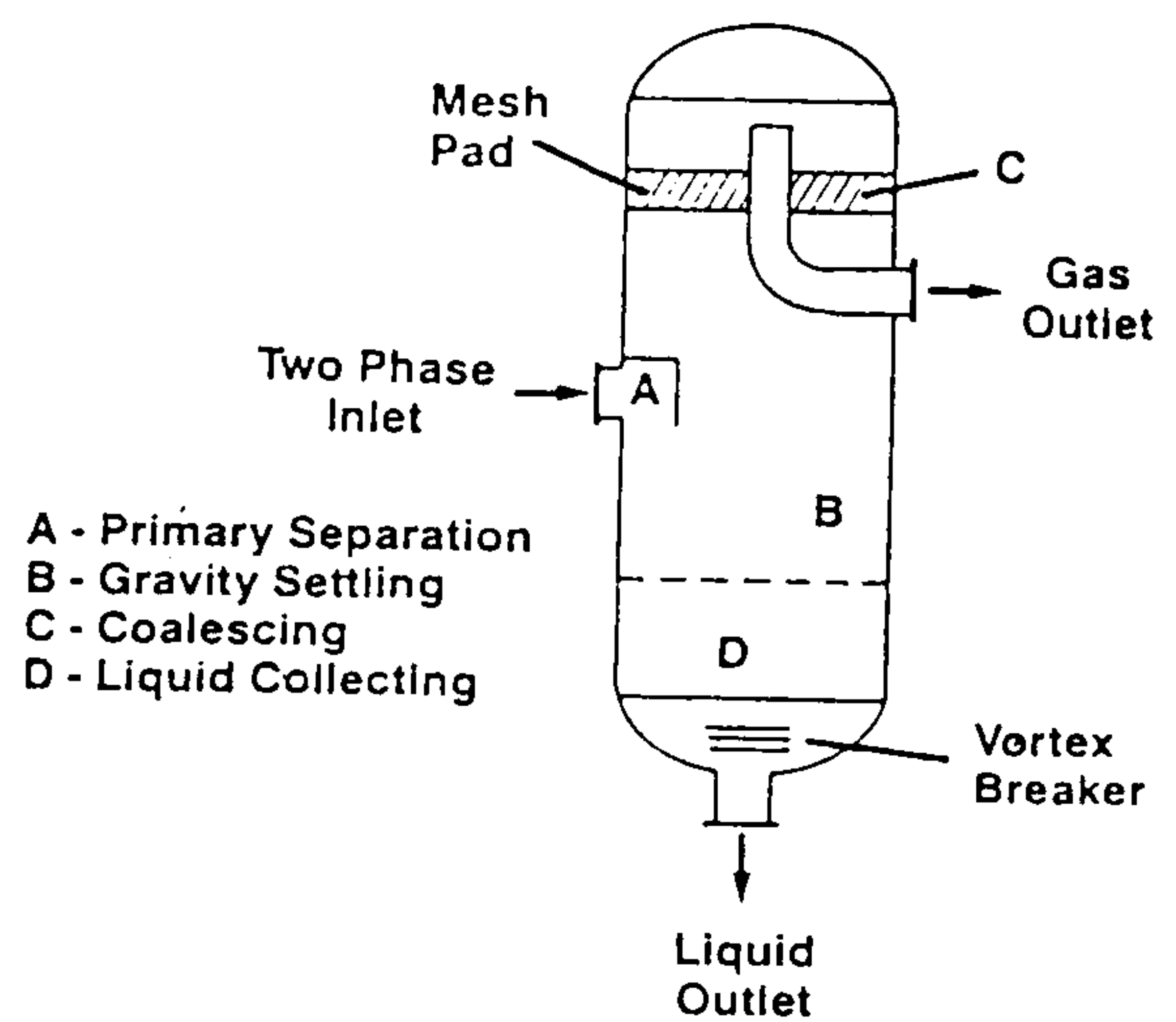


Gas-Liquid Separators

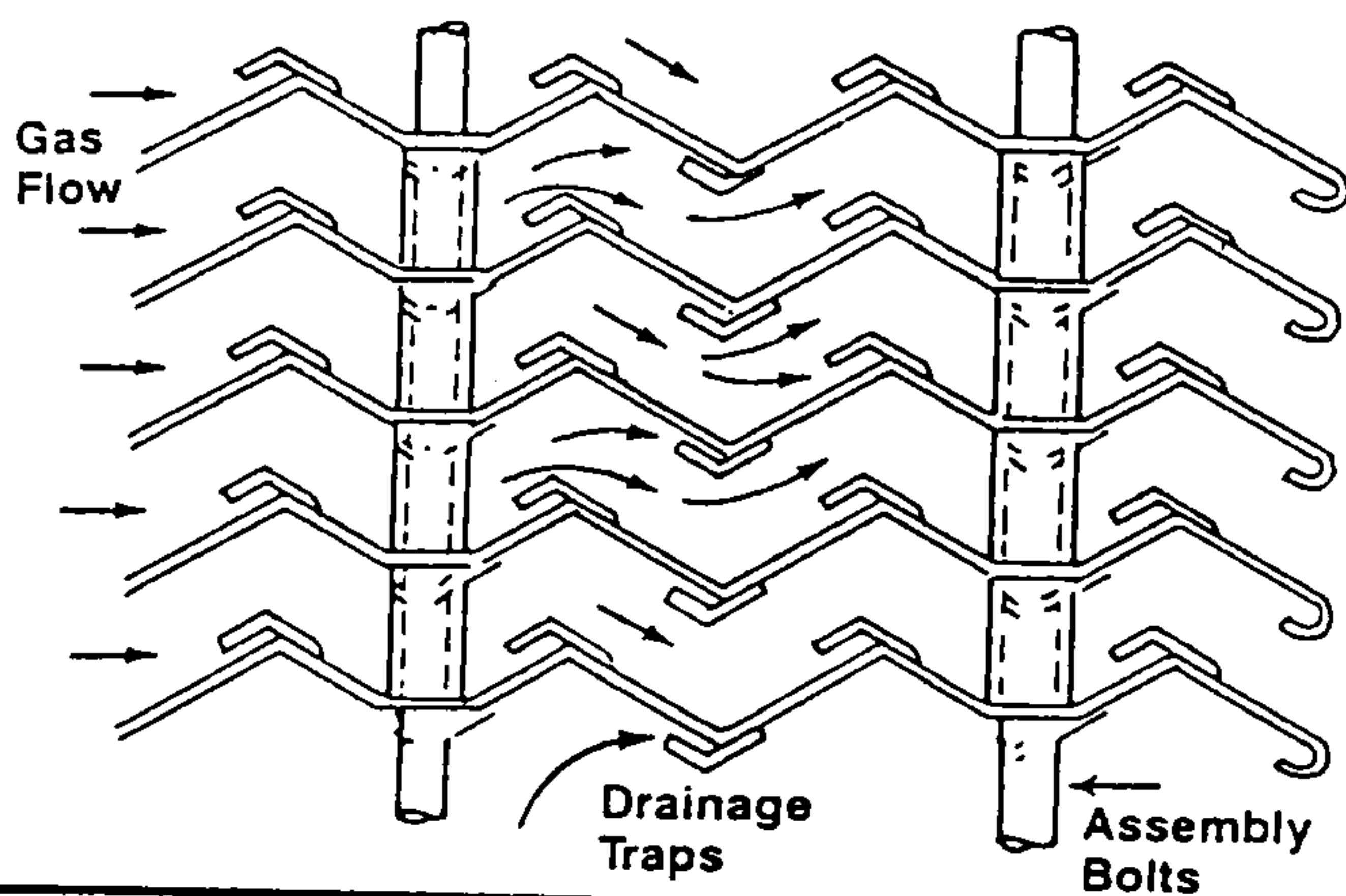
HORIZONTAL



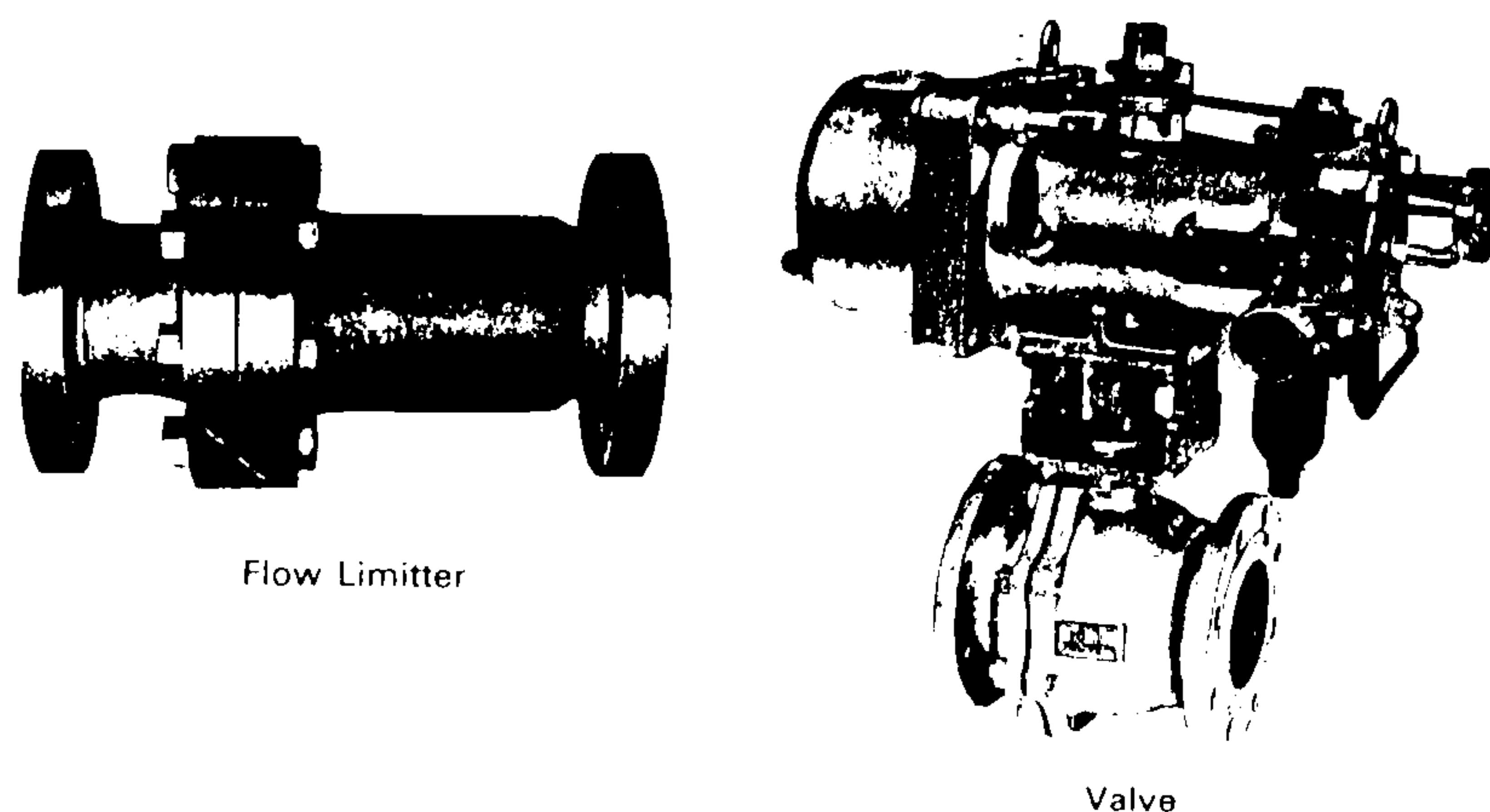
VERTICAL



Cross Section of Example Vane Element Mist Extractor Showing Corrugated Plates with Liquid Drainage Traps



รูป 65 ลักษณะการทำงานของตัวกำจัดไอน้ำ / อากาศ รูปแบบต่างๆ



รูป 66 ตัวจำกัดอัตราการไหล

ความดันดันทางออกจากระบบมาตรวัด (meter run) เพื่อป้องกันการเกิดกลายเป็นไอของเหลว (cavitation)

การติดตั้งชุดเทอร์ไบน์มิเตอร์ (Typical installation in banks)

ในกรณีที่มีการจ่ายผลิตภัณฑ์ลงเรือ หรือรถทางท่อด้วยอัตราการไหลที่แตกต่างกันเป็นช่วงกว้างซึ่งมาตรวัดเพียงตัวเดียวไม่สามารถครอบคลุมถึงได้ จำเป็นต้องใช้มาตรวัดหลายตัวดังนั้นการติดตั้งชุดมาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์โดยเรียงขนานกันเป็นชุด(banks) เพื่อให้ครอบคลุมช่วงการวัดและอัตราการไหลทั้งหมดและสะดวกต่อการใช้งานอีกด้วย ดังนั้นจำเป็นต้องจัดหาวิธีการแบ่งการไหลสมดุย์ระหว่าง มาตรวัด เพื่อให้แต่ละมาตรวัดสามารถทำงานไม่เกินค่าอัตราการไหลสูงสุดตามที่ออกแบบไว้

ในชุดต่อเรียงของมาตรวัดต้องมีวาล์วชนิด block-and-bleed valve เพื่อแบ่งแยกการทำงานของแต่ละมาตรวัดหรือระหว่างทำการตรวจสอบ (proving) มาตรวัดเพื่อให้รู้ว่ามีเพียงมาตรวัดตัวเดียวเท่านั้นที่ต่ออยู่กับตัวสอบเทียบแบบมาตรา (prover) และต้องทำเครื่องหมายแสดงให้เห็นชัดเจนว่าวาล์วดังกล่าวอยู่ในตำแหน่งปิดหรือเปิด

การสอบเทียบมาตรวัด (Meter Proving)

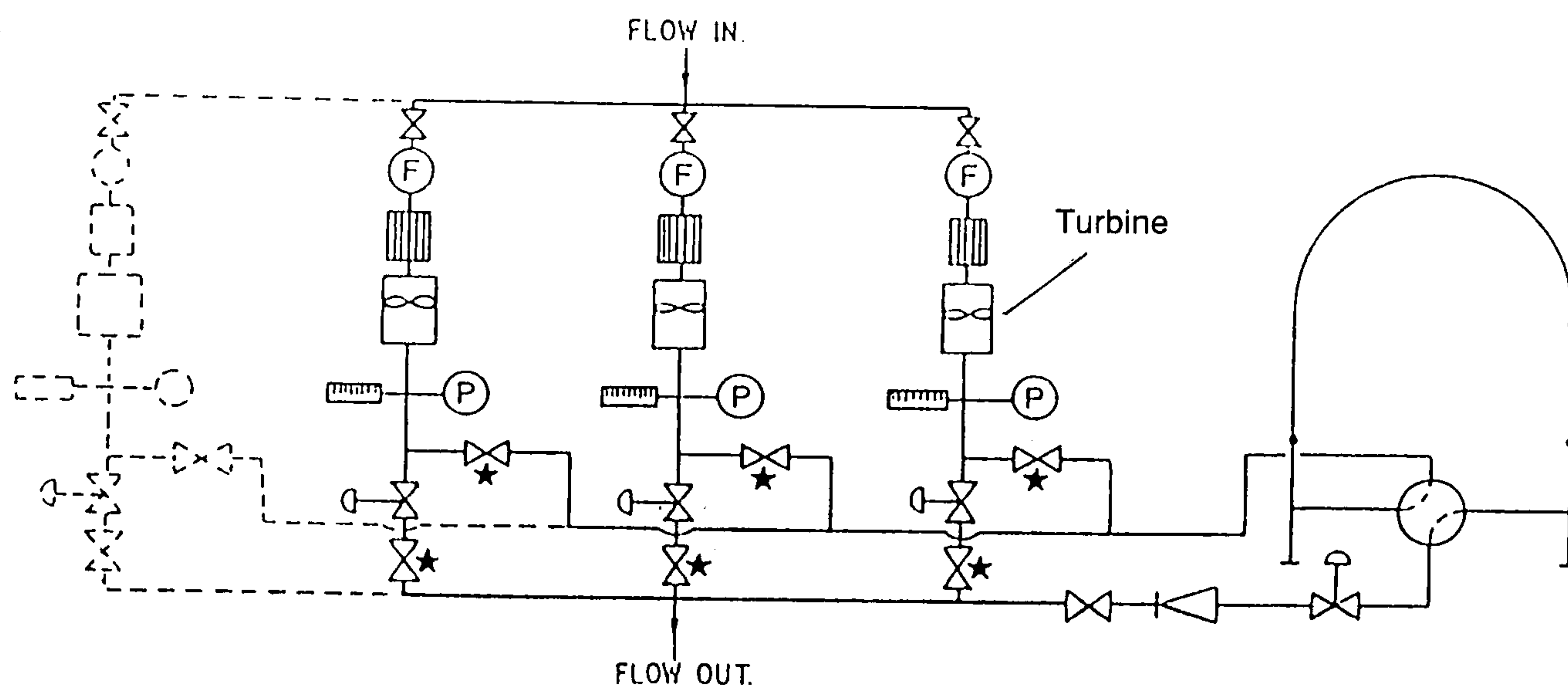
การติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์แต่ละตัวหรือติดตั้งเรียงกันเป็นชุด (banks) ควรจัดให้มีระบบการสอบเทียบพ่วงติดอยู่ด้วยเสมอไม่ว่าจะเป็นการติดตั้งแบบถาวร เช่นแบบมาตรา pipe prover หรือเป็นแบบชั่วคราวซึ่งจะทำการถอดเข้าออกได้โดยจะติดตั้งเฉพาะเมื่อเวลาต้องการทำการสอบเทียบ เช่น ถึงแบบมาตราหรือ master meter เป็นต้น

ดังนั้นการสอบเทียบมาตรวัดด้วยแบบมาตราจึงพอแบ่งออกได้ 3 ลักษณะด้วยกัน

1. ถังตวงแบบมาตรา (prover tank)
2. pipe prover
3. reference หรือ มาตรวัดแบบมาตรา (master meter)

แต่ทั้งนี้และทั้งนั้นการที่จะเลือกวิธีการสอบเทียบขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกันไม่ว่าจะเป็นชนิดและขนาดของมาตรวัด ชนิดของเหลวที่ใช้ในการสอบเทียบ รวมไปถึงปัจจัยต่างๆภายนอกที่ต้องคำนึงถึงให้รอบคอบ ด้วยเหตุนี้การที่จะเลือกวิธีการสอบเทียบมาตรวัดจึงควรได้รับความเห็นชอบพร้อมกันจากทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องไม่ว่าเจ้าของธุรกิจ เจ้าหน้าที่ของรัฐ

TYPICAL BANK OF TURBINE METERS



รูป 67 การติดตั้งชุดเทอร์ไบน์มิเตอร์

ระบบการสอบเทียบมาตรวัด (meter proving system)

ระยะเวลาและความถี่ในการสอบเทียบมาตรวัดนั้นขึ้นกับหลายปัจจัยด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตาม เป็นการไม่เหมาะสมเลยถ้าหากกำหนดช่วงระยะเวลาการสอบเทียบมาตรวัดที่แน่นอนเหมือนกันหมดทุกตัวโดยไม่คำนึงว่ามาตรวัดแต่ละตัวจะนำไปใช้วัดการไหลอย่างไร ปกติแล้วหากใช้มาตรวัดวัดปริมาตรของเหลวซึ่งสะอาดอีกทั้งมีความดัน อัตราการไหล และอุณหภูมิคงที่ตลอดระยะเวลาใช้งาน ค่าเคแฟคเตอร์ (K-factor) ของมาตรวัดดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังนั้นความถี่ในการสอบเทียบไม่จำเป็นต้องสอบเทียบบ่อยครั้งมากนัก แต่ถ้าหากใช้มาตรวัดกับของเหลวที่มี

- เจือด้วยวัสดุระคายเคือง (abrasive material)
- แก๊ส LPG (liquid petroleum gas) ซึ่งมาตรวัดเกิดการสึกหรอได้ง่าย เนื่องจาก

แก๊ส LPG มีคุณสมบัติการหล่อลื่นต่ำ

- ของเหลวมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล และ/หรือ ความหนืด อยู่เสมอ
- เปลี่ยนแปลงชนิดของเหลวบ่อยๆ
- อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

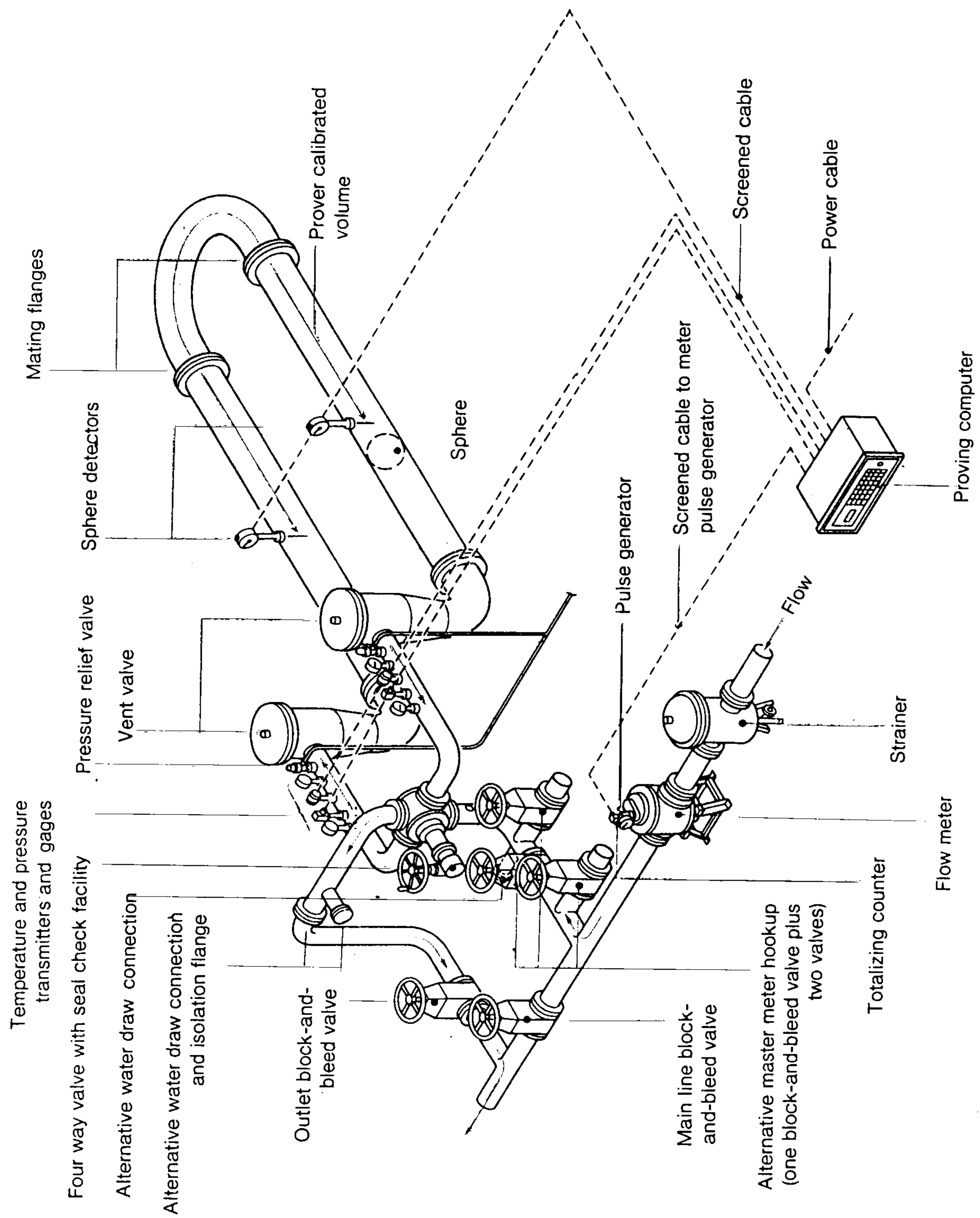
จำเป็นต้องทำการสอบเทียบมาตรวัดให้บ่อยมากขึ้น ทั้งนี้เพราะค่าเคแฟคเตอร์ (K-factor) มีโอกาสที่จะเปลี่ยนแปลงได้ง่าย

ในกรณีมาตรวัดเป็นเครื่องใหม่พึงทำการติดตั้ง จำเป็นต้องทำการสอบเทียบให้บ่อยมากเป็นพิเศษ จนกระทั่งผลการสอบเทียบซ้ำได้ (repeatability) มีค่าใกล้เคียงเป็นที่น่าพอใจในขอบเขตค่าหนึ่ง หรือในกรณีที่มาตรวัดที่พึงทำการซ่อมแซมแต่ถ้าหากค่าเคแฟคเตอร์ (K-factor) เปลี่ยนไปก็ควรทำการสอบเทียบให้บ่อยครั้ง จนกว่าค่าเคแฟคเตอร์ (K-factor) ดังกล่าวมีค่าคงที่ในช่วงที่ยอมรับได้

ด้วยเหตุนี้จึงมีระบบการสอบเทียบมาตรวัดพอแบ่งออกได้ 3 ระบบด้วยกัน

1. ทำการสอบเทียบบ่อยครั้งติดตั้งระบบการสอบเทียบภายในระบบวัด (frequent proving with a built-in dedicated prover with the meters) เป็นระบบที่ให้ความแม่นยำสูงมากเพราะเมื่อทำการสอบเทียบหลายครั้งภายในช่วงเวลาสั้นๆก็ยิ่งให้ผลค่าความสามารถทำซ้ำได้ (repeatability) ดี แต่ระบบนี้เป็นระบบที่มีราคาแพงเนื่องจากต้องติดตั้งตัวแบบมาตรประจำที่กับมาตรวัด (bank of meters) โดยปกติแล้วระบบการสอบเทียบชนิดนี้จะนิยมใช้เฉพาะกับโรงกลั่นน้ำมันหรือแหล่งขนถ่ายหรือจ่ายน้ำมันขนาดใหญ่หรือเพื่อต้องการเรียกเก็บภาษีของรัฐ

2. ทำการสอบเทียบไม่บ่อยครั้ง ใช้แบบมาตรเคลื่อนที่ (infrequent proving using a mobile prover) เป็นระบบที่ให้ความแม่นยำน้อยกว่าระบบแรกเนื่องจากระยะเวลาการสอบเทียบแต่ละครั้งห่างกันมากกว่า ดังนั้นค่าเคแฟคเตอร์ (K-factor) และค่าความสามารถทำซ้ำได้ (repeatability) จึงไม่ดีเท่าที่ควรเพราะไม่สามารถครอบคลุมปัจจัยต่างๆในระยะช่วงเวลาก่อนและหลังทำการสอบเทียบได้ ราคาการติดตั้งมีราคาถูกกว่าระบบแรก สำหรับความแม่นยำโดยรวมเราสามารถทำการแก้ไขเรื่องระยะเวลานานด้วยการเลือกมาตรวัดซึ่งเป็นมาตรวัดที่ให้ค่าความสามารถทำซ้ำได้



รูป 68 ระบบการสอบเทียบภายในระบบมาตรวัด

(repeatability) ดีแม้ระยะเวลาการสอบเทียบจะนาน (เรียกว่า good long-term repeatability) เช่น displacement meter และ vortex-shedding meters เป็นต้น

ข้อจำกัดของระบบการสอบเทียบวิธีนี้อีกอย่างก็คือ ขนาดของแบบมาตรา (prover) ซึ่งจะถูกนำไปติดตั้งบนยานพาหนะสามารถเคลื่อนย้ายไปทำการสอบเทียบมาตรวัดในตำแหน่งต่างๆของสถานที่นั้นๆ หากมีขนาดใหญ่เกินไปก็จะไม่สามารถติดตั้งบนพาหนะได้

3. สอบเทียบไม่บ่อยครั้ง ใช้ห้องปฏิบัติการในการสอบเทียบ (infrequent proving using a central proving station) ให้ความแม่นยำเป็นที่น่าพอใจเพียงระดับหนึ่ง เมื่อมีข้อกำหนดเรื่องขนาดแบบมาตราซึ่งไม่สามารถติดตั้งบนยานพาหนะเคลื่อนย้ายได้ ด้วยเหตุนี้ระบบสอบเทียบจึงสามารถมีขนาดใหญ่เพียงใดก็ได้ตามต้องการ การสอบเทียบจึงกระทำโดยการถอดมาตรวัดออกจากระบบวัดปริมาตร จากนั้นนำมาทำการสอบเทียบภายในห้องปฏิบัติการ การที่จะทำการสอบเทียบมาตรวัดด้วยวิธีการแบบนี้เหมาะกับมาตรวัดซึ่งมีโครงสร้างและการทำงานแข็งแรงไม่เปลี่ยนแปลงค่าเคแฟคเตอร์ (K-factor) ได้ง่ายๆหากทำการเคลื่อนย้าย อีกทั้งให้ค่าความสามารถทำซ้ำได้ช่วงระยะเวลานาน (good long-term repeatability) ที่สำคัญมาตรวัดดังกล่าวนี้ต้องไม่มีความรู้สึกไวต่อการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการไหล (flow conditions) ระหว่างตำแหน่งติดตั้งปกติในระบบวัดกับการติดตั้งขณะทำการสอบเทียบ

สมรรถนะของเทอร์ไบน์มิเตอร์และปัจจัยผลกระทบต่อสมรรถนะ

Turbine Meter Performance

and Factor Affecting Turbine Meter Performance

ในบทนี้เป็นเนื้อหาภาพรวมอย่างกว้างๆถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อการทำงานของเทอร์ไบน์มิเตอร์ ข้อมูลต่างๆในที่นี้จึงเป็นข้อมูลที่ได้จากสิ่งตีพิมพ์ที่เผยแพร่กันอยู่ โดยมาจากหลายแหล่งด้วยกัน เช่น บริษัทผู้ผลิตเทอร์ไบน์มิเตอร์ , ห้องวิจัยตามมหาวิทยาลัยและห้องปฏิบัติการของรัฐบาล เป็นต้น ดังนั้นในที่นี้จึงเป็นเนื้อหากล่าวถึงการทำงานและปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานในบางแง่มุมของเทอร์ไบน์มิเตอร์เท่านั้น หากต้องการสมรรถนะการทำงานอย่างแท้จริงของมาตรวัดเทอร์ไบน์มิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งจึงจำเป็นต้องทำการทดสอบเป็นชนิดหรือเป็นรุ่นๆไปจึงไม่ควรใช้ผลการทดสอบเทอร์ไบน์มิเตอร์ชนิดหนึ่งแล้วนำไปเทียบเคียงเพื่อเป็นข้อมูลของเทอร์ไบน์มิเตอร์อีกชนิดหนึ่ง

ศัพท์ที่ใช้เกี่ยวกับสมรรถนะการทำงาน (Performance Terminology)

สมรรถนะของมาตรวัด (Meter Performance) การแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่วัดได้กับปริมาตรจริงที่ผ่านมาตรวัด

มิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor : MF) การซื้อขายผลิตภัณฑ์ในปริมาตรคราวละน้อยๆและดำเนินการวัดปริมาตรภายใต้เงื่อนไขคงที่หรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง จึงไม่มีความจำเป็นที่ต้องทำการปรับค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดซึ่งอยู่ในช่วงการวัดได้ที่ผ่านการทดสอบแล้วให้ผลการวัดมีค่าแม่นยำ ตัวอย่างมาตรวัดประเภทนี้ได้แก่ มาตรวัดที่ใช้ในการขายปลีกตามสถานีบริการน้ำมัน เป็นต้น แต่หากการซื้อขายหรือการขนส่งถ่ายผลิตภัณฑ์คราวละมากๆโดยผ่านการวัดด้วยมาตรวัดเพียงตัวเดียวในการวัดผลิตภัณฑ์ต่างชนิดกันหรือทำการวัดที่อัตราการไหลแตกต่างกัน เป็นการยากที่ทำการปรับแต่งแก้ไขมาตรวัดในการซื้อขายหรือขนถ่ายแต่ละครั้ง ด้วยเหตุนี้หลังสอบเทียบมาตรวัดด้วยแบบมาตราหรือมาตรวัดซึ่งผ่านสอบเทียบแล้วมีความแม่นยำสูง (master meter) โดยการหามิเตอร์แฟคเตอร์ในช่วงแคบๆของแต่ละสภาวะการทำงาน จึงจำเป็นต้องทำการชิลด์ตัวปรับแต่งมาตรวัดเพื่อป้องกันการปรับแต่งใดๆที่อาจจะเกิดขึ้นโดยไม่ได้รับอนุญาต วัดอุปสงค์การหามิเตอร์แฟคเตอร์ก็คือเพื่อให้แน่ใจว่าการวัดแต่ละครั้งมีความแม่นยำเพียงพอ โดยไม่คำนึงถึงสภาวะการทำงานที่เปลี่ยนไปเช่น ความหนาแน่น , ความหนืด , อัตราการไหล , อุณหภูมิ , ความดันหรือคุณสมบัติการหล่อลื่นของเหลวที่วัดแต่อย่างไรก็ตามบ่อยครั้งที่ทำการสอบเทียบมาตรวัดภายใต้สภาวะเงื่อนไขการทำงานจำเพาะเพียงสภาวะการทำงานสภาวะหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นหากสภาวะการทำงานของมาตรวัดจำเพาะหนึ่งๆได้เปลี่ยนไป เช่น อัตราการไหลเปลี่ยนแปลงมากเกินไป , ความหนืดของเหลวที่วัดอยู่เปลี่ยนไปมาก เป็นต้น ต้องดำเนินการสอบเทียบมาตรวัดใหม่เพื่อหาค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ใหม่ ในทางปฏิบัติจึงควร

ทำการสอบเทียบมาตรวัดให้มีสถานะการทดสอบใกล้เคียงกับสถานะการทำงานจริงของมาตรวัดให้มากที่สุดเพื่อให้ค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ซึ่งให้ผลการวัดมีความแม่นยำมากที่สุด

คำจำกัดความของมิเตอร์แฟคเตอร์จึงหมายถึงอัตราส่วนของปริมาณจริงที่ผ่านมาตรวัดขณะทำการสอบเทียบ (proving) กับปริมาณที่วัดได้จากมาตรวัด

$$MF = \frac{V}{V_m}$$

เมื่อ V = ปริมาณจริงที่ผ่านมาตรวัด ณ.สถานะการทำงานของมาตรวัด
 V_m = ปริมาณที่อ่านได้จากมาตรวัด

แต่พบว่าระหว่างทำการสอบเทียบ (proving) อุณหภูมิและความดันภายในมาตรวัดและแบบมาตรา (prover) มีผลกระทบอย่างมากต่อการคำนวณหามิเตอร์แฟคเตอร์ ทั้งนี้เพราะการหาค่าปริมาณจริง ๆ ของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดระหว่างทำการสอบเทียบต้องหาจากปริมาณจริงที่วัดได้ของแบบมาตราซึ่งค่อนข้างเป็นวิธีทางอ้อมและมีปัญหา ดังนั้นเพื่อให้เป็นมาตรฐานการปฏิบัติเดียวกันจึงกำหนดความหมายมิเตอร์แฟคเตอร์ใหม่ คือ

$$MF = \frac{V_{pc}}{V_{mc}}$$

เมื่อ MF = มิเตอร์แฟคเตอร์มาตรฐาน (standard meter factor)
 V_{pc} = ปริมาณของเหลวภายในแบบมาตราแก้ไขค่าไปยังสถานะมาตรฐาน (60 °F , 0.0 psig)
 V_{mc} = ปริมาณที่อ่านได้จากมาตรวัดแก้ไขค่าไปยังสถานะมาตรฐาน (60 °F , 0.0 psig)

เนื่องจากมิเตอร์แฟคเตอร์ที่คำนวณได้สามารถใช้ได้เฉพาะในช่วงอุณหภูมิทำงาน (operating temperature) และความดันทำงาน (operating pressure) จำกัดค่าหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นขณะทำการวัดด้วยมาตรวัดต้องคำนึงเสมอว่าอุณหภูมิและความดันต้องไม่มีค่าแตกต่างไปจากค่าอุณหภูมิและค่าความดันขณะทำการสอบเทียบมากจนเกินไปจนเป็นสาเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะและขนาดของโครงสร้างภายในตัวมาตรวัดหรือความหนืดของเหลวที่ทำการวัดอยู่ นั้นหมายถึงมิเตอร์แฟคเตอร์อาจเปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสถานะการทำงานของมาตรวัดเปลี่ยนแปลงไปจากสถานะเงื่อนไขการสอบเทียบก็ทำการสอบเทียบใหม่ทุกครั้ง

เมื่อรู้ค่ามิเตอร์แฟคเตอร์แล้วสามารถหาค่าปริมาณจริงของเหลวได้หลังจากทำการวัดได้โดย

$$\text{ปริมาณจริงที่วัดได้} = MF \times \text{ปริมาณที่อ่านได้จากมาตรวัด}$$

หรือ

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

เมื่อ

C_{ilm} = ค่าแก้ไขค่าอุณหภูมิเพื่อหาปริมาตรที่สภาวะมาตรฐานจากสภาวะทำงานของมาตรวัด

C_{plm} = ค่าแก้ไขค่าความดันเพื่อหาปริมาตรที่สภาวะมาตรฐานจากสภาวะทำงานของมาตรวัด

มาตรวัดบางชนิดมีตัวชดเชยอุณหภูมิ (temperature compensated meter) เมื่อต้องการรู้ค่าปริมาตรจริงที่วัดได้ดังนั้นจึงต้องคูณปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัดด้วย **composite meter factor** ไม่ใช่คูณด้วยมิเตอร์แฟคเตอร์ เมื่อ composite meter factor คือ ผลคูณของ MF กับ C_{plm} นั้นเอง เพราะฉะนั้นจึงควรระวังความสับสนระหว่าง standard meter factor กับ composite meter factor

ค่าผิดพลาด (Meter error) บอกถึงค่าความแตกต่างปริมาตรที่ผ่านมาตรวัดจริง (volume discharged) กับปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัด (indicated volume) ซึ่งส่วนใหญ่จะบอกค่าเป็นเปอร์เซ็นต์

$$\text{Meter error} = \frac{\text{Volume discharge} - \text{indicated Volume}}{\text{Volume discharge}} \%$$

ค่าล้นรอด (Slippage หรือ slip flow) คือปริมาตรของเหลวที่อัตราการไหลหนึ่งไหลผ่านมาตรวัดโดยมาตรวัดไม่ได้ทำการจดบันทึกค่าปริมาตรดังกล่าว

ความเป็นเชิงเส้นตรง (Linearity) ค่าเบี่ยงเบนมากที่สุดจากค่าเฉลี่ยมิเตอร์แฟคเตอร์ของกราฟสมรรถนะมาตรวัดระหว่างช่วงการวัดค่าได้ที่อัตราการไหลสูงสุดและอัตราการไหลต่ำสุด

อัตราการหรีวาล์ว (Turn down ratio) , ช่วงประสิทธิภาพ (effective range) หรือ ช่วงอ่านค่าได้ (rangeability) ศัพท์ทั้ง 3 นี้มีความหมายเหมือนกัน คือ หมายถึงช่วงอัตราการไหลของเหลวที่ยังคงทำให้การทำงานของมาตรวัดไม่ได้เบี่ยงเบนไปจากขอบเขตความผิดพลาดที่กำหนดไว้

เค-แฟคเตอร์ (K-factor) ในบางครั้งไม่สามารถอ่านค่าปริมาตรจากมาตรวัดบางชนิดได้โดยตรงแต่มาตรวัดดังกล่าวจะให้ค่าเป็นพัลส์แรงดันไฟฟ้าด้วยเหตุนี้จึงใช้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัลส์แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นของมาตรวัดกับปริมาตรไหลผ่านมาตรวัด ดังนั้น

$$K - factor = \frac{n}{V}$$

เมื่อ n = จำนวนครั้งของพัลส์ที่วัดได้จากมาตรวัด

V = ปริมาตรที่วัดได้จากแบบมาตรา (prover)

ในทางปฏิบัติ เพื่อให้ได้ค่าเค-แฟคเตอร์ (K-factor) ที่แม่นยำสูงจะดำเนินการทดสอบหาค่า n และ ค่า V หลายครั้ง ด้วยเหตุนี้ปริมาตรจริงที่ไหลผ่านมาตรวัดจึงมีค่า

$$V_{actual} = \frac{n}{K - factor}$$

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

$$\text{Meter factor} = \frac{1}{K - factor}$$

ข้อมูลสมรรถนะเทอร์ไบน์มิเตอร์ที่ควรรู้

นอกจากควรรู้ลักษณะการทำงานของเทอร์ไบน์มิเตอร์เป็นอย่างไรมีกลไกการบันทึกค่าด้วยวิธีการกลไกการนับ (mechanical counter) หรือตัวนับอิเล็กทรอนิกส์ (electronic pulse counter) และวิธีการสร้างห้วงพัลส์อย่างไร สิ่งที่ต้องควรรู้เพิ่มเติมในการตัดสินใจเลือกมาตรวัดหรือต้องทำงานกับมาตรวัดในการวัดปริมาตรได้แก่ สมรรถนะขีดความสามารถของเทอร์ไบน์มิเตอร์และเงื่อนไขพิเศษ เป็นต้น ได้แก่

1. **ขนาดเทอร์ไบน์มิเตอร์ (Nominal Bore Size)** เป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ต้องทราบเพื่อนำไปติดตั้งภายในระบบวัดปริมาตรว่าในระบบวัดปริมาตรดังกล่าวมีขนาดท่อเท่าไร
2. **อัตราทนความดันหน้าแปลนท่อ (Flange Rating)** เป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงหน้าแปลนว่าสามารถทนความดันภายในระบบท่อที่ออกแบบไว้ว่ามีความดันเท่าไร เช่น ระบบท่อจะมีความดัน ANSI Class 150 หรือ 300 นั้นหมายถึงต้องเลือกหน้าแปลนของมาตรวัดทนความดันได้ 150 psi/in² หรือ 300 psi /in² เช่นกัน
3. **อัตราการไหล (Flow Range)** เป็นขีดความสามารถของเทอร์ไบน์มิเตอร์ที่สามารถวัดอัตราการไหลได้ภายในอัตราการไหลช่วงหนึ่งเมื่อใช้ของเหลวที่มีความหนืดค่าหนึ่ง

GENERAL SPECIFICATIONS

Type		Small Type	Standard Type/High Viscosity Type
Nominal Bore Size mm (inch)		8(1/4), 10(3/8), 15(1/2), 20(3/4), 25(1), 40(1-1/2), 50(2)	80(3), 100(4), 150(6), 200(8), 300(12), 350(14), 400(16), 450(18), 600(24)
Flange Rating		JIS 10, 20, 30 kgf/cm ² , ANSI Class 150, 300	
Materials	Body	Stainless steel	Steel or Stainless steel
	Rotor	Stainless steel	Stainless steel
	Shaft	Cemented carbide alloy	
	Bearings	Ceramic	Cemented carbide alloy
Flow Range		0.27 ~ 54 m ³ /h (Kinematic Viscosity: 1cSt, Accuracy: ±0.5% Temperature: -10 ~ +120°C)	Standard Type: 10 ~ 9,500 m ³ /h (Kinematic viscosity: 1cSt, Accuracy: ±0.5%) High viscosity Type: 45 ~ 9,500 m ³ /h (Kinematic viscosity: 10cSt, Accuracy: ±0.5%)
Operating Temp. Range		-200 ~ +300°C (Std. -30 ~ +120°C)	-30 ~ +180°C (Std. -30 ~ +120°C)
Accuracy		Within ±0.5% for general purpose (Under piping condition of specified flow straightning devices installed) Within ±0.2% for transaction (on nominal bore size of 8 & 10 mm, ±0.5% only)	
Repeatability		Better than 0.05%	Better than 0.02%
Installation		Horizontal	Horizontal (For vertical installation, consult factory)
Liquid to be metered		Oils, petrochemicals, chemicals, water	

● Flow Range (Temperature: -30 ~ +120°C, Accuracy: within ±0.5%)

Model		Nominal bore size mm (inch)	Max. flow rate (m ³ /h) Note 1		Min. flow rate (m ³ /h)	
			Intermittent	Continuous		
Small Type	Note 2	TB1008	8 (1/4")	1.3	0.8	0.27
		TB1010	10 (3/8")	2.6	1.7	0.42
		TB1015	15 (1/2")	4.2	2.7	0.63
		TB1020	20 (3/4")	8.4	5.5	0.90
		TB1025	25 (1")	13	8.5	1.5
		TB1040	40 (1-1/2")	33	20	2.7
		TB1050	50 (2")	54	36	4.3
Standard Type	Note 2	TB1080	80 (3")	160	125	10
		TB1100	100 (4")	300	240	20
		TB1150	150 (6")	650	500	50
		TB1200	200 (8")	1400	1100	70
		TB1250	250 (10")	2200	1600	100
		TB1300	300 (12")	3000	2400	180
		TB1350	350 (14")	3500	2800	280
		TB1400	400 (16")	4500	3600	350
		TB1450	450 (18")	6500	5200	450
		TB1600	600 (24")	9500	7500	750
High Viscosity Type	Note 3	TB5080	80 (3")	160	125	45
		TB5100	100 (4")	300	230	60
		TB5150	150 (6")	600	500	85
		TB5200	200 (8")	1400	1100	110
		TB5250	250 (10")	2200	1600	150
		TB5300	300 (12")	3000	2400	200
		TB5350	350 (14")	3500	2800	280
		TB5400	400 (16")	4500	3600	350
		TB5450	450 (18")	6500	5200	450
		TB5600	600 (24")	9500	7500	750

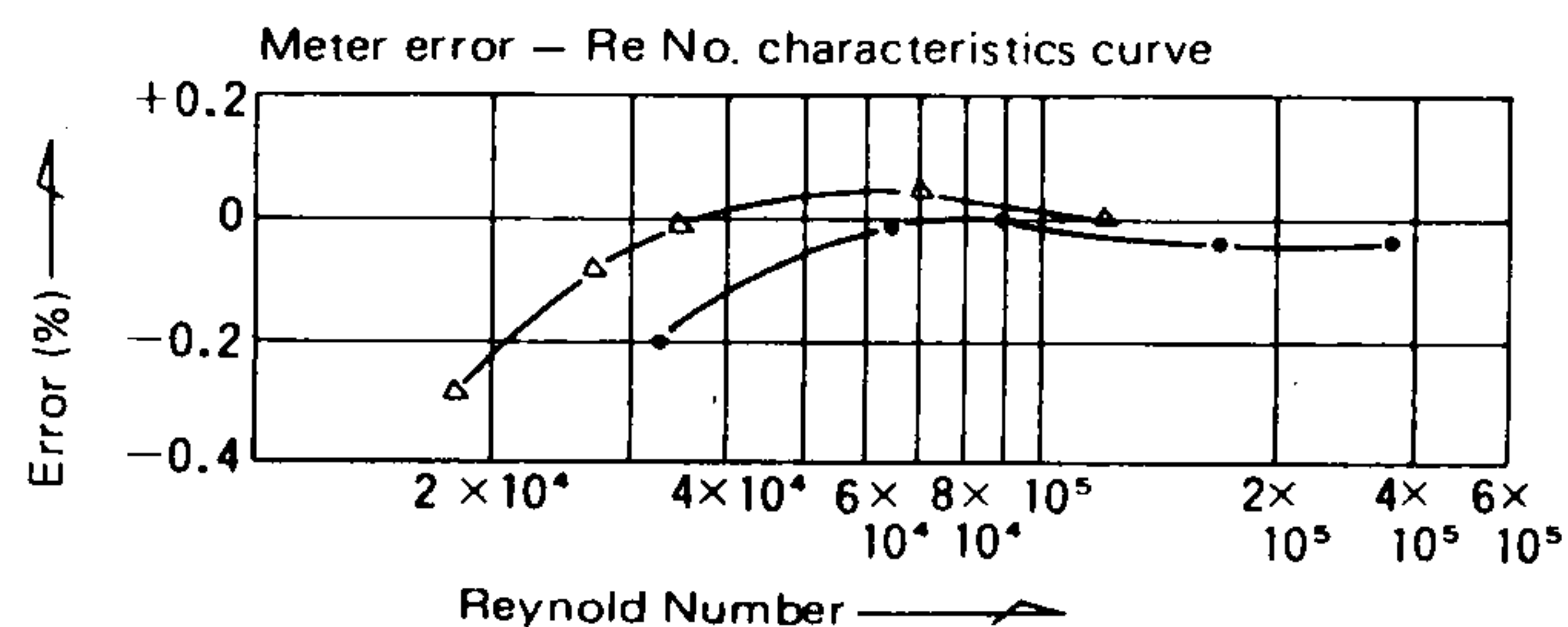
Note 1: "Intermittent" means less than 8 hours operation per day.
"Continuous" means continuous operation.

2: Kinematic viscosity: 1cSt.

3: Kinematic viscosity: 9cSt.

For more detailed information, please refer to General Specification Sheets.

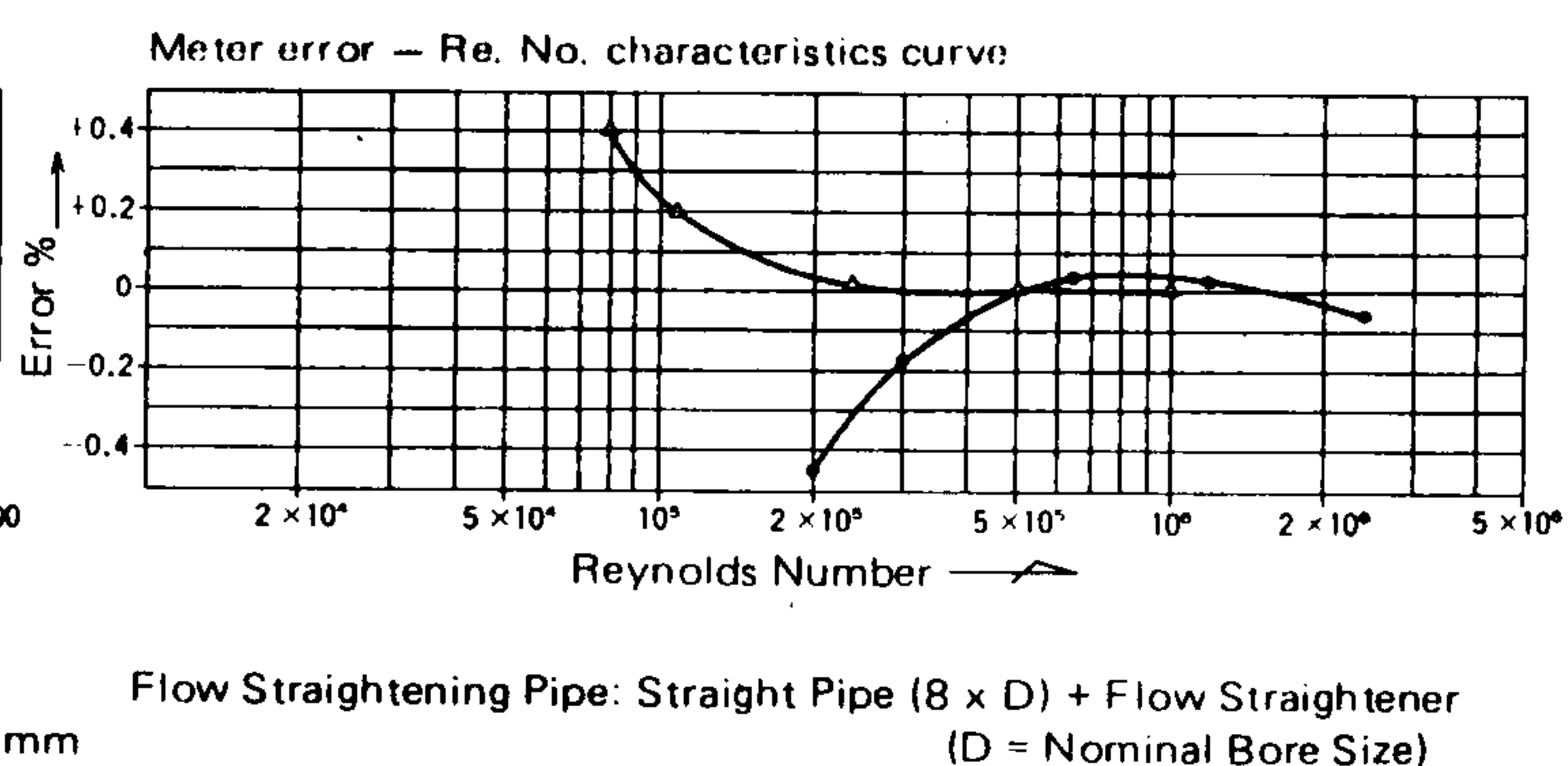
● **Small Type**



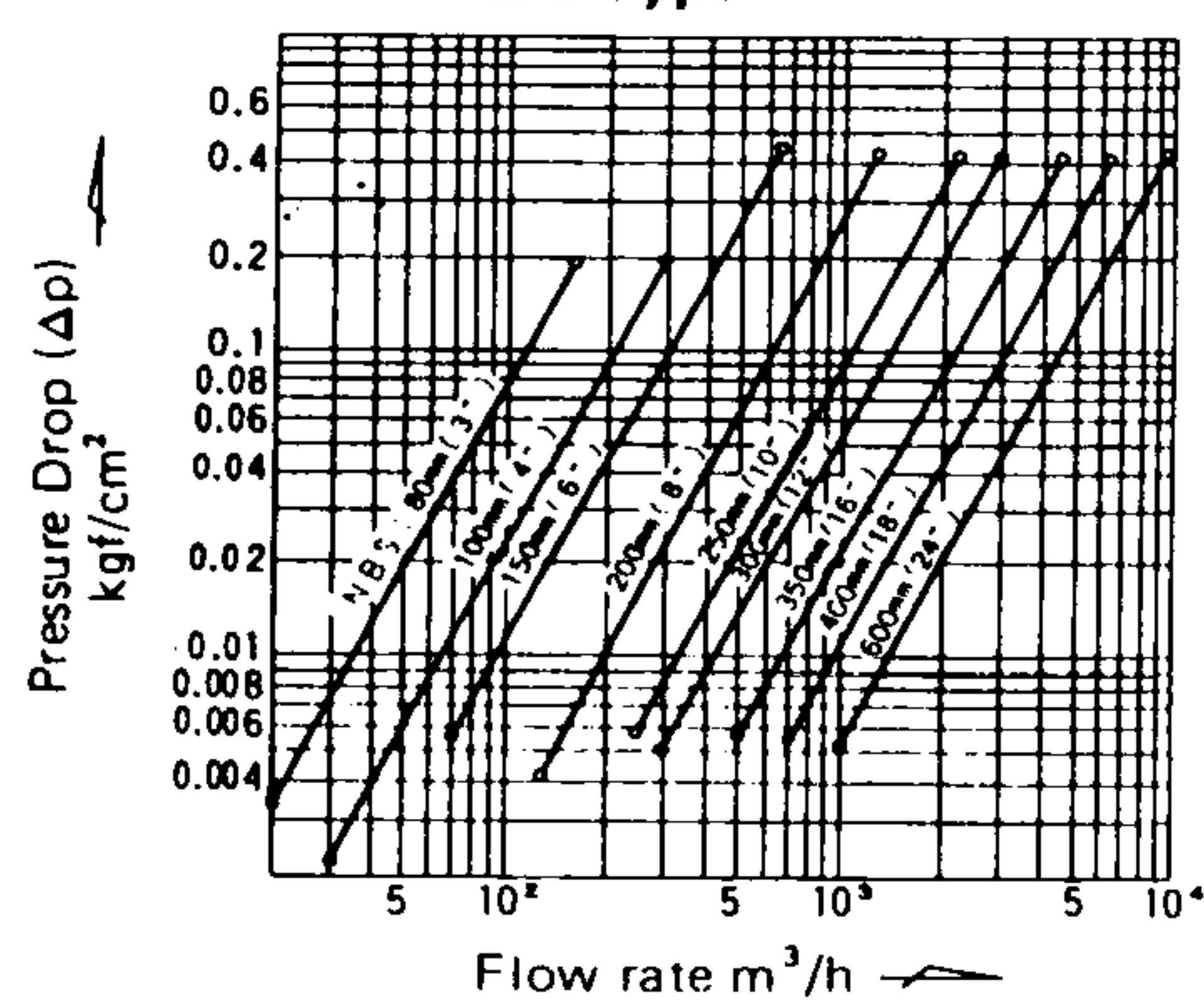
▲ Kerosene
 ● Gasoline
 Nominal Bore Size: 25 mm

Straight pipe: 50 x D
 (D = Nominal Bore Size)

● **Standard Type**

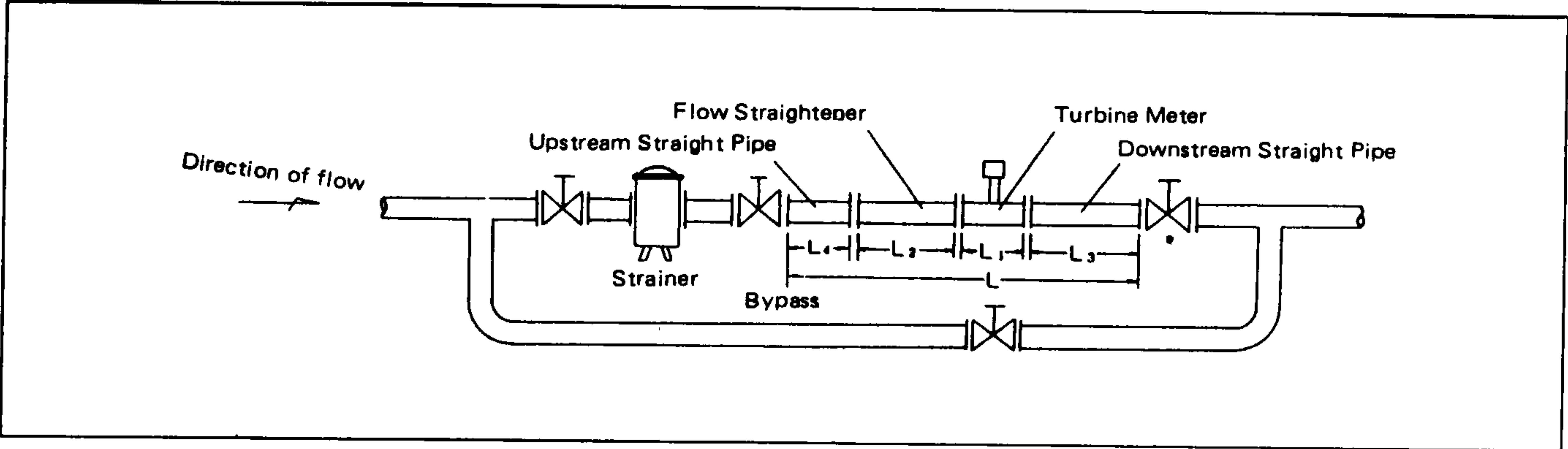


- **Small Type**

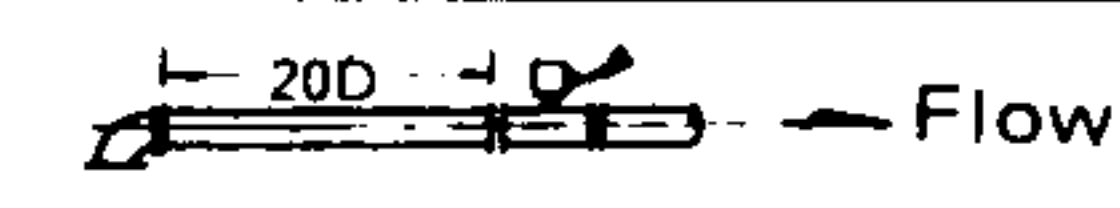
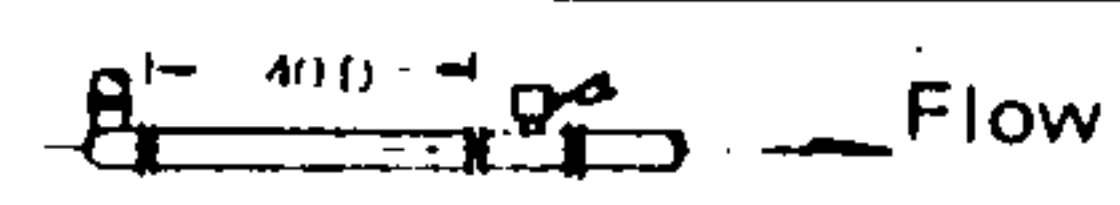


N.B.S.: Nominal Bore Size

TYPICAL PIPING INSTRUCTION



Straight pipe section length recommended in API standards
D = Piping I.D.

Piping Condition		Required of Length Straight Pipe	Description
Reducer		15D min.	A concentric reducer upstream of meter.
Elbow		20D min.	An elbow upstream of meter.
		25D min.	Two elbows in the horizontal plane upstream of meter.
		40D min.	Two elbows in vertical plane upstream of meter.
Sluice Valve		50D min.	A fully open sluice valve upstream of meter.

*The minimum length required for downstream pipe is 5D.

รูป ๑๑(ต่อ) ตัวอย่าง catalog ของเทอร์ไบน์มิเตอร์

4. **ช่วงอุณหภูมิใช้งาน (Operating Temperature Range)** บ่งบอกถึงเทอร์ไบน์มิเตอร์สามารถทำการวัดอัตราการไหลและให้ผลการวัดอย่างแม่นยำในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง

5. **ค่าลักษณะความเป็นเชิงเส้นตรง (Linearity) หรือ ความแม่นยำ (Accuracy)** มาตรฐานวัดขนาดใดมีค่าลักษณะความเป็นเชิงเส้นตรง (Linearity) ในช่วงการอ่านค่า (effective range) เช่น

มาตรฐานเทอร์ไบน์มิเตอร์ขนาด 1 นิ้วหรือใหญ่กว่า ค่าลักษณะความเป็นเชิงเส้นตรง (Linearity) เท่ากับ $\pm 0.25 \%$ ของการอ่านค่าตลอดช่วงการไหลปกติจนถึงช่วงอ่านค่าสูงสุด (maximum flow range)

6. **ค่าความสามารถทำซ้ำได้ (Repeatability)** เป็นความสามารถของเทอร์ไบน์มิเตอร์ที่จะให้ผลการอ่านค่าการวัดได้ไม่แตกต่างกันในการวัดปริมาตรในจำนวนครั้งที่ทำการวัดที่แน่นอน เมื่อทำการทดสอบซ้ำโดยใช้เครื่องมือชุดเดียวกัน วิธีการทดสอบแบบเดียวกันและเจ้าหน้าที่ทดสอบคนเดียวกัน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์

ความสามารถผลิตซ้ำ (Reproducibility) เป็นการทดสอบโดยใช้เครื่องมือคนละชุดและเจ้าหน้าที่คนละคนแต่วิธีการทดสอบไม่จำเป็นต้องเป็นวิธีการเดียว

7. **ความดันตก (Pressure drop)** บ่งบอกให้รู้ว่าหากทำการติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์เข้ากับระบบท่อของการวัดจะทำให้ความดันในระบบท่อสูญเสียลดลงมีค่าเท่าไร

8. **คุณลักษณะสมรรถนะ (Performance Characteristics)** เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับค่าผิดพลาด (error) คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการวัดของเหลวชนิดหนึ่งๆ เช่น น้ำ, น้ำมันเบนซิน, น้ำมันก๊าด เป็นต้น

9. **ขนาดชิ้นส่วนของเทอร์ไบน์มิเตอร์ (Dimension)** ซึ่งจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับขนาดของชิ้นส่วนต่างๆของเทอร์ไบน์มิเตอร์ ระยะต่างๆของชิ้นส่วนดังกล่าวมีประโยชน์สำหรับเป็นข้อมูลในการติดตั้งหรือวางแผนระบบมาตรวัด

10. **มิเตอร์แฟคเตอร์ (Meter Factor)** เป็นสิ่งสำคัญมากเป็นค่าเฉพาะตัวมาตรวัด บอกให้รู้ว่าของเหลวไหลผ่านมาตรวัดด้วยปริมาตรเท่าไรต่อจำนวนหนึ่งพัลส์แรงดันไฟฟ้าที่เทอร์ไบน์มิเตอร์ผลิตออกมา

11. **ลักษณะการติดตั้ง (Installation)** บ่งบอกถึงลักษณะการติดตั้งของเทอร์ไบน์มิเตอร์ว่าควรอยู่ในลักษณะแนวนอน (Horizontal) หรือแนวตั้ง (Vertical) หรือได้ทั้งแนวนอนและแนวตั้ง

12. **ขดลวดรับ (Pickup-coil)** - เป็นข้อมูลเกี่ยวกับแรงดันไฟฟ้าที่เทอร์ไบน์มิเตอร์ผลิตและขดลวดรับเหนี่ยวนำไปนั้นมีค่าเท่าไร หน่วย peak-to-peak voltage : V_{p-p} ยกตัวอย่างเช่น

เทอร์ไบน์มิเตอร์ชนิด	Rim type	Blande type
ที่ Maximum flow	0.1 V	0.3 V
ที่ Minimum flow	5.0 V	4.0 V

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเทอร์ไบน์มิเตอร์

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงานและสมรรถนะของมาตรวัดและมิเตอร์แฟคเตอร์ ได้แก่

- อัตราการไหล (Flow rate) หรือ ความเร็วของเหลว
- ความหนืดของเหลว (liquid viscosity)
- อุณหภูมิของเหลว (liquid temperature)
- ความหนาแน่นของเหลว (liquid density)
- ความดันของเหลวไหลเข้ามาตรวัด (pressure of the flowing liquid) หรือความดันภายในท่อ (line pressure)
- การเปลี่ยนแปลงของขนาดหรือระยะช่องว่างของโครงสร้างชิ้นส่วนมาตรวัด อันเนื่องจากการสึกหรอหรือความเสียหายที่เกิดขึ้น
- สภาพการไหลเปลี่ยนแปลง อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดท่อ , วาล์ว , หรือ ตำแหน่งติดตั้งวาล์วที่มีผลต่อรูปแบบการไหล (velocity profile) , เกิดการไหลหมุน (rotation) , เกิดการไหลหมุนวน (swirl)
- ความสะอาดปราศจากสิ่งปนเปื้อนและความสามารถในการหล่อลื่นของของเหลว
- คุณสมบัติและลักษณะการทำงานของแบบมาตรา (prover)
- วัตถุแปลกปลอมหลงเข้าระบบท่อ

มีปัจจัยหลายอย่างที่สามารถแก้ไขหรือกำจัดให้หายไปได้ง่าย เช่น วัตถุแปลกปลอมหลุดเข้ามาตรวัด แก้ปัญหาได้โดยติดตั้งตัวกรอง (filter หรือ strainer) แต่ก็มีหลายปัจจัยที่ต้องแก้ไขตั้งแต่เริ่มต้นในการออกแบบระบบการวัดปริมาตรและการทำงานของระบบการวัดปริมาตร

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงานหรือสมรรถนะของเทอร์ไบน์มิเตอร์มากที่สุดคือ อัตราการไหล (flowrate) , ความหนืด (viscosity) , อุณหภูมิ , และสิ่งแปลกปลอม (เช่น พาราฟิน (paraffine) ในของเหลว) ดังนั้นหากทำการสอบเทียบ (proving) มาตรวัดที่สถานะเงื่อนไขการสอบเทียบคล้ายกับสถานะเงื่อนไขทำงานจริง ๆ ก็จะได้เทอร์ไบน์มิเตอร์ที่ให้ผลแม่นยำในการวัดปริมาตรสูงมากทีเดียว

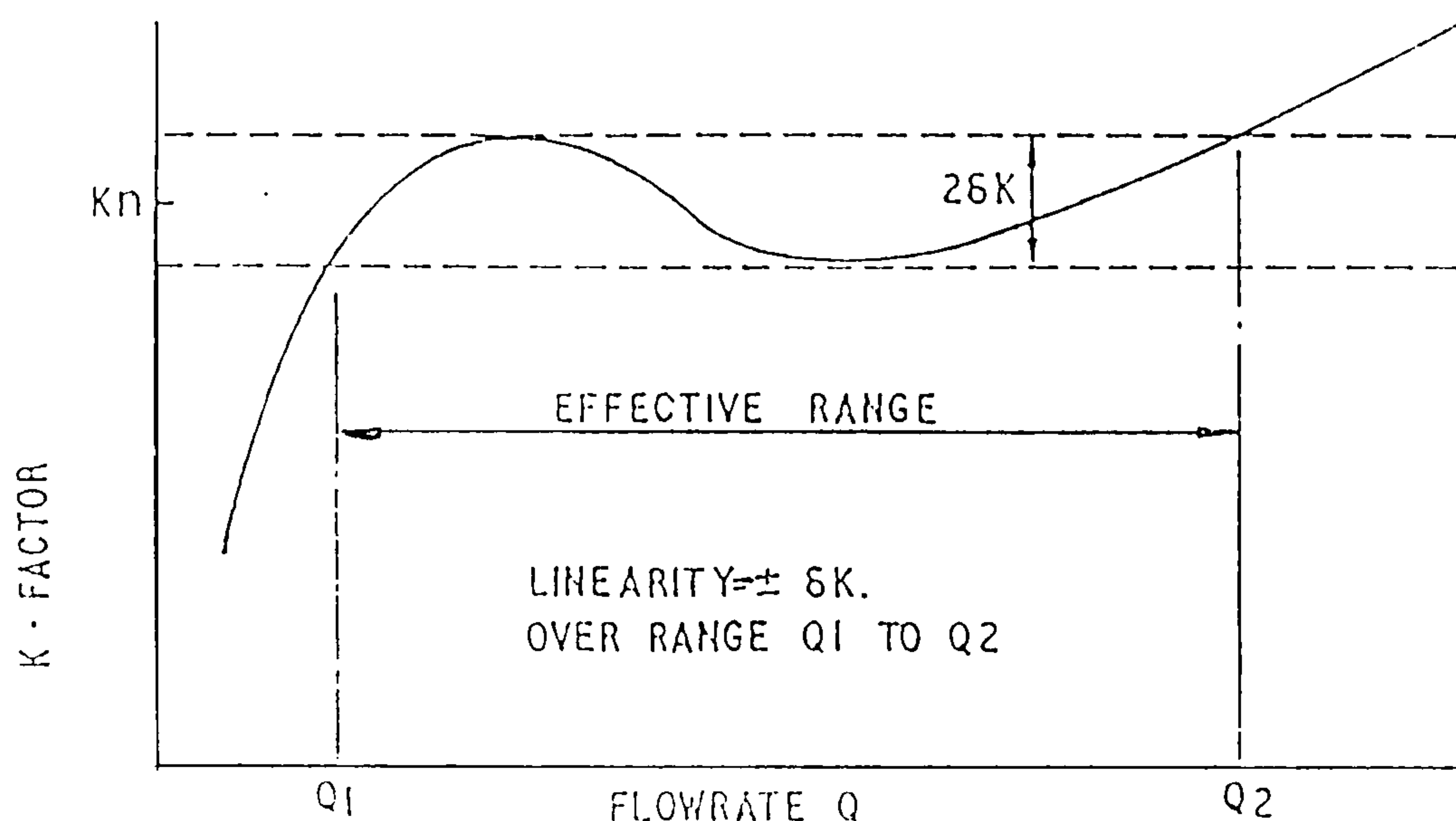
อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลหรือความเร็วของเหลว

เทอร์ไบน์มิเตอร์ส่วนใหญ่ที่ใช้วัดปริมาตรของเหลวสามารถเขียนเป็นกราฟแสดงคุณลักษณะเฉพาะ (characteristic curve) ประจำตัวของมาตรวัดนั้นๆ โดยกราฟจะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแค-แฟคเตอร์ (K-factor) กับอัตราการไหลของเหลว เทอร์ไบน์มิเตอร์ที่มีสมรรถนะดีที่สุดจะมีค่าความเป็นเชิงเส้น (linearity) เท่ากับ $\pm 0.05\%$ หรือบางครั้งมีค่าภายในช่วง $\pm 0.25\%$ ของค่า

normal K-factor (K_n) ตลอดช่วงการวัดได้ (effective range หรือ turndown ratio หรือ rangeability) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 ต่อ 1

เมื่อพิจารณากราฟสมรรถนะของเทอร์ไบน์มิเตอร์ รูป 70 พบว่าที่อัตราการไหลต่ำเทอร์ไบน์มิเตอร์ส่วนใหญ่มีค่าเค-แฟกเตอร์ (K-factor) ตกลงมีค่าต่ำ เนื่องจากความเสียดทานของลูกปืนภายใน เทอร์ไบน์มิเตอร์มีค่ามากเมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วต่ำ อีกทั้งต้องสูญเสียพลังงานให้กับแรงดูด (pick-up drag) ที่กระทำต่อใบพัดเทอร์ไบน์สูงมากเมื่อโรเตอร์เริ่มหมุน ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถใช้เทอร์ไบน์มิเตอร์วัดอัตราการไหลในช่วงต่ำๆ ในขณะที่เดียวกันที่อัตราการไหลสูงๆค่าเค-แฟกเตอร์ (K-factor) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ทั้งนี้เพราะสภาวะแบบการไหลของเหลวมีลักษณะซับซ้อนและยุ่งเหยิงมาก (complex hydrodynamic) ไม่ว่าจะเป็นรูปแบบการไหล (velocity profile) , การถ่ายเทโมเมนตัม (momentum transfer) , ความหนาแน่น , ความหนืด เป็นต้น จะเปลี่ยนแปลงและไม่มีความแน่นอนยากแก่การทำนายค่าการวัดได้หรืออาจจะมีเกิด cavitation ภายในตัวเทอร์ไบน์มิเตอร์

TURBINE METER CHARACTERISTIC CURVE



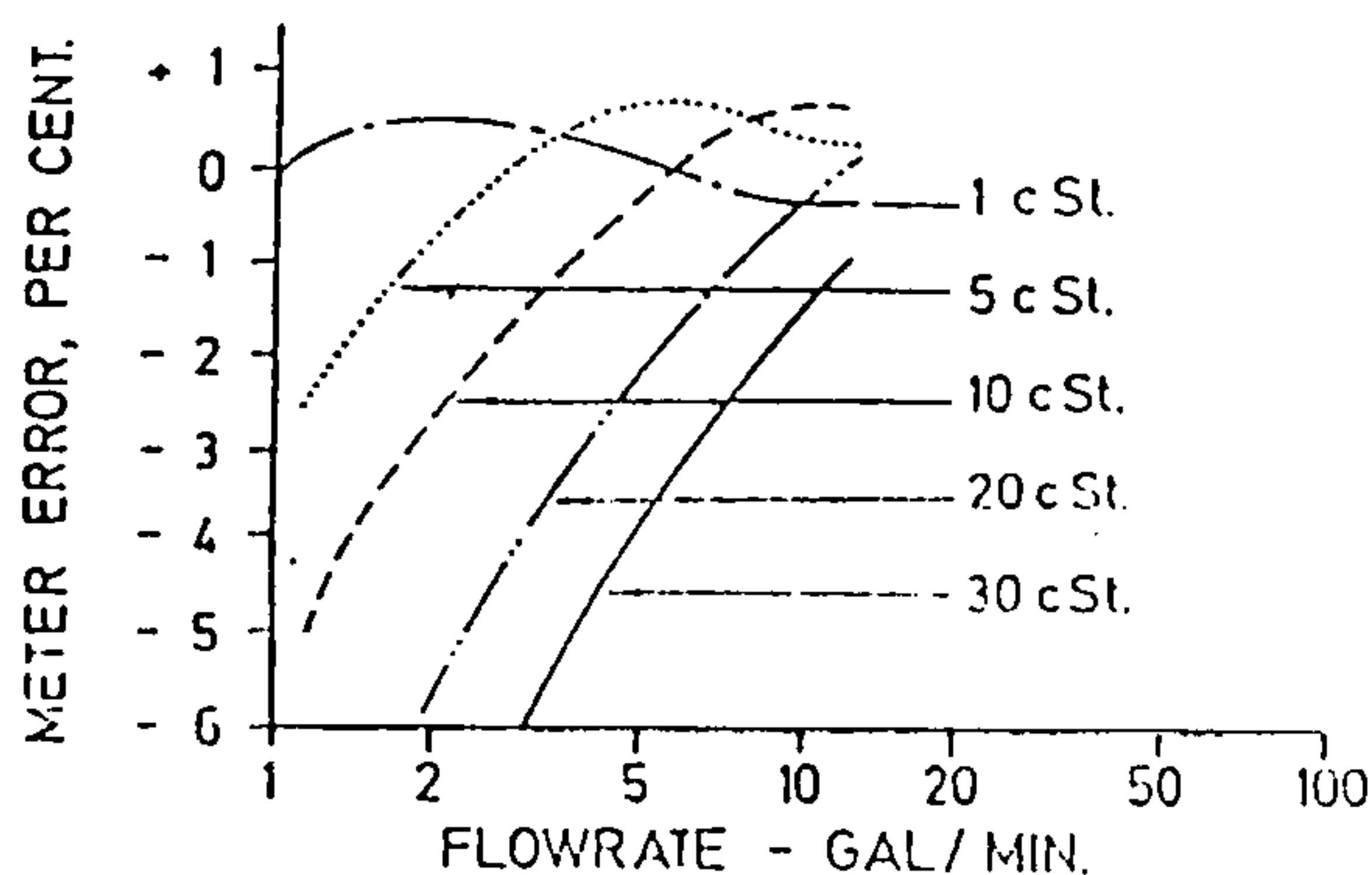
รูป 70 กราฟสมรรถนะเทอร์ไบน์มิเตอร์

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของความหนืด

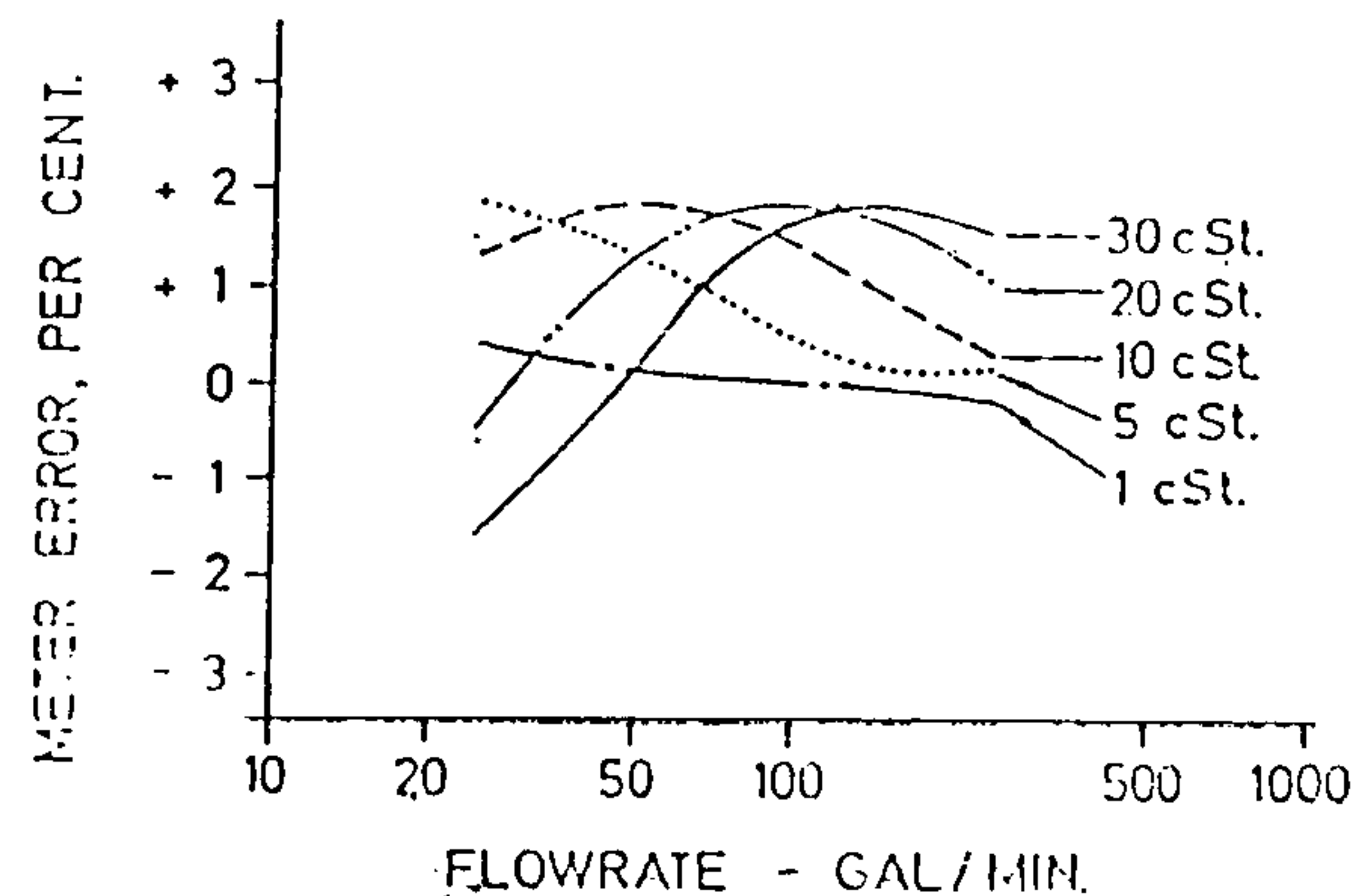
โดยทั่วไปเทอร์ไบน์มิเตอร์จะทำงานได้ดีกับของเหลวซึ่งมีความหนืดต่ำได้ดีกว่ากับของเหลวที่มีความหนืดสูงซึ่งตรงข้ามกับ positive displacement meter ซึ่งจะทำงานได้ดีกับของเหลวซึ่งมีความหนืดสูง แต่ในขณะที่มาตรวัดชนิด vortex-shedding meter จะไม่ค่อยจะได้รับผลกระทบหรือไวต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเหลวแต่อย่างใด

- **ขนาดเทอร์ไบน์มิเตอร์** จากการศึกษาค้นคว้าและทดลองได้มีสิ่งตีพิมพ์เผยแพร่กันออกมา พบว่าความหนืดของเหลวมีผลต่อขนาดของเทอร์ไบน์มิเตอร์ในลักษณะเมื่อขนาดของเทอร์ไบน์มิเตอร์เล็กลง ความหนืดจะมีอิทธิพลมากขึ้นและจะรุนแรงมากขึ้นหากเทอร์ไบน์มิเตอร์มีขนาดเล็กมากๆ ในขณะที่มีผลกระทบน้อยลงเมื่อขนาดเทอร์ไบน์มิเตอร์ใหญ่ขึ้น (ดูรูป 71)

EFFECT OF VISCOSITY (SMALLER TURBINE METERS)



12mm meter

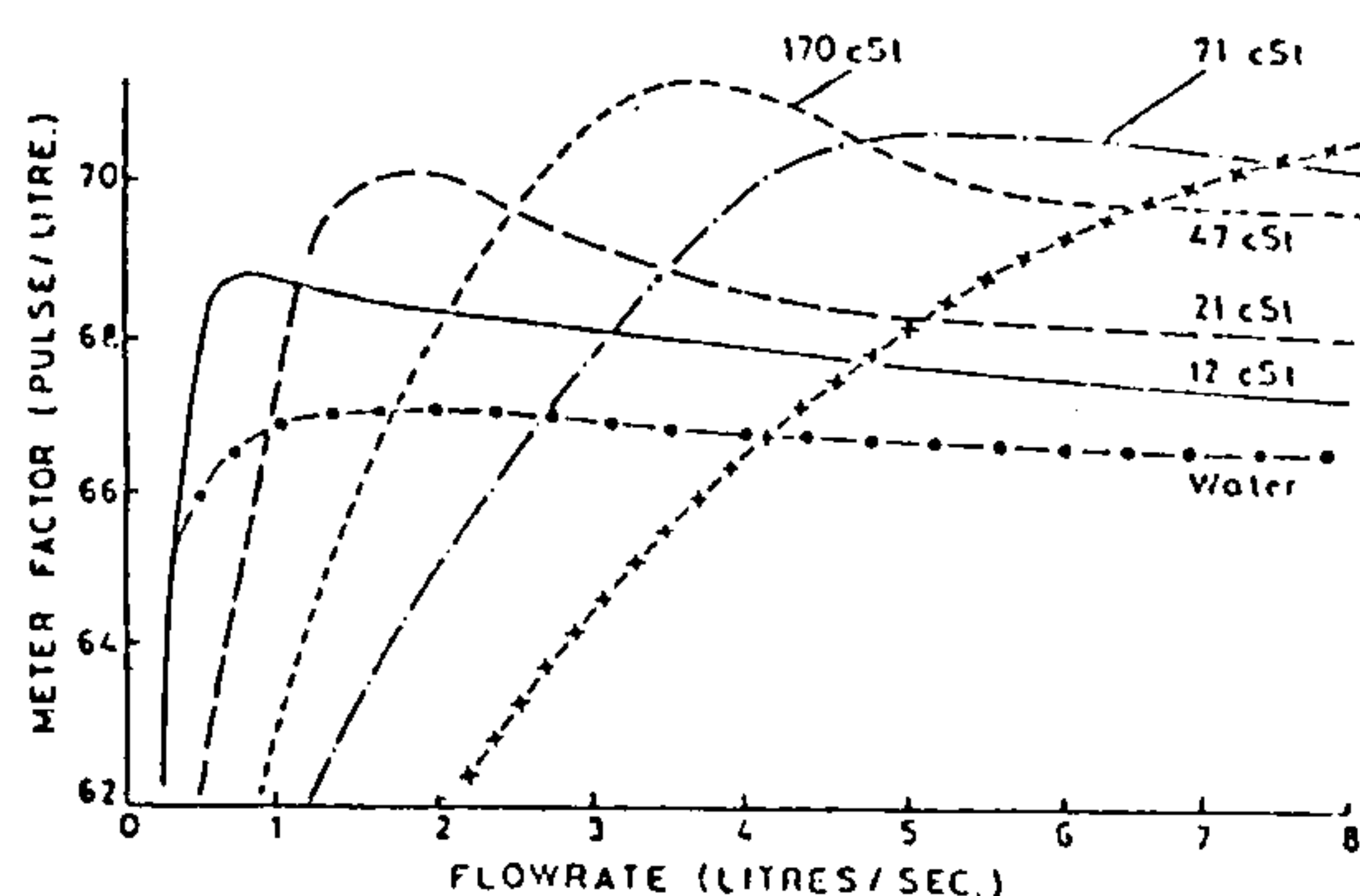


50mm meter

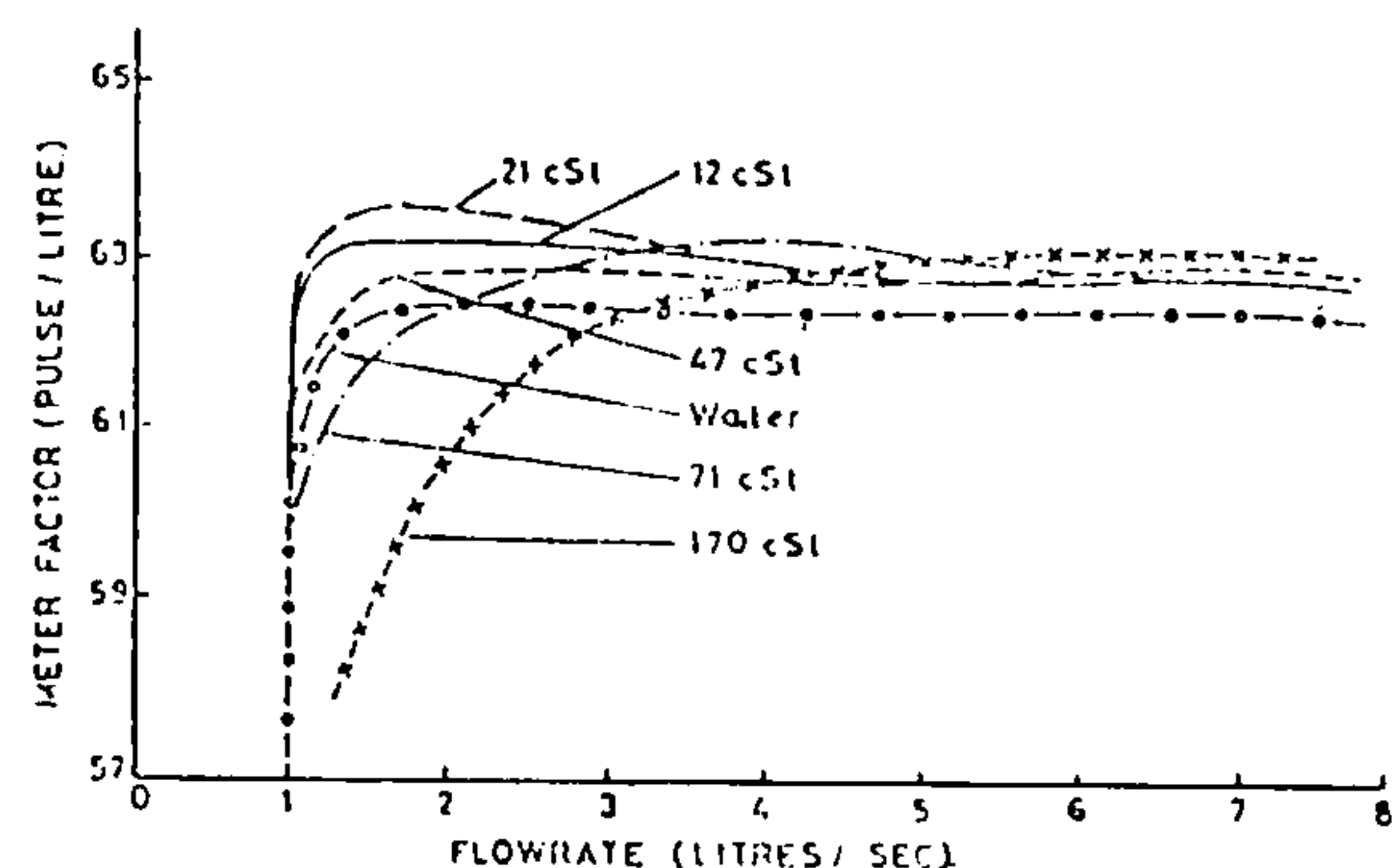
รูป 71 อิทธิพลของความหนืดต่อเทอร์ไบน์มิเตอร์เมื่อขนาดมาตรวัดต่างกัน

- **รูปแบบของใบพัด** เมื่อเทอร์ไบน์มิเตอร์มีขนาดเดียวกันแต่มีรูปแบบของใบพัดต่างกัน ความหนืดก็มีผลต่อมิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) ต่างกันด้วยเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่นเมื่อเทอร์ไบน์มิเตอร์ขนาด 40 มิลลิเมตร ภายในติดตั้งด้วยใบพัดแบบตรง (straight blade) ซึ่งมีใช้กับเทอร์ไบน์มิเตอร์ส่วนใหญ่ จะได้รับผลกระทบต่อค่ามิเตอร์แฟคเตอร์เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนืดรุนแรงมากกว่าเทอร์ไบน์มิเตอร์ภายในติดตั้งด้วยใบพัดแบบโค้งเรียบ (helical blade) (ดูรูป 72)

EFFECT OF VISCOSITY (40mm TURBINE METERS)



constant-angle blades



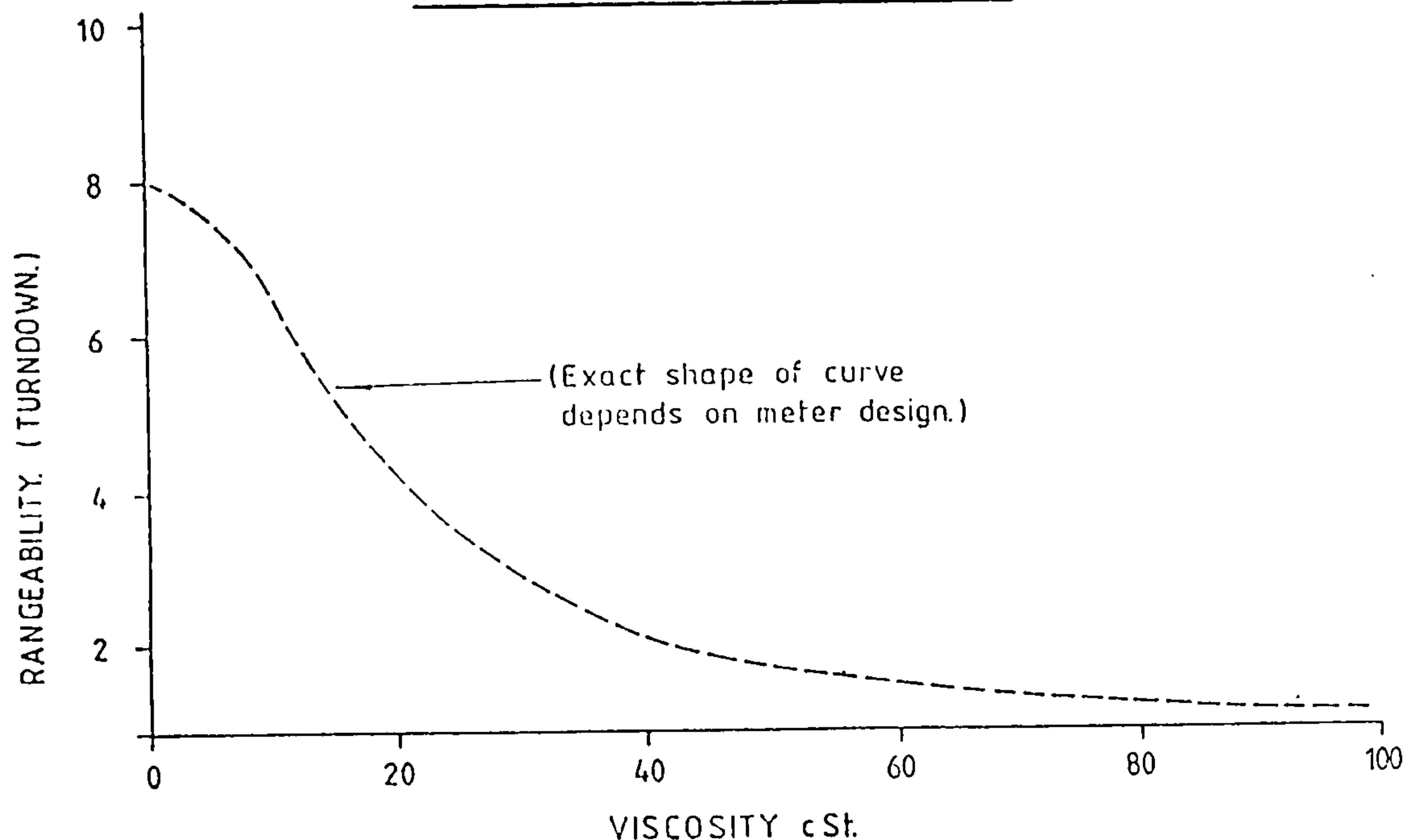
helical blades

รูป 72 อิทธิพลของความหนืดต่อเทอร์ไบน์มิเตอร์เมื่อลักษณะใบพัดเทอร์ไบน์มิเตอร์ต่างกัน

ช่วงการใช้งาน (rangeability) จะเห็นได้ชัดเจนว่าความหนืดมีผลไม่เพียงแต่กับมิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) แต่ยังมีผลต่อช่วงการวัดได้ (effective range) อีกด้วยเมื่อขนาดเทอร์ไบน์มิเตอร์เปลี่ยนแปลงหรือรูปแบบของใบพัดไม่เหมือนกันถึงแม้เทอร์ไบน์มิเตอร์จะมีขนาดเดียวกัน จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อความหนืดเพิ่มขึ้นช่วงการใช้งานจะลดลง หากทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่วงการใช้งานได้กับความหนืดของเหลวจะได้กราฟลักษณะช่วงใช้งานได้ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความหนืดเพิ่มขึ้น แต่ค่าและลักษณะของกราฟที่แน่นอนจริงๆของมาตรวัดแต่ละตัวนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น ขนาดเทอร์ไบน์มิเตอร์และลักษณะรูปแบบของเทอร์ไบน์มิเตอร์ตามทีออกแบบ เพราะฉะนั้นจำเป็นต้องทำการทดสอบเฉพาะรายตัวไป ด้วยเหตุนี้จึงไม่ใช่เทอร์ไบน์มิเตอร์กับของเหลวที่มีความหนืดมากกว่า 50 centistroke เพราะหากของเหลวมีความหนืดมากกว่านี้ช่วง

การใช้งานได้จะมีค่าน้อยมากจนไม่มีประโยชน์หากต้องการผลิตมาตรวัดเพื่อจำหน่ายในทางการค้าแต่อย่างใด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกมาตรวัดชนิดอื่นแทนที่จะใช้เทอร์ไบน์มิเตอร์ ในกรณีที่ของเหลวมีความหนืดสูงมากกว่า 50 centistroke (ดูรูป 73)

HOW VISCOSITY AFFECTS RANGEABILITY (TURBINE METERS)



รูป 73 อิทธิพลของความหนืดต่อช่วงการอ่านค่าได้ของเทอร์ไบน์มิเตอร์

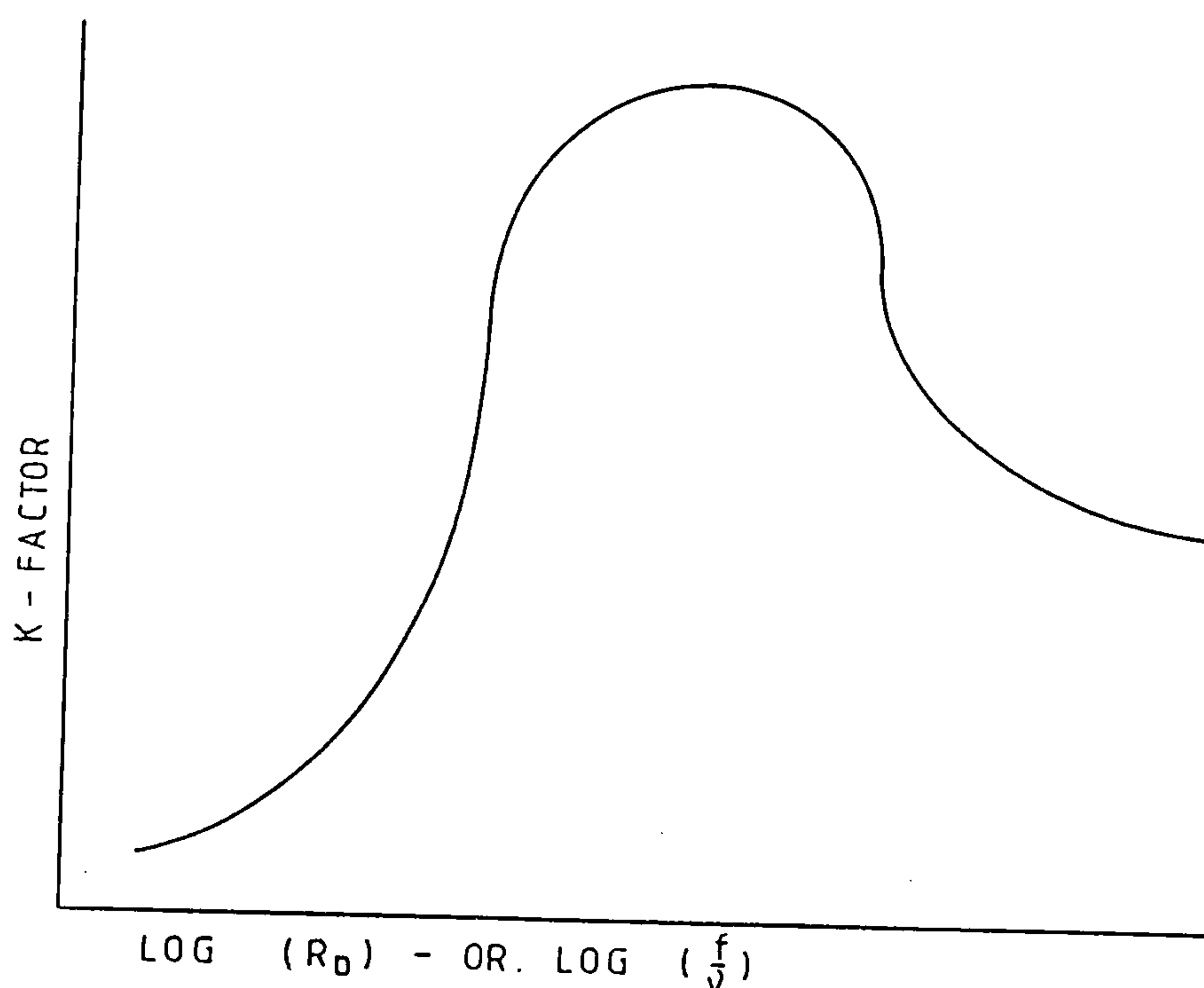
100

ชนิดของเหลว (ความหนืด) ปกติความหนืดของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์นั้น ด้วยเหตุนี้ meter factor ของเทอร์ไบน์มิเตอร์จึงขึ้นอยู่กับความหนืดและอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่เป็นของเหลวชนิดมีความหนาแน่นสูง เช่น น้ำมันดิบ จะมีค่าความหนืดสูงจึงประสบปัญหาการเปลี่ยนแปลงมิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) มากกว่าผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมของเหลวชนิดมีความหนาแน่นต่ำ เช่น แก๊สโซลีน (เบนซิน) โดยผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่มีความหนาแน่นสูงจะเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดค่อนข้างรวดเร็วภายในช่วงอุณหภูมิแคบๆ ในขณะที่ค่าความหนืดของปิโตรเลียมที่มีความหนาแน่นต่ำจะยังคงมีค่าใกล้เคียงกันไม่เปลี่ยนแปลงค่ารวดเร็วมากเกินไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง

โดยปกติแล้วขนาดมาตรวัดที่ใช้ในการวัดปริมาณน้ำมันดิบทั่วไป พบว่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดน้ำมันดิบนั้นไม่มีผลมากพอที่จะทำให้มาตรวัดให้ผลการวัดปริมาณผิดพลาดมาก

นัก トラบเท่าที่ความหนืดยังคงมีค่าไม่เกิน 30 centistroke แต่อย่างไรก็ตามหากความหนืดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นบ้างลดลงบ้างอยู่เรื่อยๆมิเตอร์แฟกเตอร์ (meter factor) ก็อาจจะเปลี่ยนแปลงได้เช่นกัน ดังนั้นหากใช้เทอร์ไบน์มิเตอร์วัดน้ำมันดิบจำเป็นต้องสอบเทียบมาตรวัดเป็นระยะๆเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ เนื่องจากน้ำมันดิบที่มีการซื้อขายกันมีค่า API ที่แตกต่างกันตามแหล่งผลิตของน้ำมันดิบ

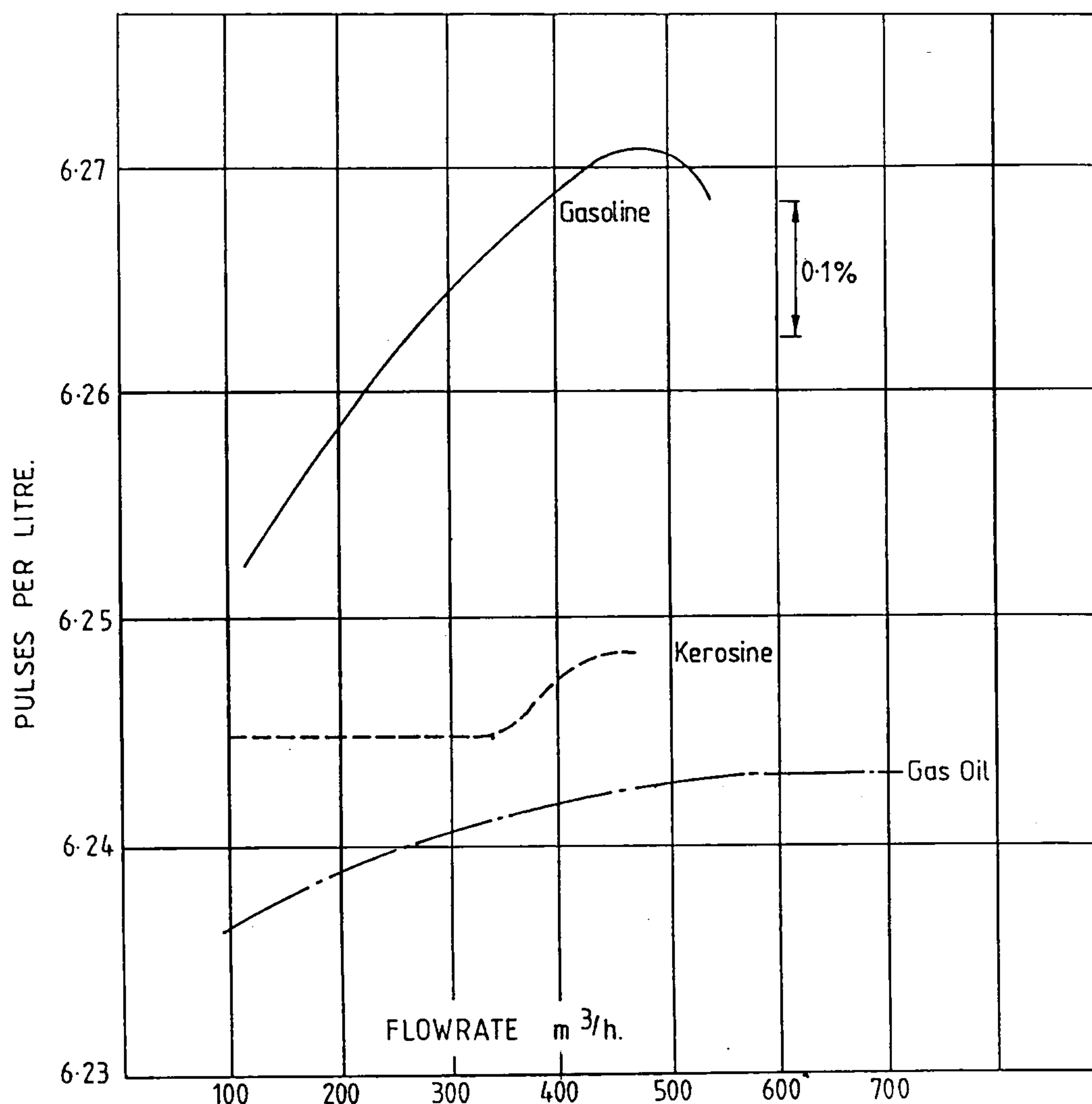
บางครั้งความพยายามทำนายสมรรถนะของเทอร์ไบน์มิเตอร์ขนาดหนึ่งกับของเหลวที่รู้ค่าความหนืดแน่นอนค่าหนึ่งโดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบมาตรวัดซึ่งมีลักษณะคล้ายกันแต่ขนาดต่างกันกับของเหลวซึ่งมีความหนืดอีกค่าหนึ่ง การหาความสัมพันธ์มาตรวัดที่มีขนาดต่างกันและใช้กับของเหลวมีความหนืดต่างกันเพียงแต่รูปแบบชนิดของมาตรวัดคล้ายกัน สามารถทำได้โดยใช้เส้นโค้งความหนืดทั่วไป (universal viscosity curve) { ดังแสดงในรูปเป็นเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์ (K-factor) กับค่าลอการิทึมของอัตราส่วนระหว่างความถี่พลัสต่อความหนืดไคเนเมติก } เส้นโค้งความหนืดทั่วไปนี้เป็นเพียงการแสดงลักษณะสมรรถนะการทำงานของเทอร์ไบน์มิเตอร์อย่างหยาบๆ หากต้องการความแม่นยำสูงขึ้นในการวัดของเทอร์ไบน์มิเตอร์ต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเพราะอาจมีข้อบกพร่องในการทำงานในบางกรณี (ดูรูป 74)



THE SO - CALLED "UNIVERSAL" VISCOSITY CURVE.

รูป 74 Universal Viscosity Curve

สรุปได้ว่า ลักษณะกราฟและความเป็นไปทั้งหมดของปรากฏการณ์หรือผลการทดสอบหนึ่งๆในการหาสมรรถนะการทำงานของเทอร์ไบน์มิเตอร์ โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดว่ามีผลกระทบอย่างไรในที่นี้นั้นเป็นเพียงข้อมูลบางส่วนเท่านั้นยังไม่สามารถกล่าวได้ว่าเทอร์ไบน์มิเตอร์ทุกชนิดและทุกขนาดจะมีลักษณะเป็นไปตามดังข้อมูลที่อ้างมาทั้งหมด ด้วยเหตุนี้หากต้องการได้ข้อมูลที่ถูกต้องแม่นยำอย่างแท้จริงคงต้องทำการทดสอบมาตรวัดเฉพาะรายตัวและทำการสอบเทียบมาตรวัดบ่อยๆจะเป็นวิธีการที่ดีที่สุด มีตัวอย่างปรากฏการณ์ที่ไม่น่าจะเป็นไปได้แต่ในทางปฏิบัติก็เกิดขึ้นคือ เมื่อทำการสอบเทียบมาตรวัดด้วยของเหลว 3 ชนิดคือ น้ำมันเบนซิน (gasoline) , น้ำมันก๊าด (kerosine) ,และ น้ำมันดีเซล (gas oil) ความหนืดของน้ำมันเบนซินกับน้ำมันก๊าดจะมีค่าใกล้เคียงกันและจะแตกต่างกับน้ำมันดีเซล แต่ผลการสอบเทียบหาค่าเค-แฟกเตอร์ (K-factor) ปรากฏว่าค่าเค-แฟกเตอร์ (K-factor)ระหว่างน้ำมันเบนซินกับน้ำมันก๊าดจะมีค่าแตกต่างกันมากแต่ในขณะเดียวกันน้ำมันก๊าดกับน้ำมันดีเซลจะได้ค่าเค-แฟกเตอร์ (K-factor) ใกล้เคียงกันมากกว่า (ดูรูป 75)



รูป 75

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

เนื่องจากอุณหภูมิและความหนืดมีความสัมพันธ์กันอยู่ ดังนั้นหากอุณหภูมิของเหลวเปลี่ยนไป ความหนืดก็ย่อมเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของเทอร์ไบน์มอเตอร์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะและเป็นไปตามข้อมูลที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ **อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของความหนืด** นอกจากนี้การที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงก็เป็นสาเหตุทำให้ขนาดและระยะห่างของชิ้นส่วนต่างๆภายในตัวมาตรวัดเปลี่ยนแปลงอีกด้วย ปริมาตรที่วัดได้โดยมาตรวัดจะได้รับผลกระทบจากการขยายและหดตัวของเหลว (Thermal expansion or contraction of the liquid) ซึ่งจำเป็นต้องทำการแก้ไขค่าปริมาตรดังกล่าวเสียก่อนจึงจะได้ค่าปริมาตรที่วัดได้จริง ดังนั้นหากต้องการให้มาตรวัดทำการวัดปริมาตรได้อย่างแม่นยำสูงสุดจำเป็นต้องทำการสอบเทียบใหม่ทุกครั้งเมื่ออุณหภูมิใช้งานมาตรวัดต่างไปจากอุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบในครั้งก่อนเกินกว่า 5°C ไมเช่นนั้นแล้วจะเกิดความผิดพลาดของการวัดมีค่าโดยประมาณอยู่ในช่วง 0.1% หรืออาจจะมากกว่านี้ก็เป็นได้ ในการสอบเทียบใหม่ทุกครั้งควรดำเนินการสอบเทียบที่อุณหภูมิอยู่ในช่วงของสภาวะการทำงานจริง (the range of normal operating conditions) ของมาตรวัด

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น

เมื่อทำการวัดอัตราการไหลของเหลว หากของเหลวดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น จะส่งผลให้มิเตอร์แฟคเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันเป็นอย่างมากในช่วงอัตราการไหลต่ำลง (lower flow ranges) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรีบดำเนินการสอบเทียบใหม่หากต้องการผลการวัดให้ผลแม่นยำ

ในกรณีของเหลวมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ (relative density) หรือความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.7 หรือน้อยกว่า ต้องให้ความสนใจในการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลต่ำสุดของมาตรวัดให้มากขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มิเตอร์แฟคเตอร์ของมาตรวัดยังคงมีลักษณะความเป็นเชิงเส้นตรง (linearity) อยู่ ดังนั้นจำเป็นต้องทำการสอบเทียบที่อัตราการไหลที่แตกต่างกันหลายๆครั้งเพื่อให้รู้ค่าอัตราการไหลต่ำสุดโดยที่มาตรวัดยังคงมีมิเตอร์แฟคเตอร์ซึ่งมีลักษณะความเป็นเชิงเส้นตรง (linearity) และมีค่าความสามารถทำซ้ำ (repeatability) ที่ยอมรับได้

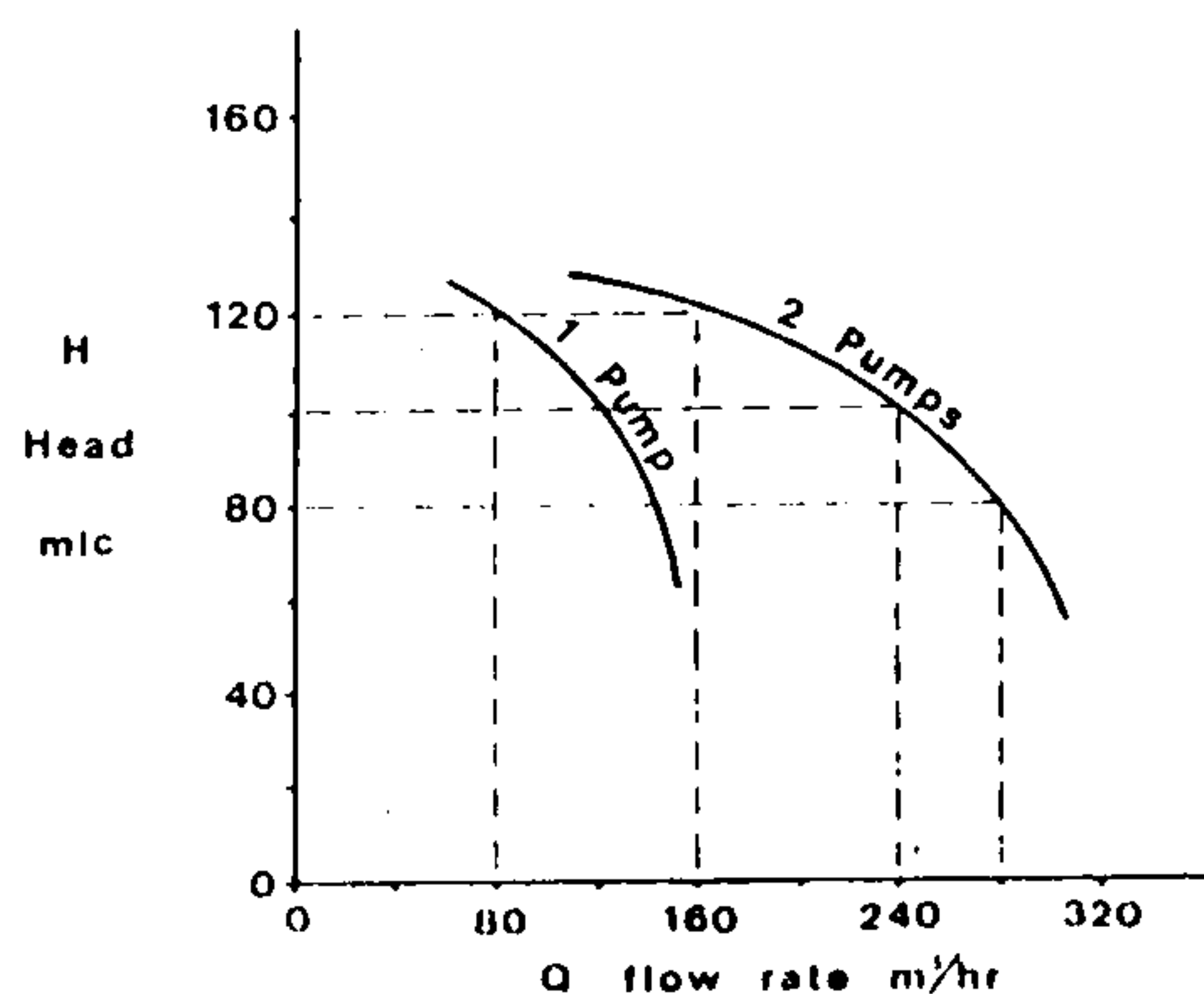
อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของความดัน

เมื่อความดันของเหลวภายในระบบท่อเปลี่ยนแปลงไปจากความดันขณะทำการสอบเทียบ ปริมาตรของเหลวจะมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน โดยอาจจะหดตัวหรือขยายตัวอย่างใดอย่างหนึ่ง นอกจากนี้อาจทำให้ขนาดของมาตรวัดเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน แต่โดยปกติแล้วเทอร์ไบน์มอเตอร์สามารถใช้งานที่ความดันสูงมากๆโดยประมาณ 15,000 psig. ทั้งนี้อาจจะมีค่ามากกว่านี้หรือน้อย

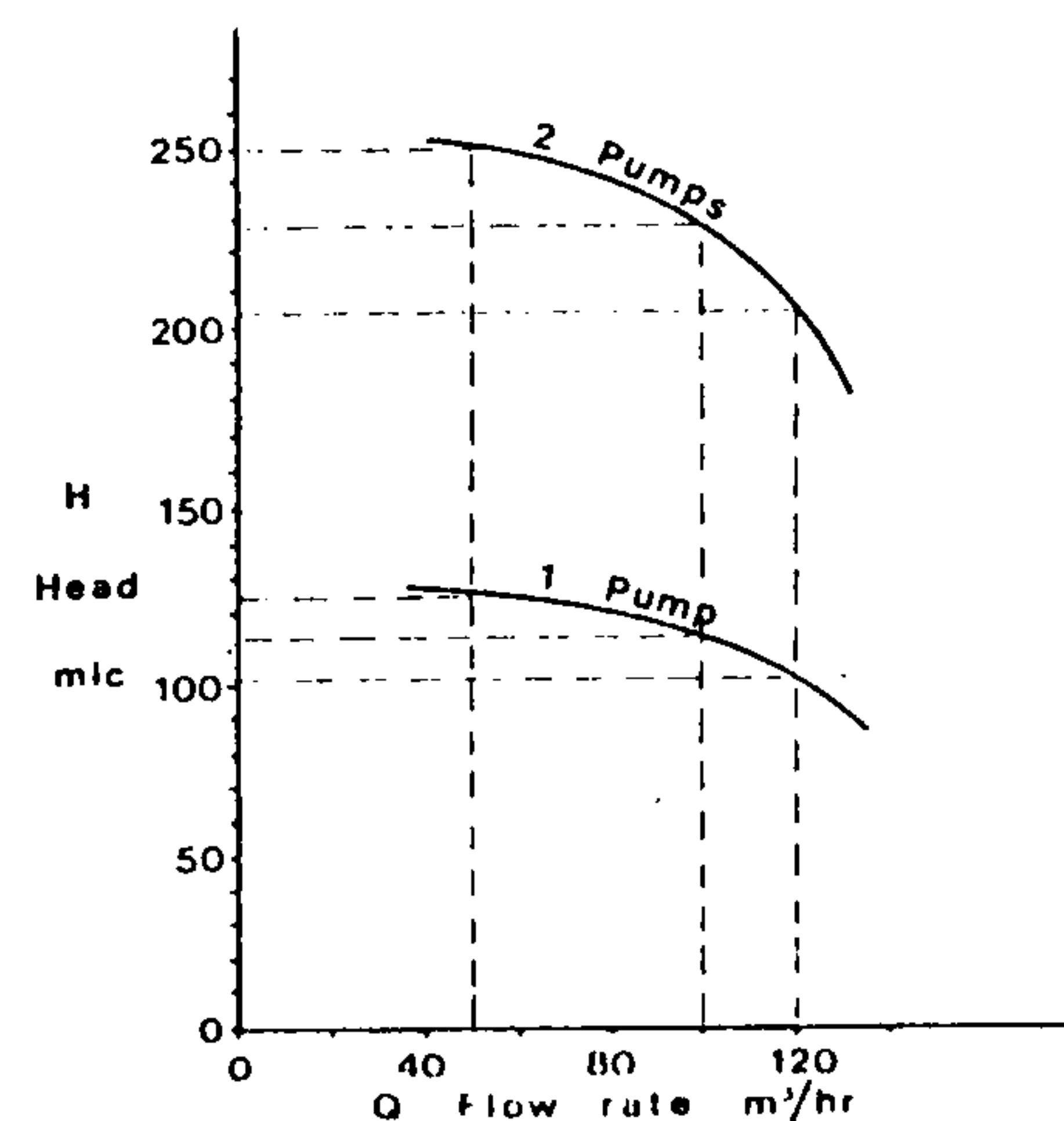
กว่านี้ก็ได้ขึ้นอยู่กับขนาด ,ชนิด และการออกแบบของเทอร์ไบน์มอเตอร์ ดังนั้นหากความดันขณะที่มาตรวัดทำงานจริงแตกต่างไปจากความดันขณะทำการสอบเทียบมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การวัดปริมาตรมีค่าผิดพลาด โดยที่ความผิดพลาดการวัดดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนต่อกันกับความแตกต่างของความดันดังกล่าว

ที่สำคัญ ความดันย้อนกลับด้านหลังเทอร์ไบน์มอเตอร์ต้องมีค่ามากพอเกินกว่าค่าต่ำสุดที่บริษัทผู้ผลิตมาตรวัดกำหนดไว้ไม่เช่นนั้นก็จะก่อให้เกิด cavitation ภายในมาตรวัดได้ ส่งผลให้เค-แฟคเตอร์ (K-factor)มีค่าเพิ่มขึ้นทันทีทันใดที่อัตราการไหลสูงๆ

จากการศึกษาอิทธิพลของความดันภายในท่อ โดยการเพิ่มความดันภายในท่อด้วยการต่อปั๊มให้เป็นระบบขนาน (parallel) เพิ่มขึ้นทีละตัวจนครบ 3 ตัวเพื่อศึกษาค่าเค-แฟคเตอร์(K-factor) จะเห็นผลได้ชัดเจนจากกราฟว่าเมื่อความดันภายในท่อสูงมากขึ้นก็จะทำให้อัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้น แต่พบว่าช่วงการวัดได้ (effective range) ของมาตรวัดมีค่าโดยประมาณเพียงครึ่งหนึ่งเมื่อใช้ปั๊มเพียงตัวเดียวเมื่อเทียบกับช่วงการวัดได้เมื่อใช้ปั๊ม 3 ตัวในการสร้างแรงดันและอัตราการไหลให้สูงขึ้น แต่ไม่ว่าจะใช้ปั๊ม 1, 2, หรือ 3 ตัวปรากฏว่าจะมีการเกิด cavitation ที่อัตราการไหลสูงๆ สังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าเค-แฟคเตอร์ (K-factor) อย่างทันทีทันใดในกราฟ (ดูรูป 76 , 77)



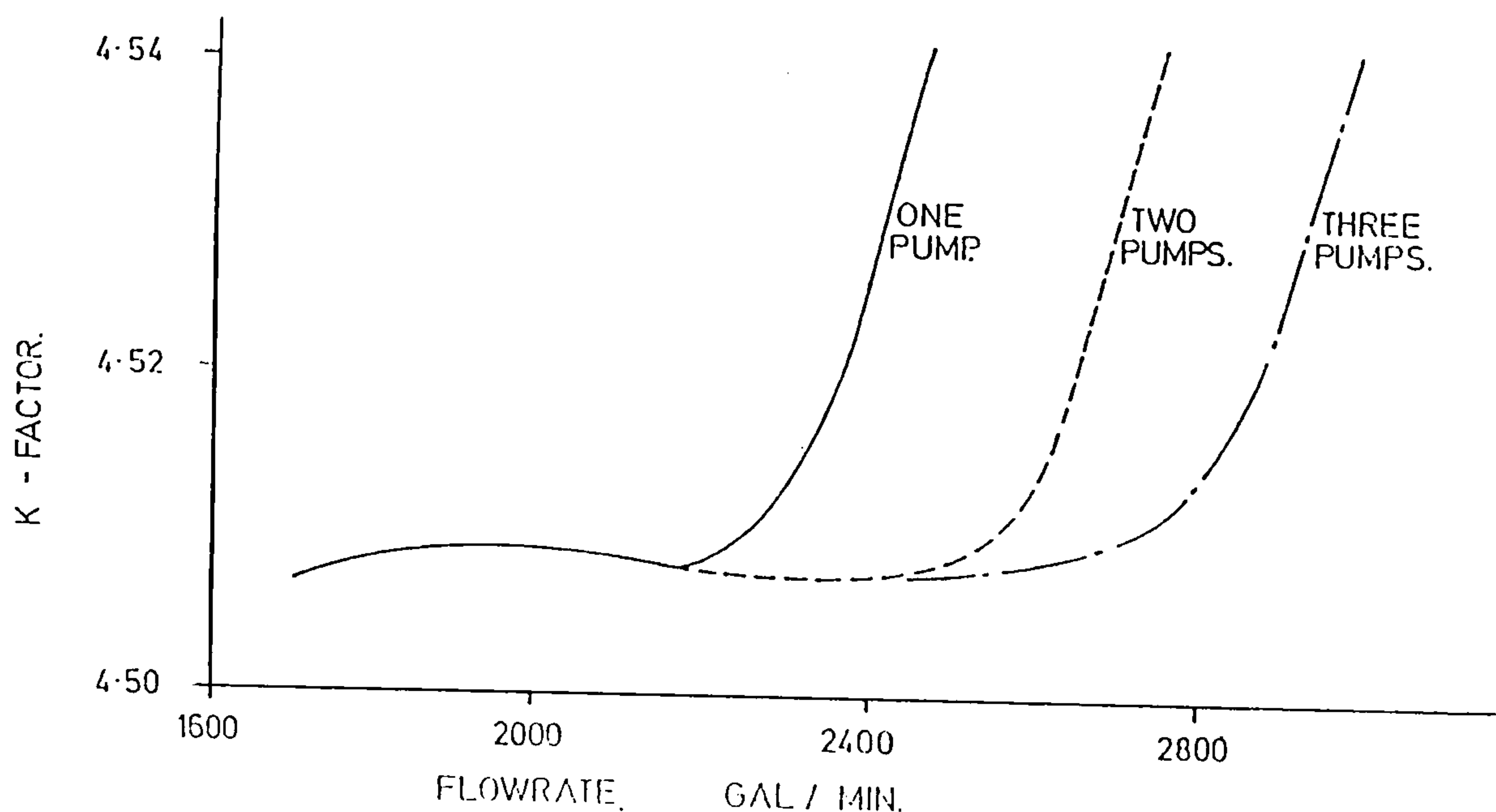
Running centrifugal pumps in parallel
combined pump characteristics



Running centrifugal pumps in series
combined pump characteristics

รูป 76 ตารางแสดงผลของความดันเมื่อทำการต่อปั๊ม 2 ตัว ด้วยลักษณะที่แตกต่างกัน

EFFECT OF CAVITATION ON THE PERFORMANCE OF A TURBINE METER



รูป 77 อิทธิพลของ Cavitation ต่อสมรรถนะของเทอร์ไบน์มิเตอร์

นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงความดันภายในท่อก็มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเหลวที่ทำการวัดอยู่เช่นกัน แต่จะมีผลมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของเหลวและค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงไป

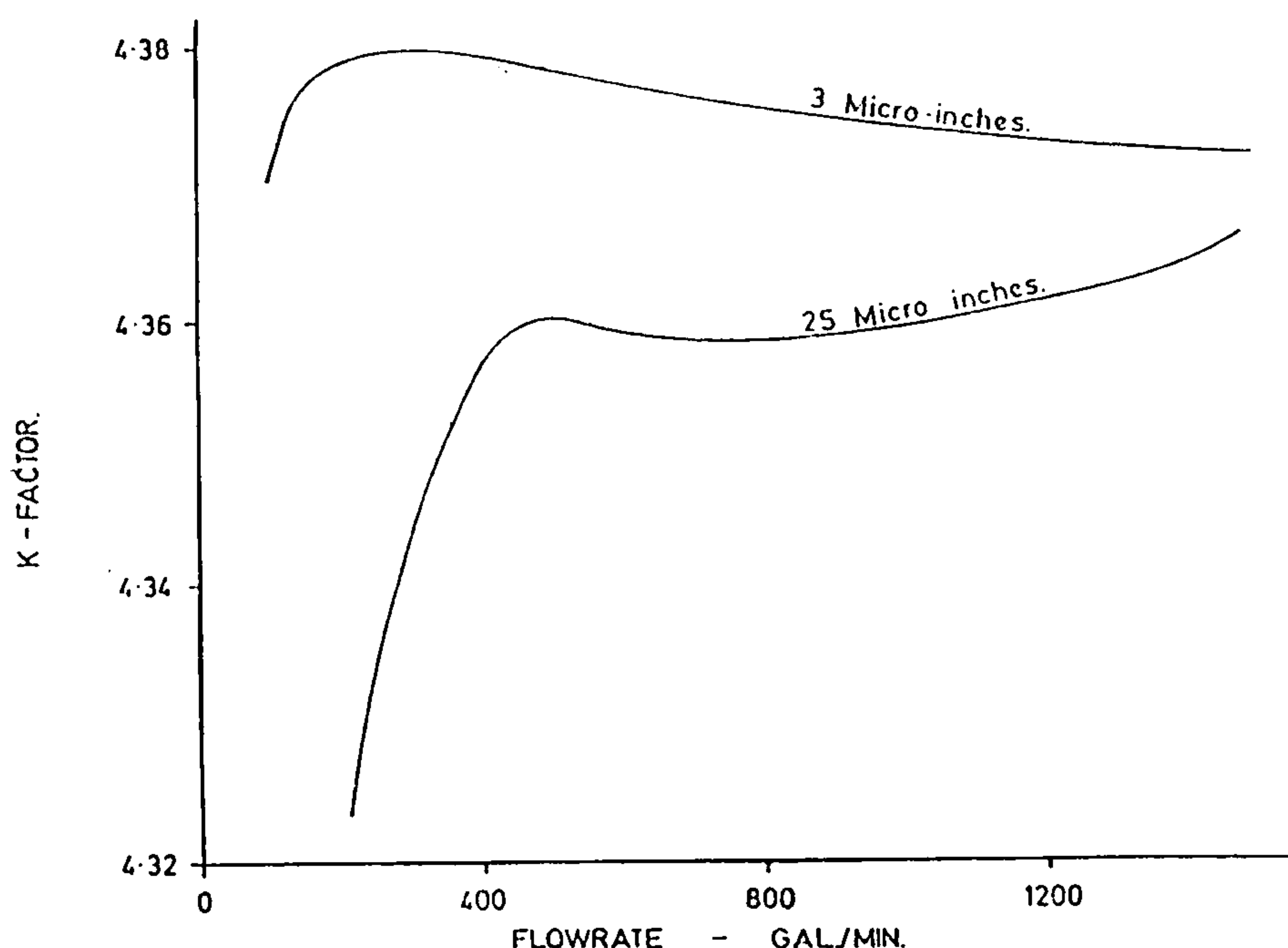
อิทธิพลของการสึกหรอและความเสียหายของมาตรวัด

การสึกหรอหรือความเสียหายอันเกิดขึ้นกับมาตรวัดจะมีผลต่อสมรรถนะในการทำงานของมาตรวัดนั้นคือค่าเค-แฟคเตอร์ (K-factor) ของมาตรวัดจะเปลี่ยนแปลง ส่วนใหญ่ได้แก่

- **ลูกปืน (Bearing)** เทอร์ไบน์มิเตอร์ที่ใช้วัดการไหลของเหลวซึ่งมีคุณสมบัติของการหล่อลื่นต่ำๆ หรือไม่สะอาดเพียงพอซึ่งอาจมีสิ่งแปลกปลอมหลุดเข้าลูกปืนได้ เหตุการณ์เหล่านี้จะทำให้อายุการใช้งานของลูกปืนสั้นลง จากรูปกราฟแสดงให้เห็นการเปรียบเทียบเทอร์ไบน์มิเตอร์ซึ่งมีขนาดและชนิดเดียวกันแต่มีความราบเรียบของผิวลูกปืนแตกต่างกันระหว่าง 3 ไมครอนกับ 25

ไมโครนิ้ว ผลการสอบเทียบมาตรวัดซึ่งมีความหยาบของผิวต่างกันพบว่าตลอดช่วงอัตราการไหลลูกปืนผิวหยาบกว่า (25 ไมโครนิ้ว) ไม่เพียงแต่ทำให้เค-แฟกเตอร์ (K-factor) มีค่าลดลงไปประมาณ 0.5 % แต่ยังทำให้ช่วงการวัดได้ (effective range) ของมาตรวัดลดลงอีกด้วยเช่นกัน อีกทั้งค่าเค-แฟกเตอร์ (K-factor) ที่ได้ก็มีลักษณะความเป็นเชิงเส้น (linearity) ไม่ดีพอ จึงสรุปได้ว่าควรทำการเปลี่ยนลูกปืนเสียก่อนที่ลูกปืนของเทอร์ไบน์มิเตอร์มีผิวหยาบถึงค่าหรือเกินกว่าค่าที่ออกแบบไว้ (ดูรูป 78)

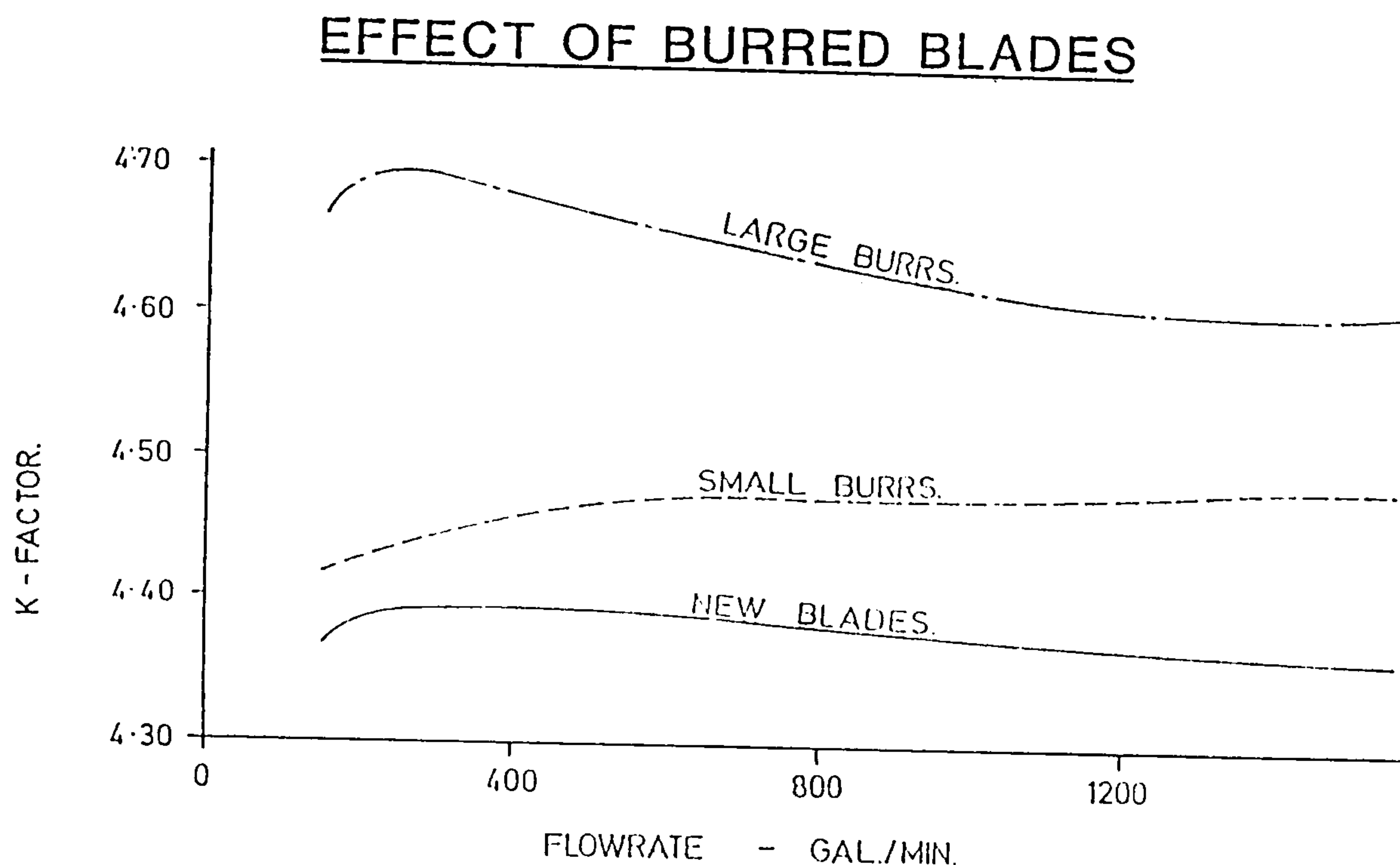
EFFECT OF BEARING SURFACE FINISH



รูป 78 อิทธิพลของความเรียบผิวน้ำลูกปืน

- **ใบพัดเทอร์ไบน์ที่หยาบหรือมีบิ่น** จากกราฟเป็นการทดสอบเทอร์ไบน์มิเตอร์เมื่อมีขนาดและเป็นชนิดเดียวกันอีกทั้งสภาวะการทำงานก็เหมือนกันเพียงแต่ทำการเปลี่ยนใบพัดให้บริเวณขอบใบพัด (the edge of the blades) มีความราบเรียบต่างกัน 3 ระดับด้วยกันคือ ใบพัดใหม่เอี่ยม (new blades), ใบพัดมีรอยขีดขูดเล็กน้อย (small burrs) และใบพัดมีรอยบิ่นที่มาก (large burrs) ผลการทดสอบได้ตั้งกราฟสรุปได้ว่าใบพัดมีรอยขีดขูดเล็กน้อยมีผลทำให้เค-แฟกเตอร์ (K-factor) เปลี่ยนแปลง

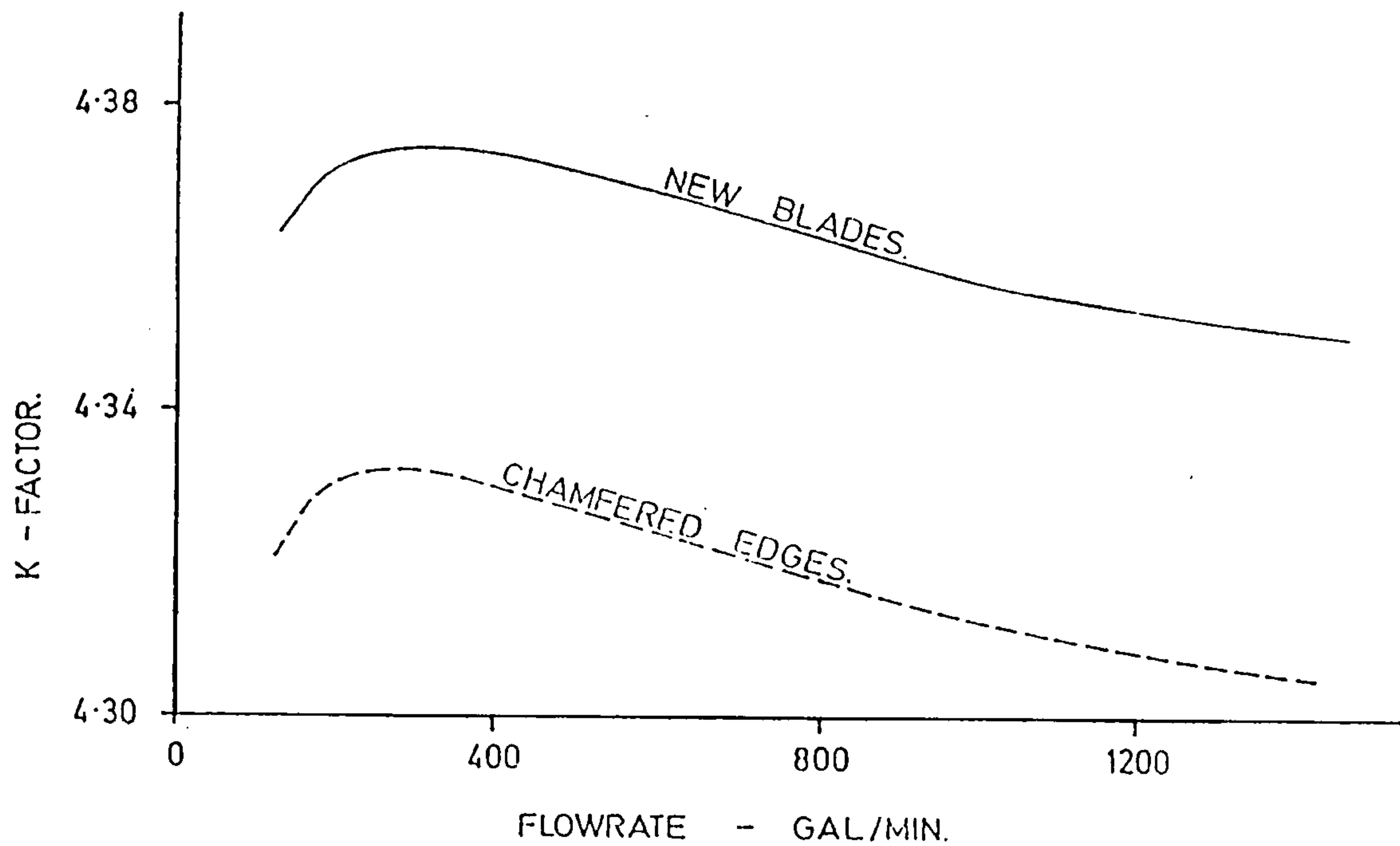
ไปประมาณ 2 % อีกทั้งลักษณะความเป็นเชิงเส้น (linearity) ลดลงในขณะที่ใบพัดที่มีรอยบิ่นที่มากจะทำให้ค่าเค-แฟคเตอร์(K-factor) เปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงไม่สามารถให้ผลการวัดมีค่าน่าเชื่อถือได้แต่อย่างใด (ดูรูป 79)



รูป 79 อิทธิพลของความทื่อของใบพัดเทอร์ไบน์

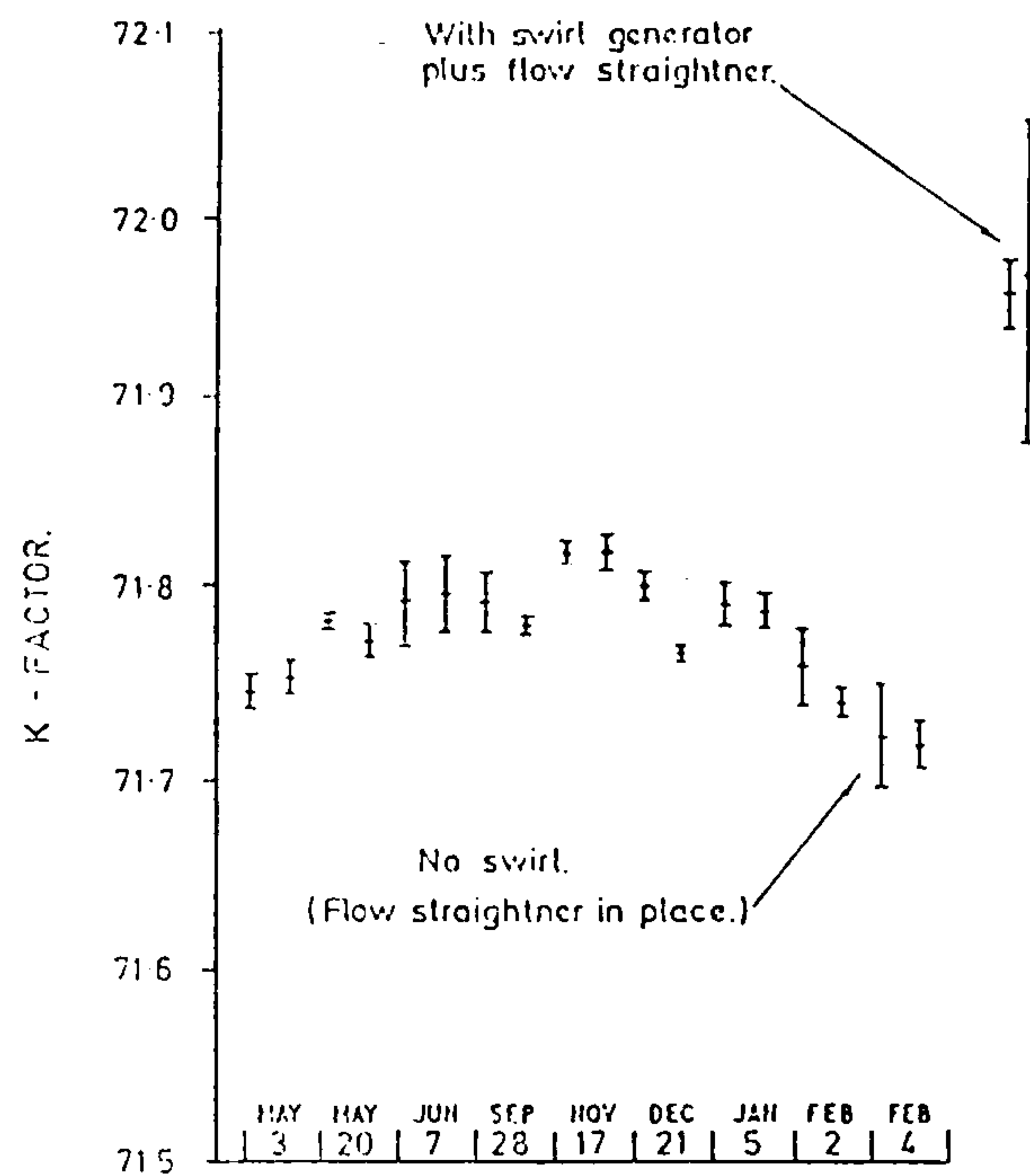
การที่พบว่าใบพัดเทอร์ไบน์มีเตอร์ที่เมื่อใช้งานไปช่วงระยะเวลาหนึ่งถึงแม้จะเอาใจใส่ดูแลเป็นอย่างดีก็ตาม ทั้งนี้ก็เพราะว่าของเหลวที่ไหลผ่านเทอร์ไบน์มีเตอร์อาจจะมีสิ่งแปลกปลอมหลุดเข้าไปในเทอร์ไบน์มีเตอร์โดยเฉพาะสิ่งแปลกปลอมที่ก่อให้เกิดการขูดขีดสึกหรอแก่ใบพัดได้ง่ายยิ่งอันตรายต่อเทอร์ไบน์มีเตอร์ จากการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างใบพัดใหม่ (new blades) กับทำให้ใบพัดใหม่ทื่อ (chamfed blades) ผลการทดสอบเป็นดังรูปคือค่าเค-แฟคเตอร์ (K-factor) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป (ดูรูป 80)

EFFECT OF BLADE-EDGE SHARPNESS



รูป 80 อิทธิพลของความเก่าใหม่ของใบพัดเทอร์ไบน์

EFFECT OF SWIRL



รูป 81 อิทธิพลของการไหลหมุนวน (swirl)

ในกรณีที่ได้ออคมাত্রวัดออกไปทำการซ่อม เมื่อประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้วต้องทำการสอบเทียบเสียก่อนที่จะนำไปใช้วัดปริมาตรใหม่ทุกครั้งเสมอ ถึงแม้ในบางครั้งไม่ได้ถอดชิ้นส่วนมาตรวัดแต่อย่างใด แต่ถ้าหากทำการถอดมาตรวัดจากที่หนึ่งเพื่อนำไปติดตั้งอีกที่หนึ่งก็ต้องทำการสอบเทียบเสียก่อนทุกครั้งก่อนที่จะนำไปใช้วัดปริมาตร

อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงของสภาวะการไหล (flow conditions)

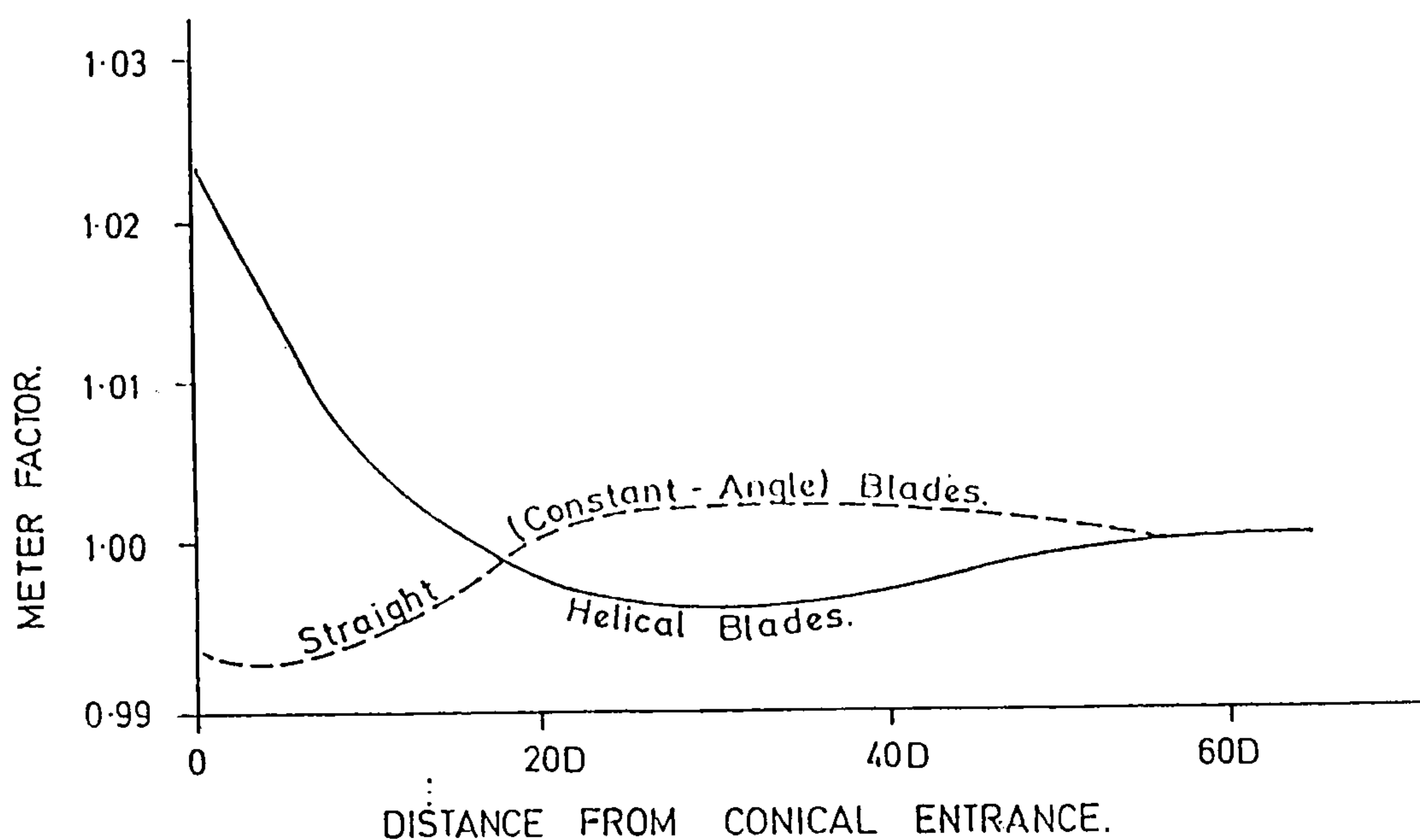
สภาวะการไหลของเหลวที่ให้ผลการวัดของมาตรวัดมีความแม่นยำสูง ควรเป็นการไหลลักษณะอยู่ตัว (steady state) และไม่มีการไหลหมุนวน (swirl) และรูปแบบการไหล (velocity profile) ต้องไม่เปลี่ยนแปลง

- **อุปกรณ์ปรับการไหล (straightener)** จากการศึกษาอิทธิพลของการติดตั้งอุปกรณ์ปรับการไหล (straightener) ด้วยการทดสอบมาตรวัดหาค่าเค-แฟกเตอร์(K-factor) ของเทอร์ไบน์มิเตอร์ตลอดช่วงเวลา 9 เดือนโดยระบบการวัดได้ติดตั้งอุปกรณ์ปรับการไหล (straightener) ก่อนทางเข้ามาตรวัดที่ระยะเหมาะสมระยะหนึ่ง ผลการทดสอบหาค่าเค-แฟกเตอร์(K-factor) แต่ละครั้งของแต่ละเดือนได้ผลเป็นเส้นตรงเส้นหนึ่ง โดยความยาวเส้นตรงของแต่ละเดือนจะมีค่าไม่เท่ากันนั้นหมายถึงช่วงการวัดได้ของมาตรวัดที่มีลักษณะความเป็นเชิงเส้น (linearity) มีค่าต่างกันแต่ละเดือน ส่วนจุดตรงกลางของเส้นตรงหมายถึงค่าเฉลี่ยของกลุ่มทดสอบมาตรวัดซึ่งติดตั้งอยู่หลังจากอุปกรณ์ปรับการไหล (straightener) ทำให้สภาวะการไหลค่อนข้างดีมาก ผลของการหาค่าเค-แฟกเตอร์(K-factor) จึงได้ผลเกาะกลุ่มกันในแต่ละเดือน แต่เมื่อทำการจำลองการไหลหมุนวน (swirl) ให้เกิดขึ้นก่อนทางเข้าอุปกรณ์ปรับการไหล (straightener) ผลปรากฏว่าการไหลหมุนวน (swirl) ไม่เพียงแต่เปลี่ยนค่าเค-แฟกเตอร์ (K-factor) ไปประมาณ 0.25 % แต่ยังให้ผลการทดสอบค่าเค-แฟกเตอร์(K-factor) แตกต่างออกไปจากกลุ่มของค่าเค-แฟกเตอร์ (K-factor) ซึ่งรวบรวมผลการทดสอบไว้เป็นระยะเวลา 9 เดือน จึงเห็นได้ว่าถึงแม้อุปกรณ์ปรับการไหล (straightener) จะช่วยลดการไหลหมุนวนลงได้ระดับหนึ่งแล้วก็ตามแต่ผลการวัดการไหลก็ยังไม่เสถียรภาพจนทำให้ความสามารถทำซ้ำ (repeatability) มีค่าลดลง จึงสรุปได้ว่าสภาวะการไหลผ่านเข้ามาตรวัดเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งที่ทำให้มาตรวัดสามารถทำการวัดการไหลได้แม่นยำและได้ค่าความสามารถทำซ้ำ (repeatability) ที่ดีหรือไม่

- **ชนิดใบพัด** การทดสอบเทอร์ไบน์มิเตอร์เพื่อศึกษาผลกระทบของรูปแบบการไหล (velocity profile) โดยให้การไหลจากท่อขนาดใหญ่แล้วลดขนาดท่อให้เล็กลงด้วยข้อลดศูนย์กลาง (conical reducer) ผลปรากฏว่ารูปแบบการไหล (velocity profile) หลังจากผ่านข้อลดดังกล่าวจะมีลักษณะราบเรียบรูปแบน แต่เมื่อของเหลวไหลผ่านท่อตรงไประยะหนึ่งประมาณ 60 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ รูปแบบการไหล (velocity profile) จึงค่อยคืนรูปลักษณะปกติดั้งเดิม จากนั้นทำการติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์จำนวน 2 ตัวซึ่งมีรูปร่างใบพัดต่างกัน 2 ชนิดคือใบพัดตรง (straight blades) กับใบพัดโค้ง (helical blades) ในตำแหน่งระยะห่างจากปากทางเข้าซึ่งเป็นข้อลดศูนย์กลางแตกต่างกัน

ผลการทดสอบพบว่าเทอร์ไบน์มิเตอร์ซึ่งมีใบพัดตรง (straight blades) ได้รับผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหล (velocity profile) น้อยกว่าเทอร์ไบน์มิเตอร์ซึ่งมีใบพัดโค้ง มีแต่เฉพาะในช่วงระยะทางต้นๆจากปากทางเข้าจนถึงระยะทางประมาณ 20 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อเท่านั้นที่เทอร์ไบน์มิเตอร์มีใบพัดตรงจะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหล (velocity profile) ก่อนข้างรุนแรงกว่าใบพัดโค้ง (ดูรูป 82)

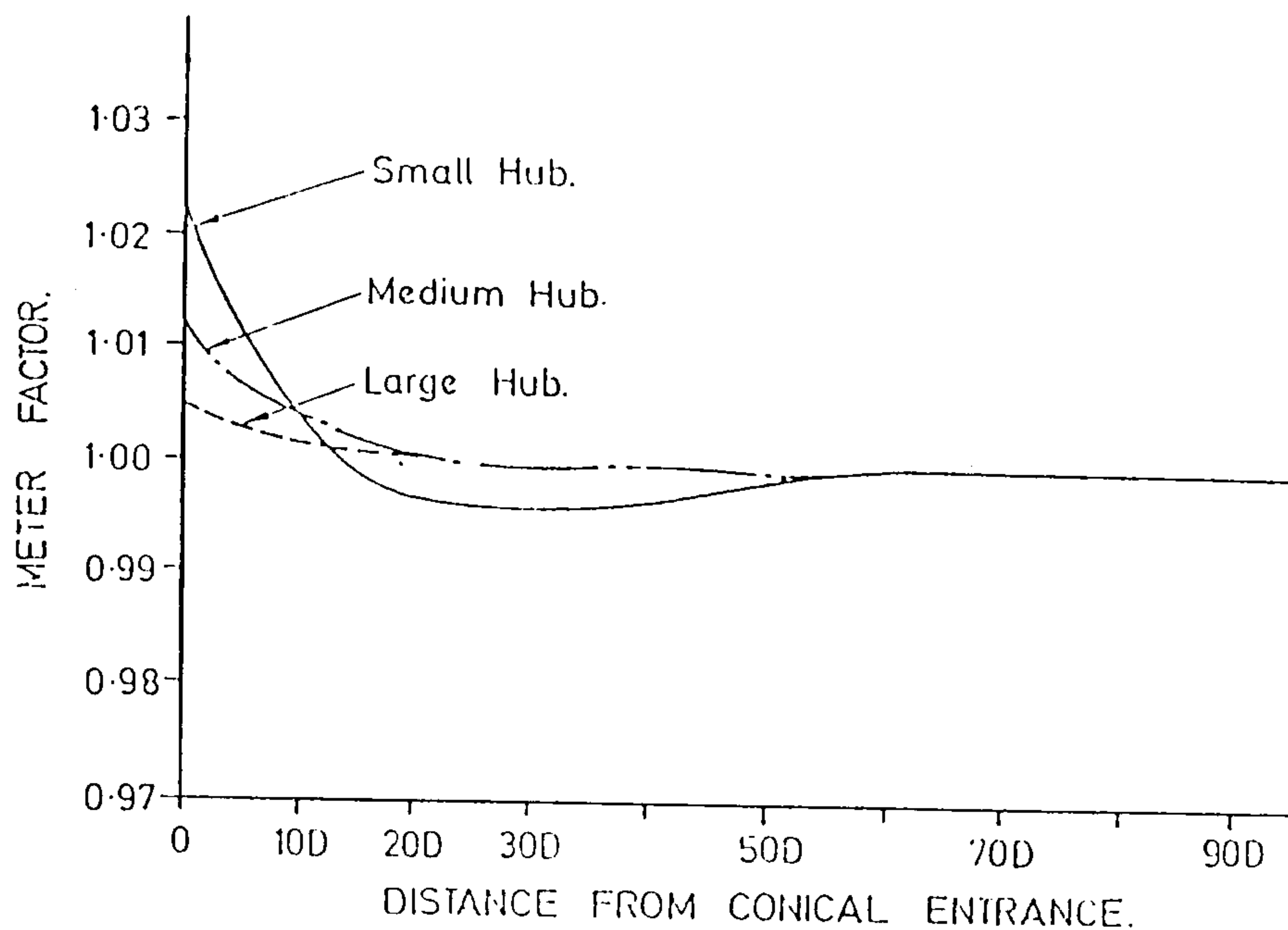
EFFECT OF VARIATIONS IN VELOCITY PROFILE #1



รูป 82 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลเมื่อมุมของใบพัดเทอร์ไบน์เปลี่ยน

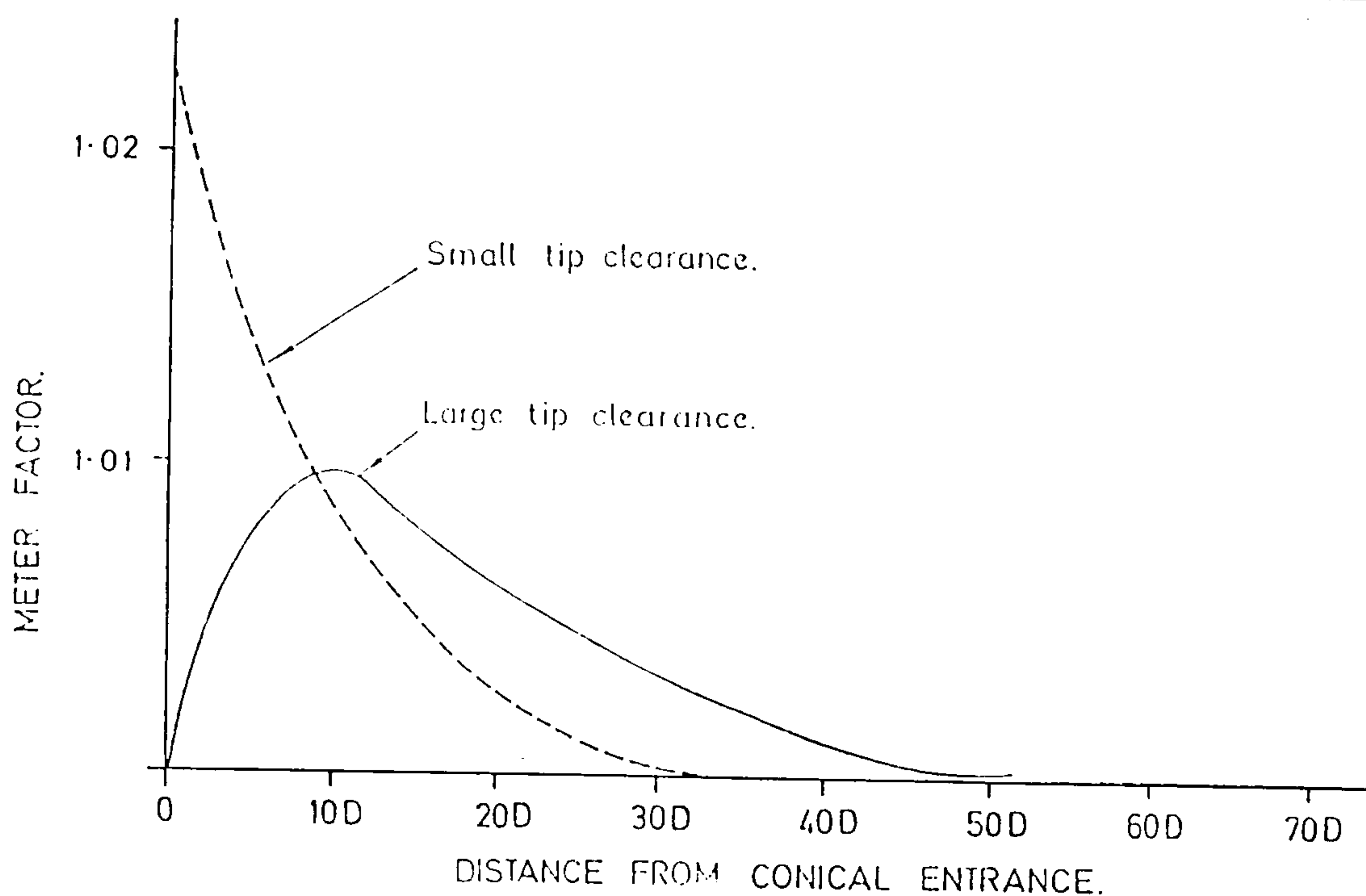
- ขนาดกระดุมใจกลางเทอร์ไบน์มิเตอร์ (hub size of turbine meter) ได้ทดสอบเทอร์ไบน์มิเตอร์ซึ่งมีขนาดกระดุมใจกลางเทอร์ไบน์มิเตอร์แตกต่างกัน 2 ขนาด โดยติดตั้งที่ระยะห่างจากตำแหน่งเข้าข้อลดศูนย์กลางตรงที่ระยะแตกต่างกัน ผลการทดสอบพบว่าเมื่อรูปแบบการไหล (velocity profile) เปลี่ยนแปลง เทอร์ไบน์มิเตอร์ซึ่งมีขนาดกระดุมใจกลางเทอร์ไบน์มิเตอร์ยิ่งใหญ่ ยิ่งให้ผลการวัดที่แม่นยำขึ้นและการเปลี่ยนแปลงค่าเค-แฟกเตอร์ (K-factor) ยิ่งน้อยลง (ดูรูป 83)

EFFECT OF VARIATIONS IN VELOCITY PROFILE #2



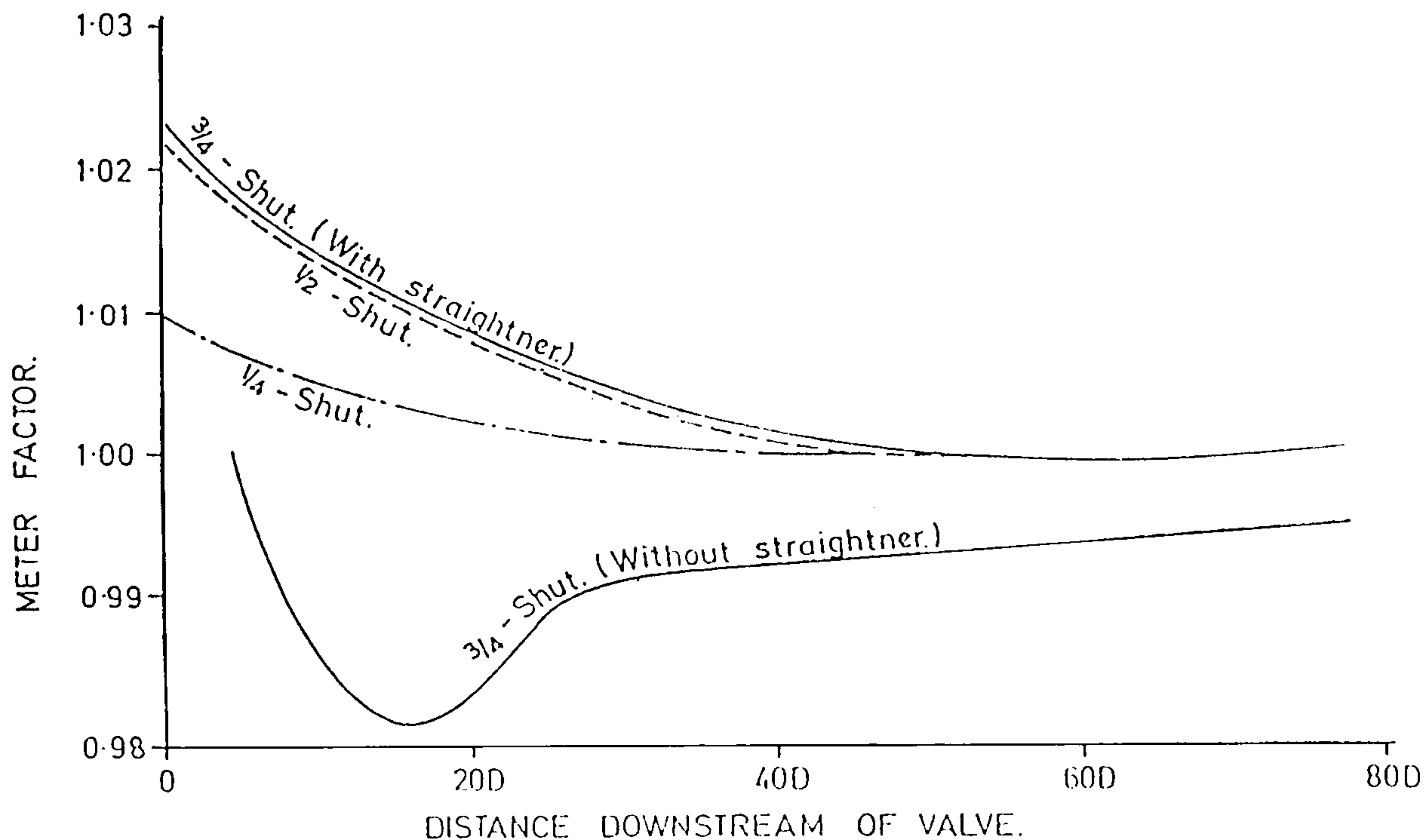
รูป 83 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลเมื่อขนาดกระดุมใจกลางเทอร์ไบน์มีเตอร์เปลี่ยน

EFFECT OF VARIATIONS IN VELOCITY PROFILE #3



รูป 84 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลเมื่อช่องว่างระหว่างปลายใบพัดกับตัวเรือนมาตรวัดเปลี่ยน

EFFECT OF A PARTLY-OPEN GATE VALVE



รูป 85 อิทธิพลของการหริวาล์วทางเข้า

- **ระยะห่างระหว่างปลายใบพัดกับผนังท่อ (blade tip clearance)** เมื่อนำเทอร์ไบน์มิเตอร์ซึ่งมีระยะห่างระหว่างปลายใบพัดกับผนังท่อแตกต่างกัน 2 ตัวติดตั้งในระยะห่างจากข้อลดศูนย์ตรงมีค่าแตกต่างกัน ผลการทดสอบพบว่าเทอร์ไบน์มิเตอร์ซึ่งมีระยะห่างระหว่างปลายใบพัดกับผนังท่อมาก ให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าเทอร์ไบน์มิเตอร์ซึ่งมีระยะห่างระหว่างปลายใบพัดกับผนังท่อน้อย ทั้งนี้อธิบายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลมีผลกระทบต่อตำแหน่งบริเวณใกล้ผนังท่อมกกว่าตำแหน่งอื่นๆ ณ. ที่พื้นที่หน้าตัดหนึ่งๆนั้นคือบริเวณผนังท่อรูปแบบการไหลมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าบริเวณใดๆ

ดังนั้นเมื่อปลายใบพัดไม่ได้อยู่ในบริเวณดังกล่าวจึงไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อเทอร์ไบน์มิเตอร์ที่มีระยะห่างระหว่างปลายใบพัดกับผนังท่อมกๆ

- **การปิดเปิดวาล์วก่อนทางเข้ามาตรวัด** ในกรณีทำการติดตั้งมาตรวัดหลังเกจวาล์ว (gate valve) ที่ระยะห่างแตกต่างกันจากนั้นทำการปิดเกจวาล์วที่ตำแหน่งแตกต่างกันได้แก่ ปิดวาล์ว 1/4 , 1/2 และ 3/4 ของระยะปิดทั้งหมดโดยไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ปรับการไหล (straightener) ก่อนทางเข้ามาตรวัด ผลปรากฏว่าเมื่อปิดเกจวาล์วเพียง 1/4 ของระยะปิดทั้งหมด ค่าเค-แฟคเตอร์ (K-factor) เปลี่ยนไปประมาณ 1 % เมื่อมาตรวัดอยู่ในตำแหน่งใกล้กับเกจวาล์วและค่าเค-แฟคเตอร์ (K-factor) เปลี่ยนแปลงเพียง 2 % เท่านั้นหากทำการปิดเกจวาล์วถึง 3/4 ของระยะปิดทั้งหมด แต่หากพิจารณาการปิด

วาล์วที่ระยะเท่ากันคือ 3/4 ของระยะปิดทั้งหมดแต่แตกต่างกันที่ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ปรับการไหล (straightener) เพิ่มเข้าในระบบการวัด ค่าเค-แฟคเตอร์(K-factor)ที่ได้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางตรงข้ามกับเมื่อปิด 3/4 ของระยะปิดทั้งหมดแต่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ปรับการไหล (straightener)

จึงสรุปได้ว่า ไม่ควรทำการติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์หลังข้อต่อ , ข้องอ , ข้อลด หรือ หลังวาล์ว ใกล้ชิดจนเกินไปถึงแม้จะมีอุปกรณ์ปรับการไหล (straightener)ก็ตาม ก็ไม่สามารถช่วยลดหรือปรับสถานะการไหลที่เสียไปให้ได้รูปแบบการไหลกลับคืนสภาพดังเดิมทุกครั้งเสมอไป

อิทธิพลการเกิด cavitation

เป็นสิ่งสำคัญมากที่สุดในการติดตั้งเทอร์ไบน์มิเตอร์เพื่อให้เทอร์ไบน์มิเตอร์ทำงานด้วยความดันกลับ (back-pressure) ที่เกิดขึ้นกับเทอร์ไบน์มิเตอร์มากกว่าค่าที่กำหนดไว้ต่ำสุดโดยบริษัทผู้ผลิตกำหนด ไม่เช่นนั้นจะก่อให้เกิด cavitation ทั้งนี้หากความดันกลับ (back-pressure) มีค่าต่ำกว่าที่กำหนดไว้ ไม่เพียงแต่จะก่อให้เกิด cavitation แต่ยังส่งผลให้สมรรถนะการทำงานของเทอร์ไบน์มิเตอร์ลดลงด้วย โดยค่าเค-แฟคเตอร์ (K-factor)จะมีค่าเพิ่มขึ้นทันทีทันใดเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น ในขณะที่ช่วงการวัดได้ก็จะต่ำลงและลักษณะความเป็นเชิงเส้น (linearity) ก็จะลดลงด้วยเช่นกัน

มาตรวัด P.D.

(DISPLACEMENT METERS)

มาตรวัดชนิด displacement meter หรือ positive displacement meter (P.D. meters) เป็นมาตรวัดของเหลวซึ่งได้รับการออกแบบมาเพื่อวัดปริมาตรของเหลวโดยแบ่งของเหลวในระบบปิดออกเป็นส่วนๆที่มีค่าแน่นอนค่าหนึ่งแล้วทำการนับรวมกันเป็นปริมาณรวม ของเหลวเมื่อไหลเข้ามาตรวัดจะไหลผ่านเข้าไปยังส่วนวัดปริมาตรของเหลว (measuring element) ด้วยปริมาตรคงที่ค่าหนึ่งบวกกับปริมาณส่วนที่รั่วไหล (leakage or slip) อีกเล็กน้อยในแต่ละช่วงชักหรือรอบการหมุนของส่วนวัดปริมาตรของเหลว การที่ของเหลวมีการรั่วไหลเล็กน้อยผ่านมาตรวัดเกิดขึ้นก็เนื่องจากชิ้นส่วนการทำงานของส่วนวัดปริมาตรของเหลวมีช่องว่าง (clearances) อยู่ค่าหนึ่ง ด้วยเหตุนี้ปริมาณการรั่วไหลเล็กน้อยดังกล่าวจึงแปรเปลี่ยนเมื่ออัตราการไหลและความหนืดเปลี่ยนแปลง ปริมาณส่วนที่รั่วไหลเล็กน้อยนี้มีค่าไม่คงที่แน่นอนถึงแม้ว่าจะเป็นมาตรวัดชนิดและรุ่นเดียวกันหรือชนิดและรุ่นต่างกัน

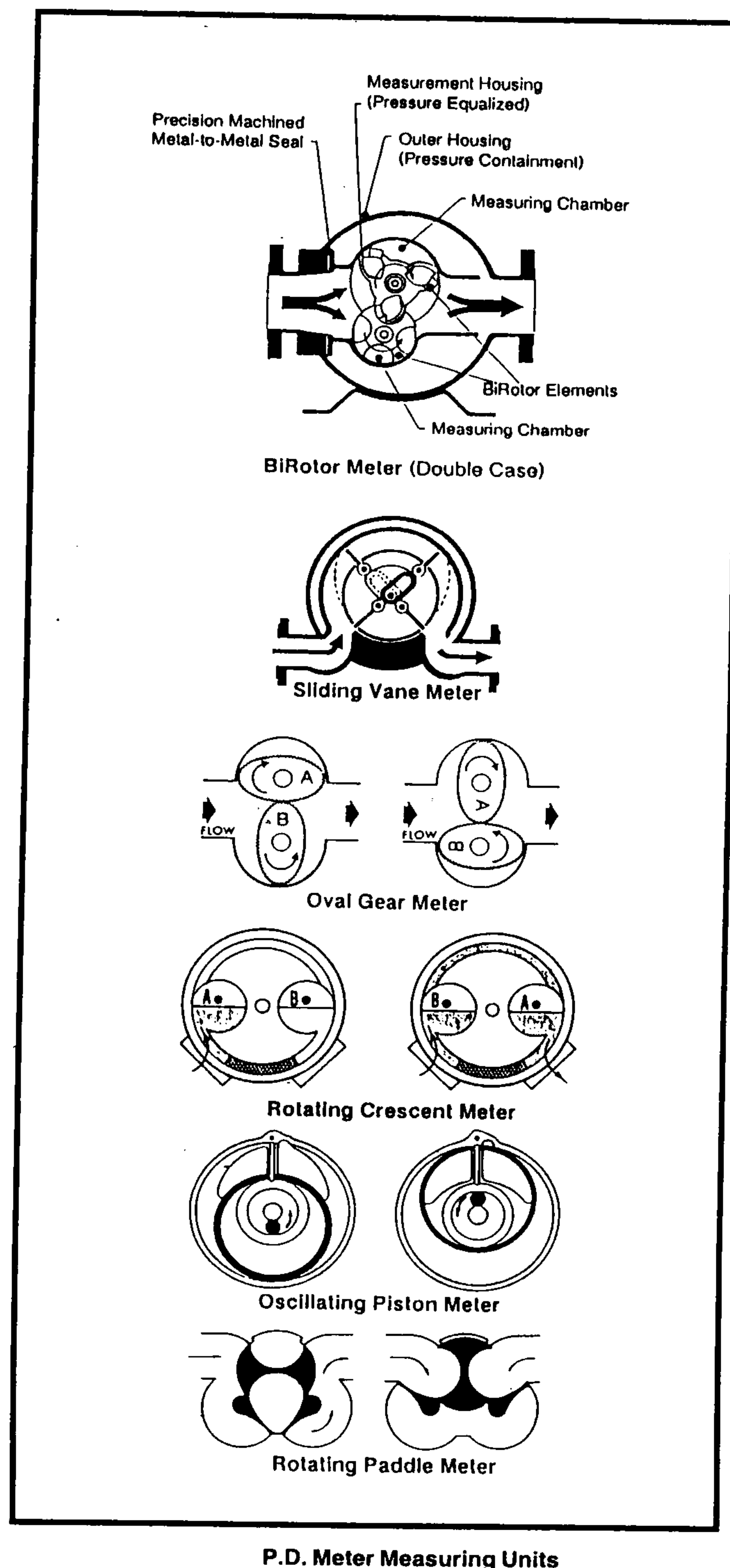
ผลเนื่องจากช่องว่าง (clearances) นี้เองจึงมีผลต่อสมรรถภาพในการทำงานของมาตรวัด มาตรวัดชนิดนี้จึงไม่ถูกนำไปใช้งานในกรณีของไหลเป็นแบบชนิด 2 เฟส นั่นคือมีไอผสมอยู่ในของเหลวอย่างเด็ดขาด

ประเภทของมาตรวัด (type of meters)

โดยปกติแล้วหากต้องการผลการวัดที่มีความแม่นยำสูง มักจะนิยมใช้มาตรวัดชนิด positive displacement meter ซึ่งการแบ่งประเภท displacement meter ส่วนใหญ่จะแบ่งตามประเภทของกลไกที่ได้รับการออกแบบสำหรับแบ่งปริมาตรของเหลวออกเป็นส่วนๆที่รู้ค่าแน่นอนค่าหนึ่ง การแบ่งตามส่วนวัดปริมาตรของเหลวของมาตรวัดนี้พอจะจัดประเภทของมาตรวัดออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ด้วยกัน

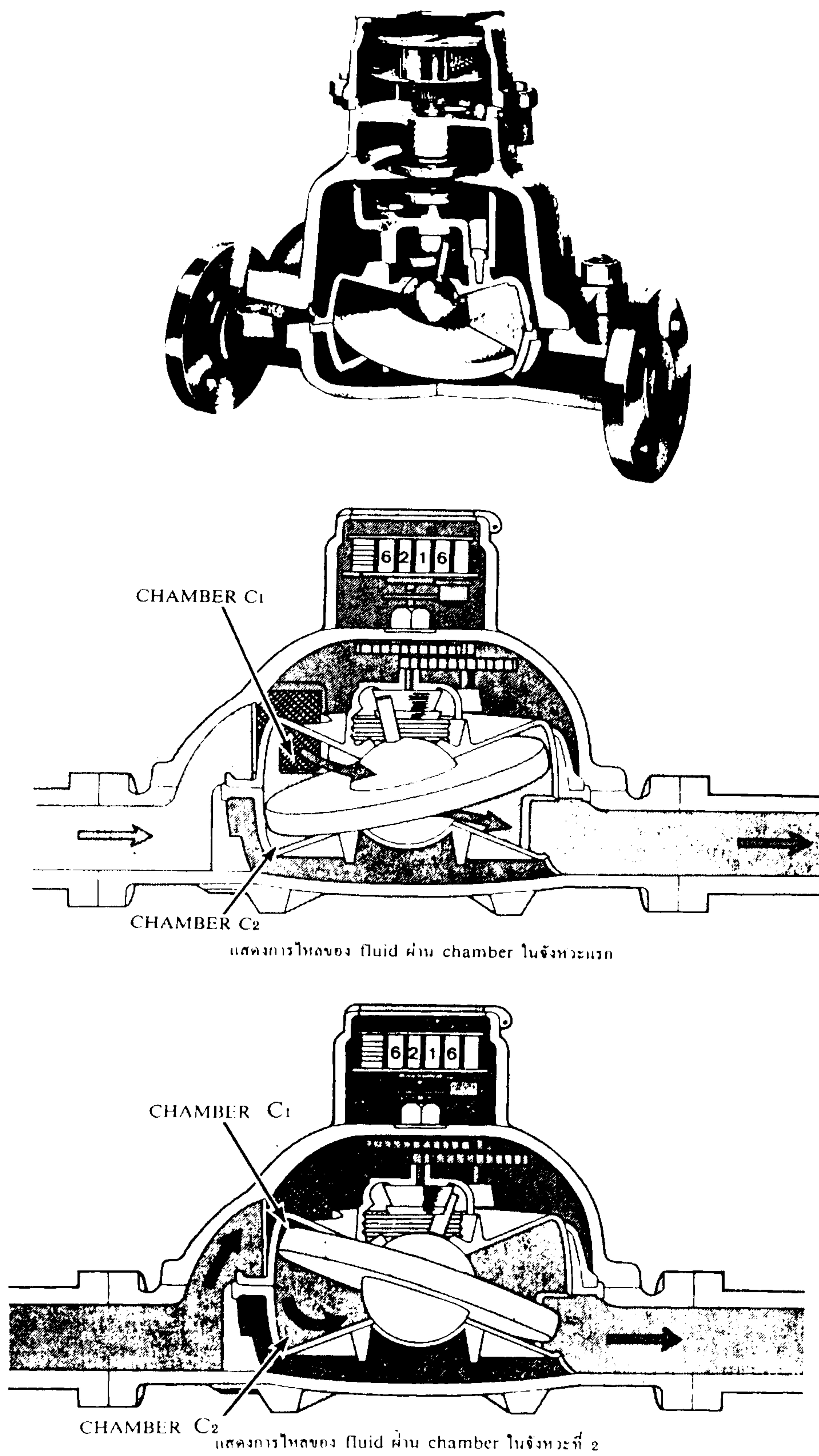
1. ลูกสูบ (Piston)

- **แบบแผ่นหมุนและแกว่ง (Nutating Disc)** นิยมใช้วัดอัตราการไหลของน้ำประปา ตัวดิสค์จะถูกติดตั้งอยู่บนบอลล์แบร์ริงในตำแหน่งที่เอียงพอดีที่ขอบทั้งสองด้านสัมผัสกับกลองที่บรรจุอยู่ ทำให้ปริมาตรของเหลวถูกแบ่งออกเป็น 2 ห้อง (chamber) คือด้านล่างและด้านบนของตัวดิสค์ (ดูรูป 87) ด้านข้างกลองบรรจุดิสค์จะเจาะช่องไว้ 2 ช่อง ช่องหนึ่งเป็นทางเข้าของเหลว อีกช่องหนึ่งเป็นทางออก เมื่อมีของเหลวไหลเข้าสู่กลอง ทิศทางการหมุนของดิสค์จะเป็นไปตามทิศทางการไหลของของเหลวเนื่องจากความแตกต่างของความดันระหว่างด้านทางเข้าและด้านทางออกของส่วนวัดปริมาตร ในหนึ่งรอบที่ดิสค์หมุนไปจะมีปริมาตรของเหลวไหลผ่านส่วนวัดปริมาตรแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงบนและช่วงล่างของดิสค์ ดังนั้นปริมาตรของเหลวที่ไหลผ่านส่วนวัดปริมาตรจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนรอบที่ดิสค์หมุนไป ด้วยเหตุนี้จึงสามารถนำแกนซึ่งติดอยู่กับบอลล์แบร์ริง



P.D. Meter Measuring Units

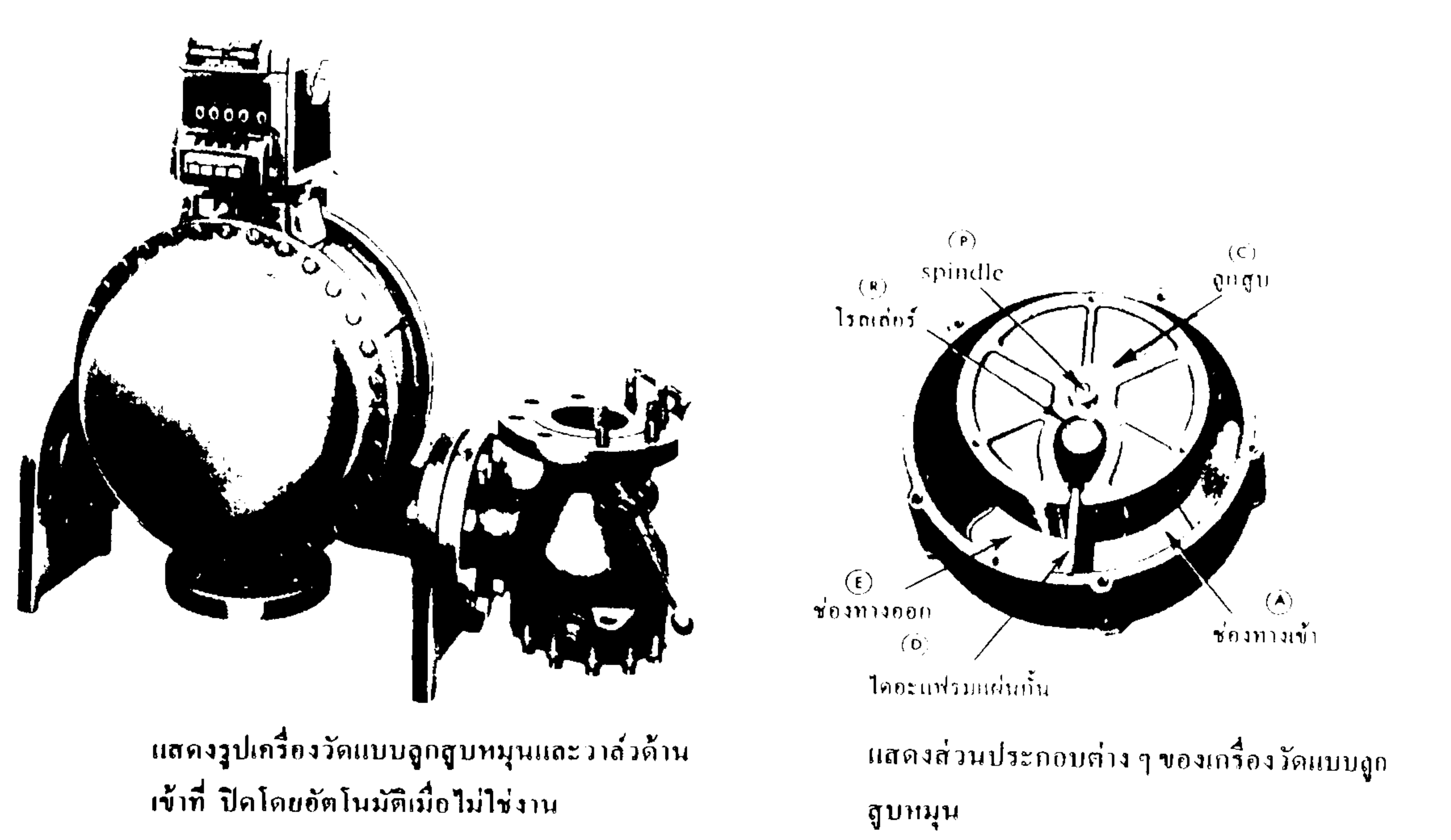
รูป 88 หลักการทำงานของส่วนวัดปริมาตรรูปแบบต่างๆ



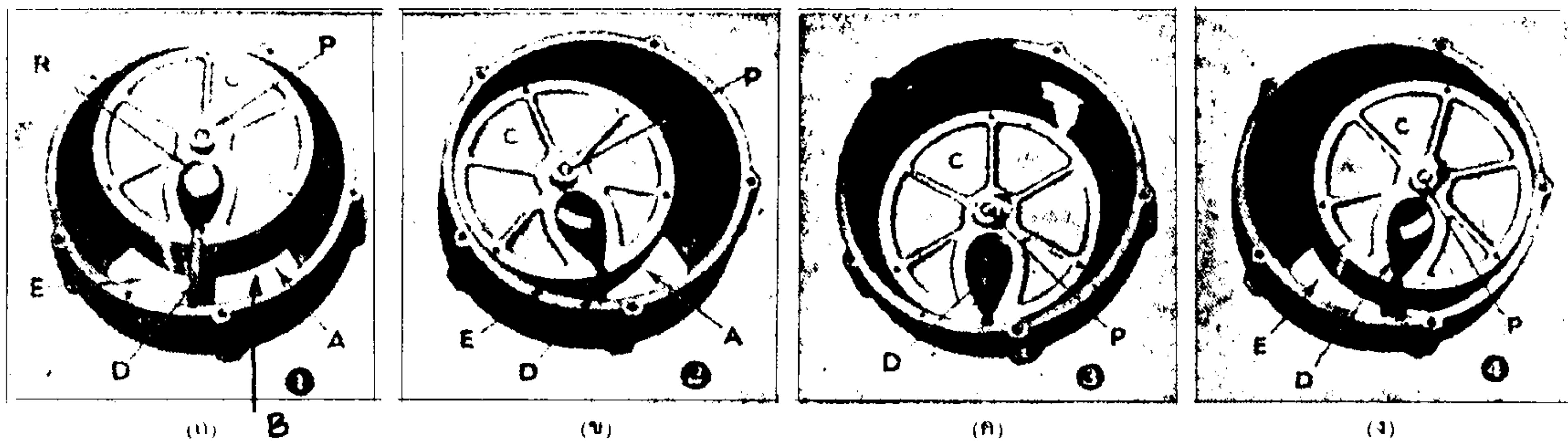
รูป 87 แสดงการทำงานของนิวเทตติ้งคิสต์ทั้งสองจังหวะคือการรับเข้าและถ่ายออกของห้องด้านบนและด้านล่างของกล่อง

ไปขับเฟืองอ่านค่าการไหลรวมได้โดยตรงหรืออาจต่อเข้ากับตัวกำเนิดสัญญาณพัลส์ (pulse) ผลิตสัญญาณไฟฟ้าให้สัญญาณเป็นดิจิตอลได้

- **แบบลูกสูบชักขึ้นลง (reciprocating piston)** ปกติแล้วจะมีขนาดเล็กและวัดปริมาตรของเหลวได้คราวละจำนวนน้อยๆ มาตรวัดชนิดนี้จะมีมอเตอร์สำหรับขับของเหลวให้ไหลผ่านมาตรวัด ดังนั้นมาตรวัดชนิดนี้จึงมีลักษณะเป็นปั๊มมาตรวัด (metering meter) มักจะพบมาตรวัดชนิดนี้ตามสถานที่บริการน้ำมันเชื้อเพลิงทั่วไป
- **แบบลูกสูบสั่น (Oscillating Piston)** หลักการทำงานของมาตรวัดชนิดนี้คล้ายกับแบบแผ่นหมุนและแกว่ง แต่ใช้ลูกสูบที่ถูกวางเอียงกับกรอบวงกลมหมุนสายไปรอบๆ โรลเลอร์ตามรูปที่ 88 ด้านเข้าและด้านออกของเหลวจะถูกกั้นด้วยไดอะแฟรมแผ่นตรง พิจารณาลักษณะการทำงานของมาตรวัด เมื่อของเหลวที่มีความดันไหลเข้าตัววัดทางช่อง A สู่อ่าง B ทางขวามือจะผลักดันลูกสูบ C ให้หมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา เมื่อตำแหน่งของลูกสูบ C หมุนไปอยู่ดังรูปถัดไปจะทำให้ช่อง A ถูกปิดมากขึ้น จนกระทั่งช่องเข้า A และช่องออก E ถูกปิดสนิทในดังรูปถัดมา จากนั้นช่องออก E จะถูกเปิดออก ของเหลวที่ไหลเข้าอ่าง B ตามรูปจะถูกลูกสูบอัดให้ออกทางช่องออก E ในจังหวะเดียวกันนั่นเอง ช่องเข้า A ก็จะเริ่มเปิดออกรับของเหลวเข้าและผลักดันให้ของเหลวที่เข้าไปในจังหวะก่อนไหลออกสู่ทางช่องออก E จนหมด จังหวะการทำงานก็จะวนเวียนไปตลอดในลักษณะนี้ การวัดปริมาตรของเหลวที่ไหลผ่านตัววัดนี้จะวัดจากจำนวนรอบของลูกสูบที่หมุนไป เนื่องจากลูกสูบ C ถูกออกแบบให้หมุนไปติดกับกรอบนอกและสัมผัสกับไดอะแฟรมอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการรั่วไหลของเหลวจะมีน้อยมาก ยกเว้นในช่วงอัตราการไหลต่ำๆ เท่านั้น ขณะไม่ใช้งานควรมีวาล์วจะปิดไว้ตลอดเวลาเพื่อป้องกันการรั่วตามรูป 88 , 89



รูป 88 มาตรวัด P.D. แบบลูกสูบสั่น



รูป 89 ลักษณะการทำงานของ มาตรวัด P.D. แบบลูกสูบสั้น

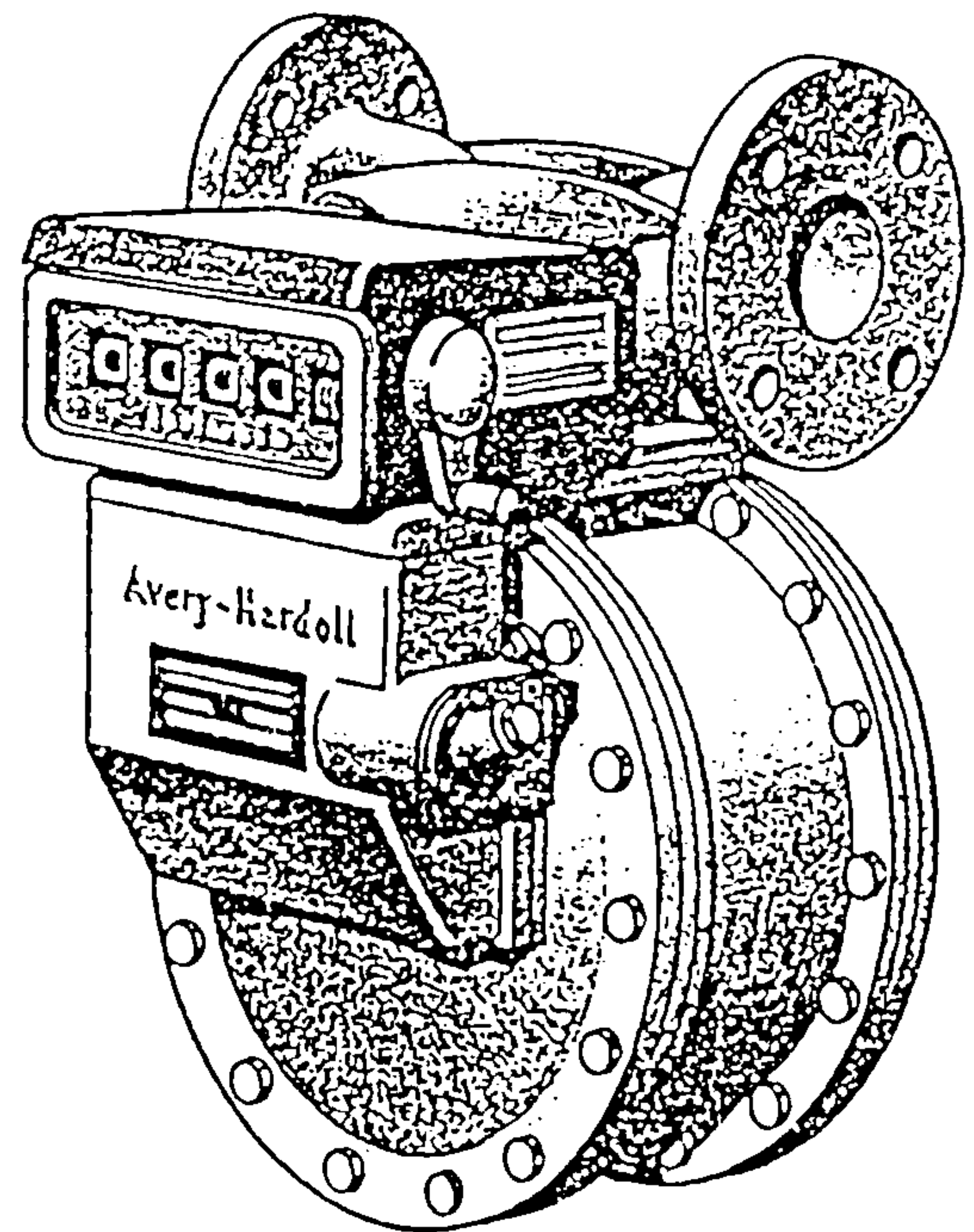
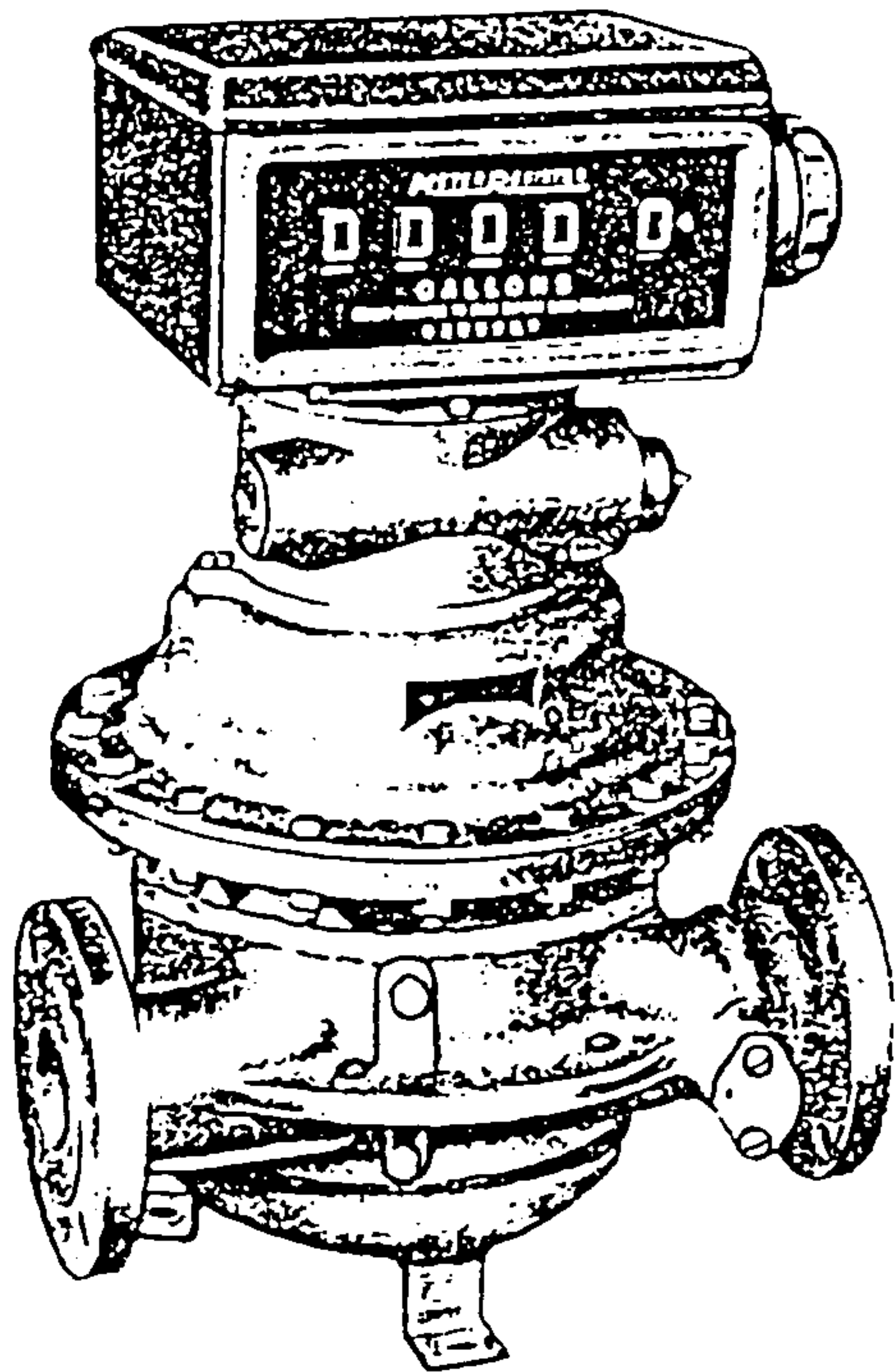
2. Rotary Sliding Vane เป็นมาตรวัดที่ได้รับความนิยมใช้มากที่สุดทั้งในการวัดน้ำมันดิบ อีกทั้งผลิตภัณฑ์น้ำมันในการซื้อขายและการเก็บภาษี

หลักการทำงานของมาตรวัดชนิดนี้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าถ้าตลอดพื้นที่ระหว่างตัวมาตรวัดกับตัวโรเตอร์เต็มไปด้วยของเหลวโดยไม่มีช่องว่างแต่อย่างใด เมื่อของเหลวไหลผ่านมาตรวัดในทิศทางดังรูป 90 ความดันด้านทางเข้าจะกระทำบนพื้นที่ผิวหน้าของเวนเป็นสาเหตุให้โรเตอร์หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเมื่อมองจากด้านบน ด้วยเหตุนี้จึงเป็นสาเหตุให้แผ่นเวน (vane) มีการเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับตัวโรเตอร์ โดยที่แผ่นเวנדังกล่าวซึ่งอยู่เป็นคู่ๆด้านตรงข้ามจะเคลื่อนที่ไปด้วยความสัมพันธ์กันเนื่องจากต่อเชื่อมโยงด้วยลูกเบี้ยว (ดูรูป 90)

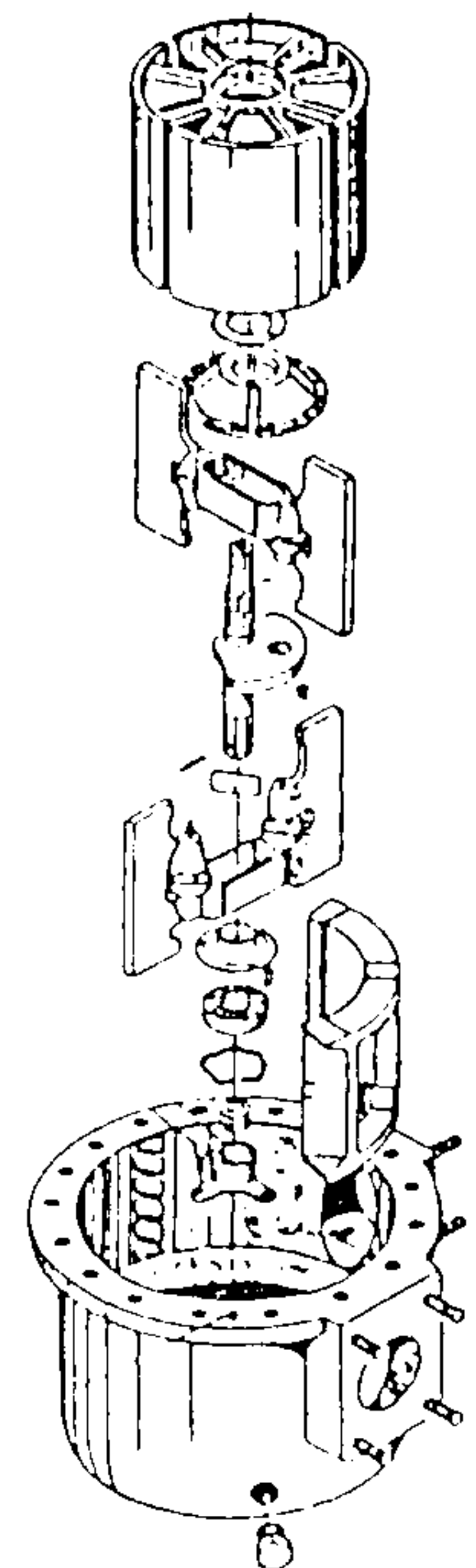
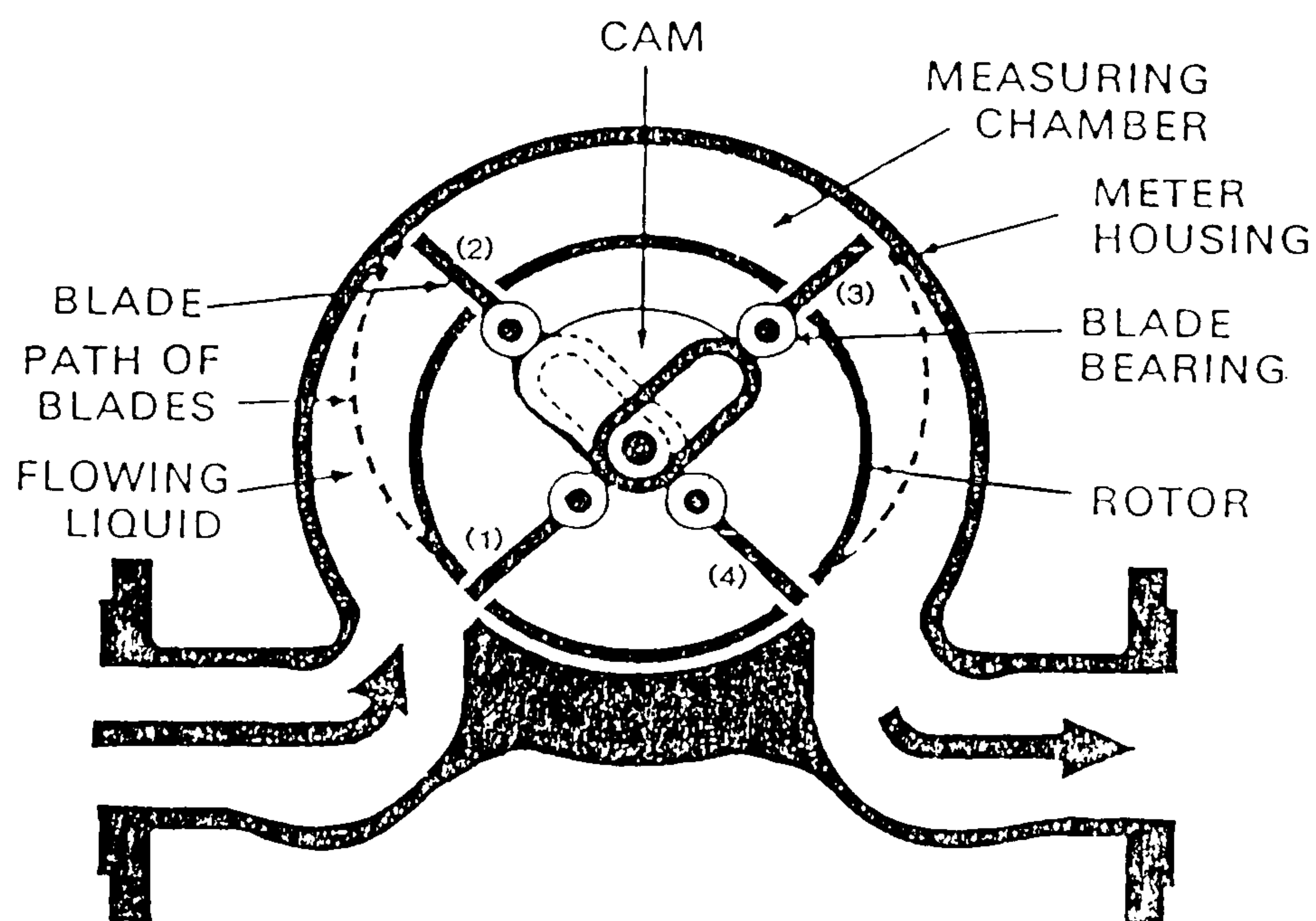
เมื่อพิจารณาเลือกเอาใบเวน (vane) ใบหนึ่งเช่นให้ตำแหน่ง (1) เมื่อโรเตอร์หมุน แบริงเวน (Vane Bearing) จะถูกลูกเบี้ยว (cam) บังคับให้แผ่นเวนเคลื่อนตัวสูงขึ้นตามแนวเส้นประจนชนกับผนังมาตรวัด ซึ่งเป็นตำแหน่งสูงสุดของแผ่นเวนที่จะสามารถเคลื่อนที่ได้ ณ.ตำแหน่งที่ (2) ระหว่างตำแหน่ง (2) กับตำแหน่ง (3) แผ่นเวนจะยังคงอยู่ในตำแหน่งที่ยื่นออกจากตัวโรเตอร์สูงสุด นั่นคือแบริงเวนจะอยู่บนตำแหน่งสูงสุดของลูกเบี้ยว (cam) ระหว่างตำแหน่ง (3) และ (4) แบริงเวนจะวิ่งกลับเข้าภายในตัวโรเตอร์ตามแนวทางเดินเส้นประเส้นที่ 2 จากตำแหน่งที่ (4) จนถึงตำแหน่งที่ (1) แผ่นเวนจะยังคงอยู่ในสภาพถอยกลับอยู่ภายในตัวโรเตอร์ทั้งหมด โดยแบริงเวนจะอยู่บนตำแหน่งต่ำสุดของลูกเบี้ยว (cam)

จึงเห็นได้ว่า displacement meter ได้ทำการแบ่งของเหลวออกเป็นส่วนๆได้อย่างไร เห็นได้ชัดว่าพื้นที่ระหว่างแผ่นเวนทั้ง 2 ระหว่างตำแหน่ง (2) และ (3) หรือปริมาตรของเหลวซึ่งอยู่ระหว่างแผ่นเวนทั้ง 2 โรเตอร์กับตัวเรือนมาตรวัดจะถูกดักไว้ จากนั้นของเหลวดังกล่าวจะถูกกวาดผ่านไปตลอดมาตรวัดด้วยแผ่นเวนที่ตามมา ด้วยลักษณะการทำงานดังกล่าวนี้จะกระทำต่อเนื่องซ้ำแล้วซ้ำเล่า ดังนั้นในหนึ่งรอบการหมุนจะแบ่งปริมาตรของเหลวได้เป็น 4 ส่วน

ROTARY SLIDING-VANE METERS

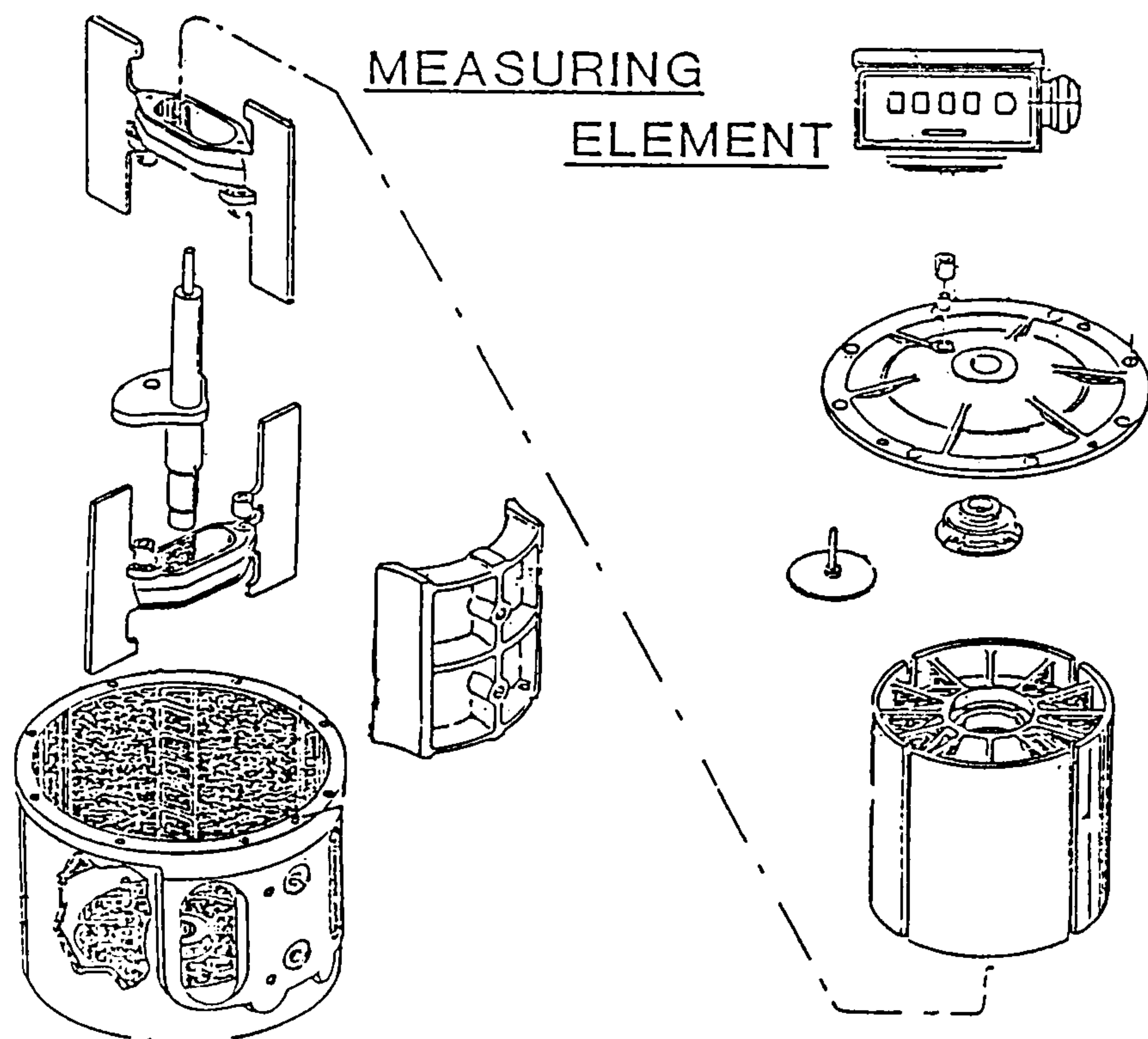
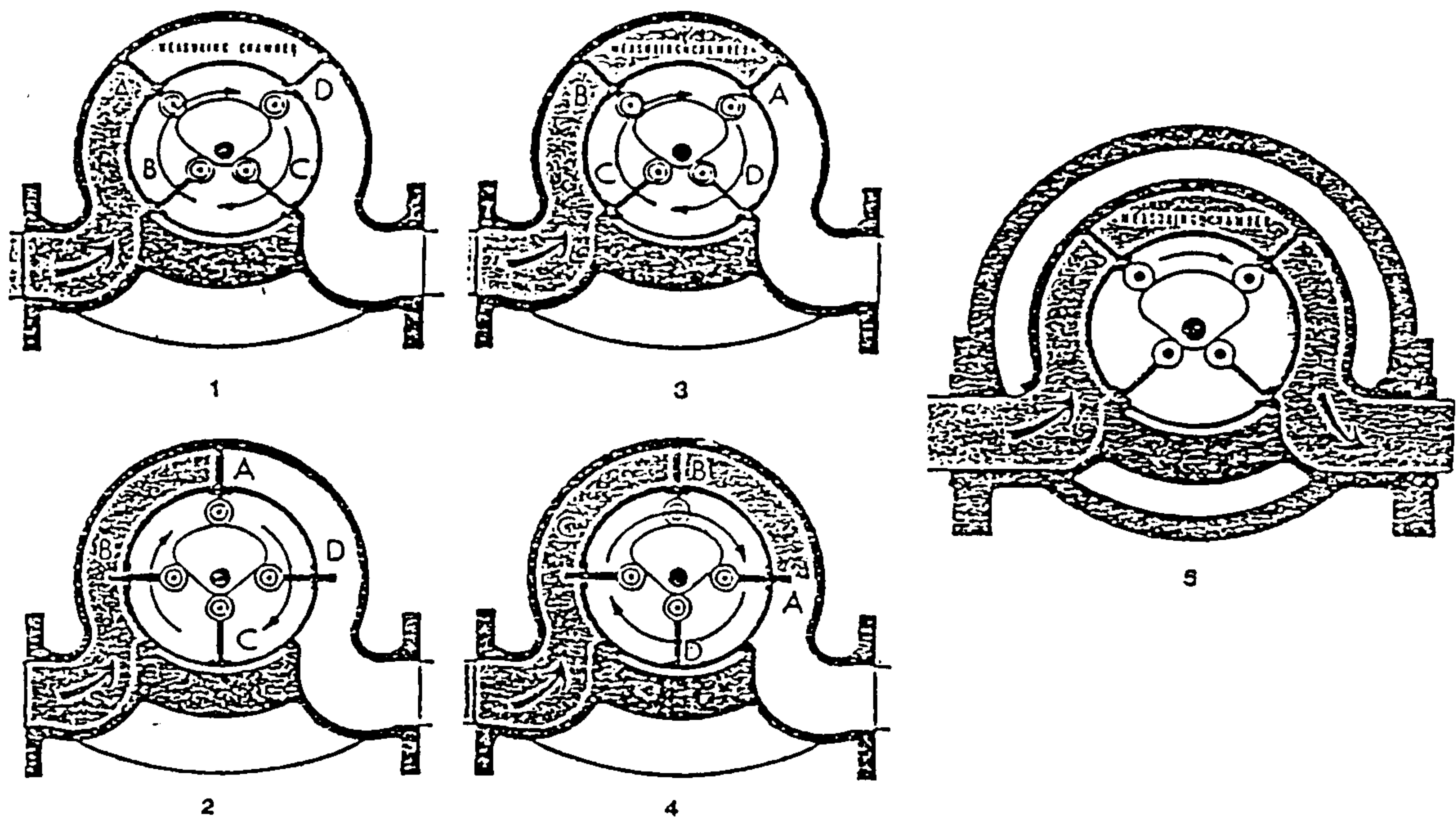


A.O. SMITH METER – PRINCIPLE OF OPERATION



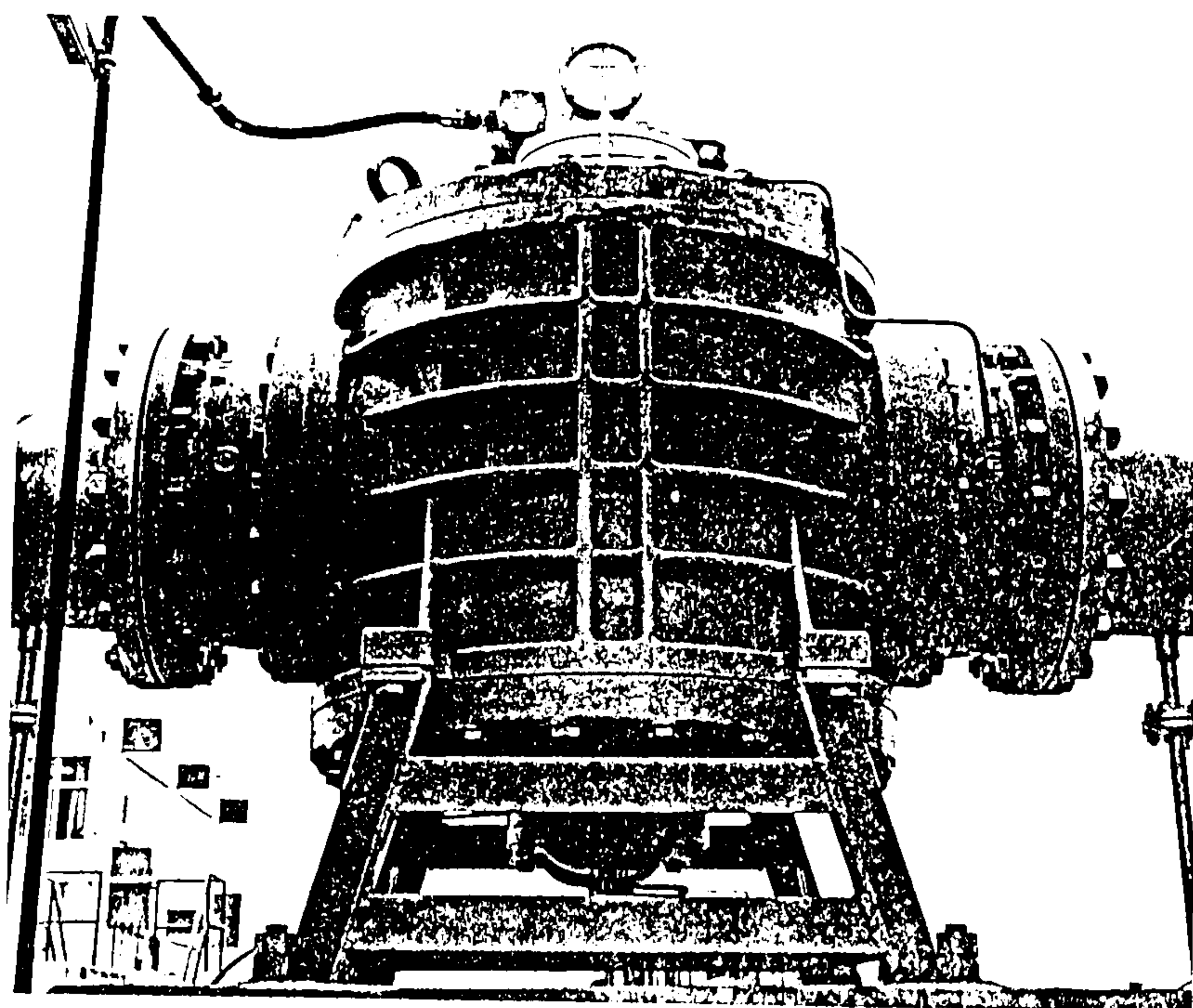
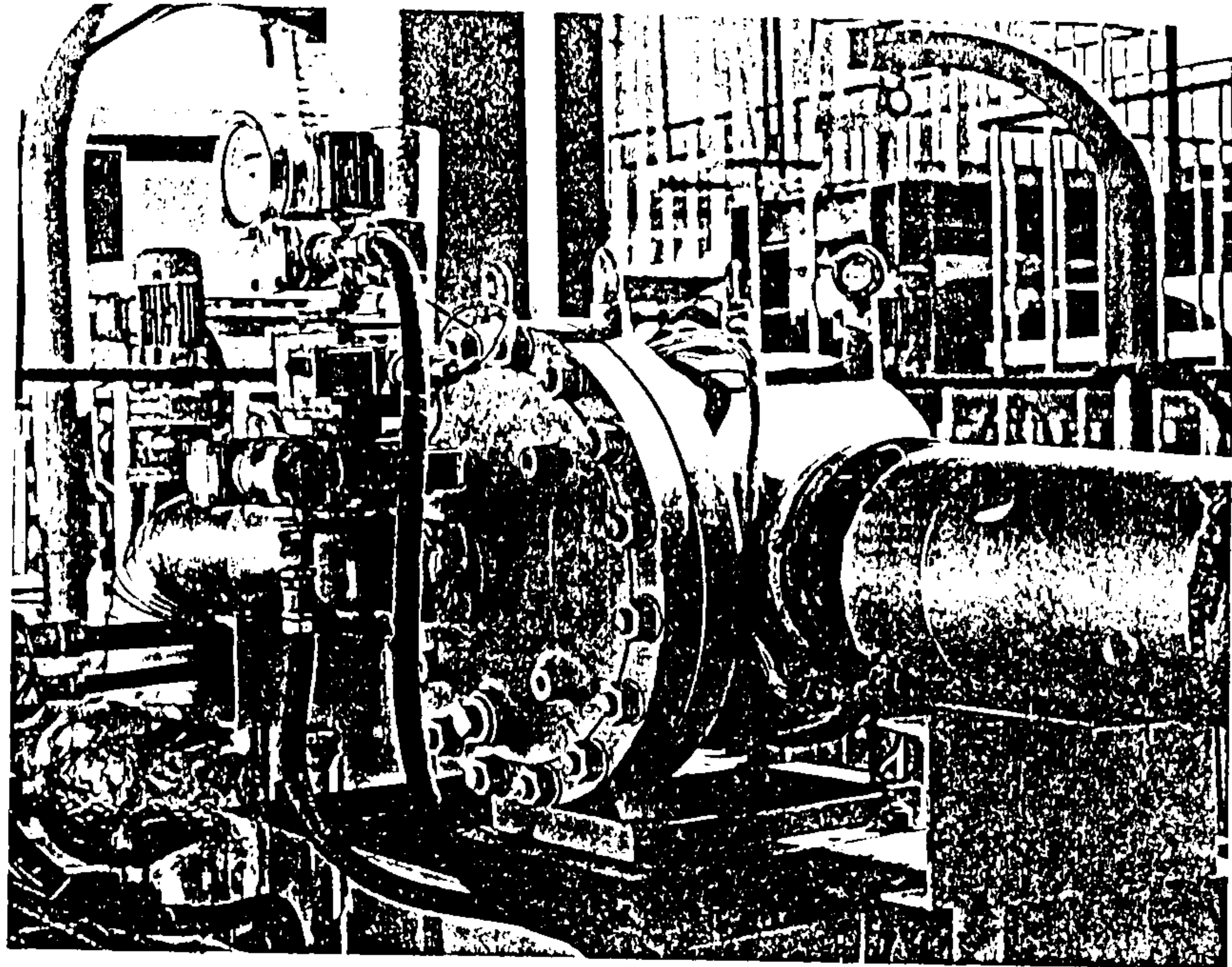
รูป 90 มาตรวัด P.D. แบบ Rotary Sliding-Vane ชนิด double case และลักษณะการทำงาน

A.O.SMITH METER – PRINCIPLE OF OPERATION



รูป 91 จังหวะการทำงานและส่วนวัดปริมาตรของมาตรวัดแบบ Rotary Sliding-Vane

จากลักษณะและโครงสร้างของมาตรวัดชนิดนี้พอจะแบ่งลักษณะการติดตั้งแนวแกนโรเตอร์ ออกเป็น 2 ลักษณะด้วยกันคือ แนวแกนโรเตอร์ขนานกับพื้นและแนวแกนโรเตอร์ตั้งฉากกับพื้น จะ เห็นได้ว่าแกนของโรเตอร์จะอยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้น (vertical) นั้นหมายถึงตัวเบริงโรเตอร์ด้านล่างจะ นั่งอยู่บนบ่า ซึ่งอาจจะมีปัญหาการสึกกร่อนหากมีเศษวัสดุหลงเข้าไป จึงเป็นข้อเสียสำหรับมาตรวัด ชนิดนี้ (ดูรูป 92)

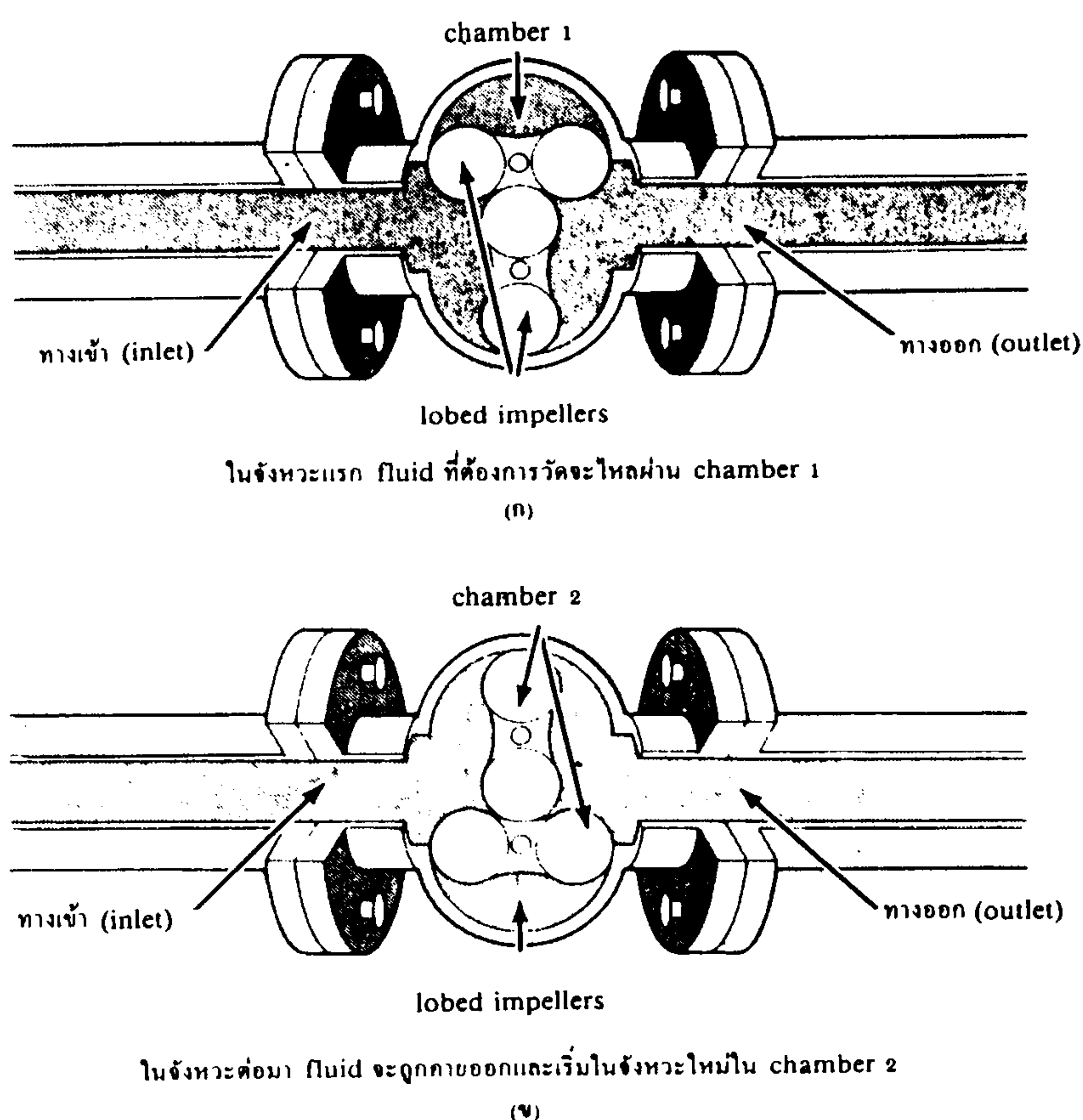


รูป 92 มาตรวัดแบบ Rotary Sliding-Vane

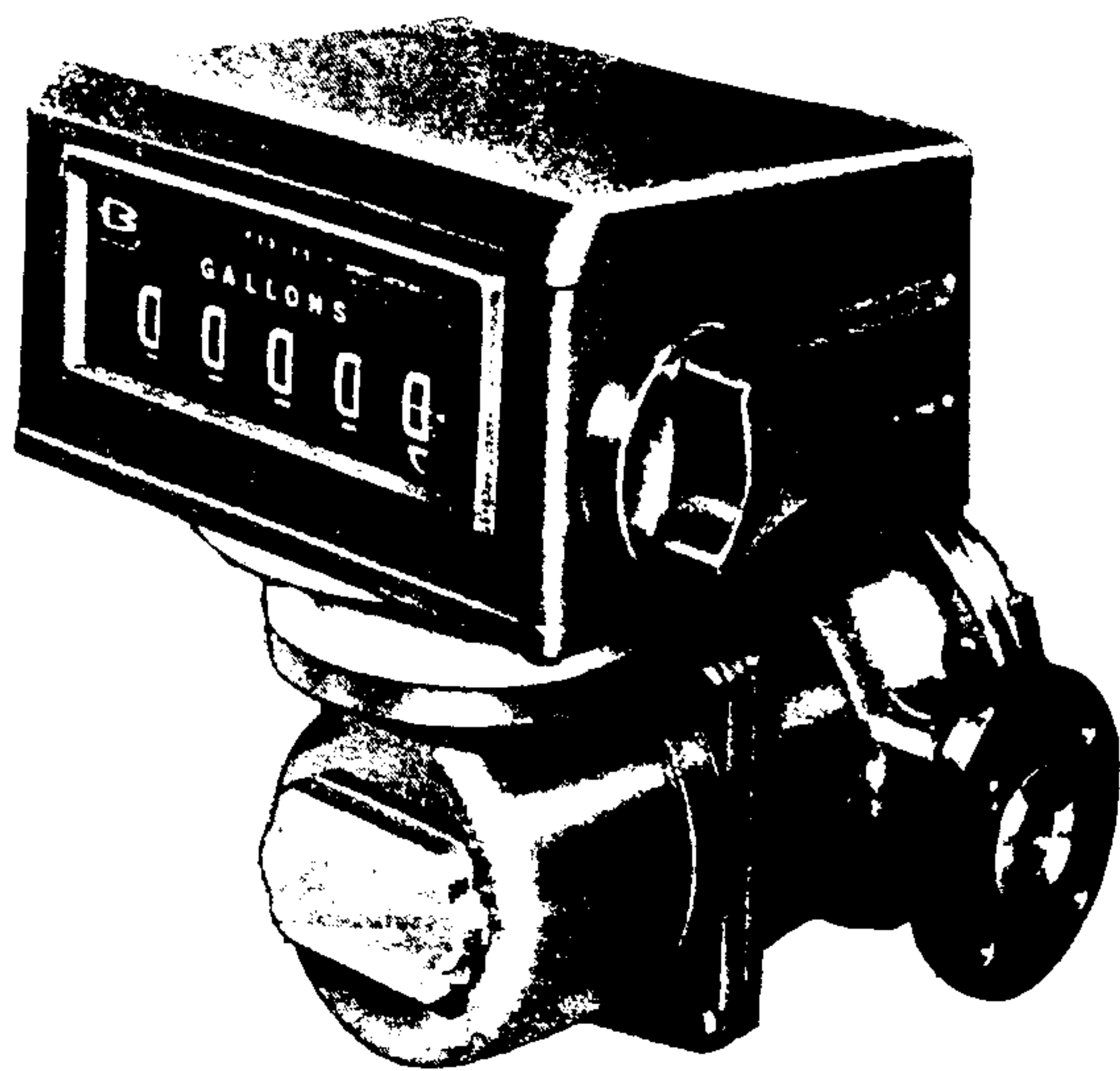
ชนิดแกนโรเตอร์ขนานกับพื้นและชนิดแกนโรเตอร์ตั้งฉากกับพื้น

มาตรวัดชนิด Rotary Sliding Vane ซึ่งได้รับการออกแบบให้วัดปริมาตรของเหลวค่าหนึ่งต่อการหมุนครบรอบหนึ่งรอบ 360° ของโรเตอร์ แต่เนื่องจากที่ช่องว่าง (clearances) ระหว่างตัวโรเตอร์กับตัวเรือนมาตรวัดมีค่าไม่คงที่ถึงแม้จะเป็นมาตรวัด ชนิด , รุนและยี่ห้อเดียวกันก็ตาม ทั้งนี้ก็เพราะว่าเกิดความคลาดเคลื่อนของการผลิตจากโรงงาน นอกจากนี้การสึกหรอของส่วนที่เคลื่อนที่และตัวเรือนมาตรวัดเนื่องจากการทำงานของมาตรวัดก็สามารถเปลี่ยนแปลงค่าช่องว่างดังกล่าวอีกเช่นกัน ปริมาตรของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดและผลที่แสดงของเครื่องนับและเครื่องบันทึกจึงไม่ค่อยจะมีค่าแม่นยำมากนัก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการสอบเทียบมาตรวัด (proving) เป็นระยะๆ เพื่อให้ได้ค่าการวัดโดยมาตรวัดใกล้เคียงมากที่สุดกับปริมาตรจริงๆที่ผ่านมาตรวัด

3. มาตรวัดชนิดพู (Lobed Impeller) ปกติมาตรวัดชนิดนี้จะใช้งานกับของเหลวซึ่งมีความหนาแน่นสูงๆ และความหนืดสูงๆ ซึ่งปัญหาการไหลลื่นตลอด (slippage) จะมีน้อยมากในมาตรวัดชนิดนี้ ลักษณะการทำงานและจังหวะการทำงานเหมือนกับแบบ Oval Rotary ทุกประการแต่ต่างกันที่รูปแบบของโรเตอร์คือมีส่วนเว้าตรงส่วนกลางของโรเตอร์ เมื่อโรเตอร์ทั้ง 2 หมุนไปจะมีส่วนที่สัมผัสกันและสัมผัสกับกรอบนอกตลอดเวลา (ดูรูป 93)

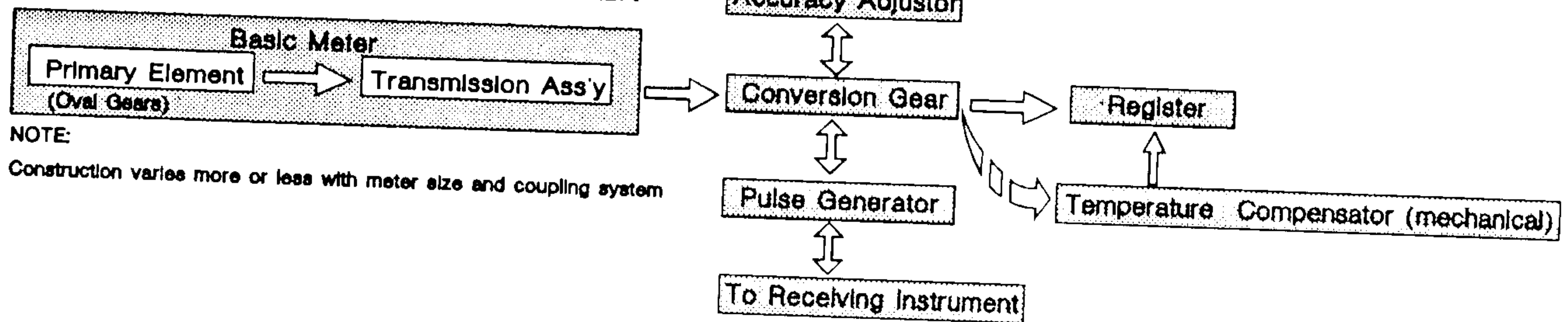


รูป 93 ลักษณะการทำงานของมาตรวัดชนิดพู

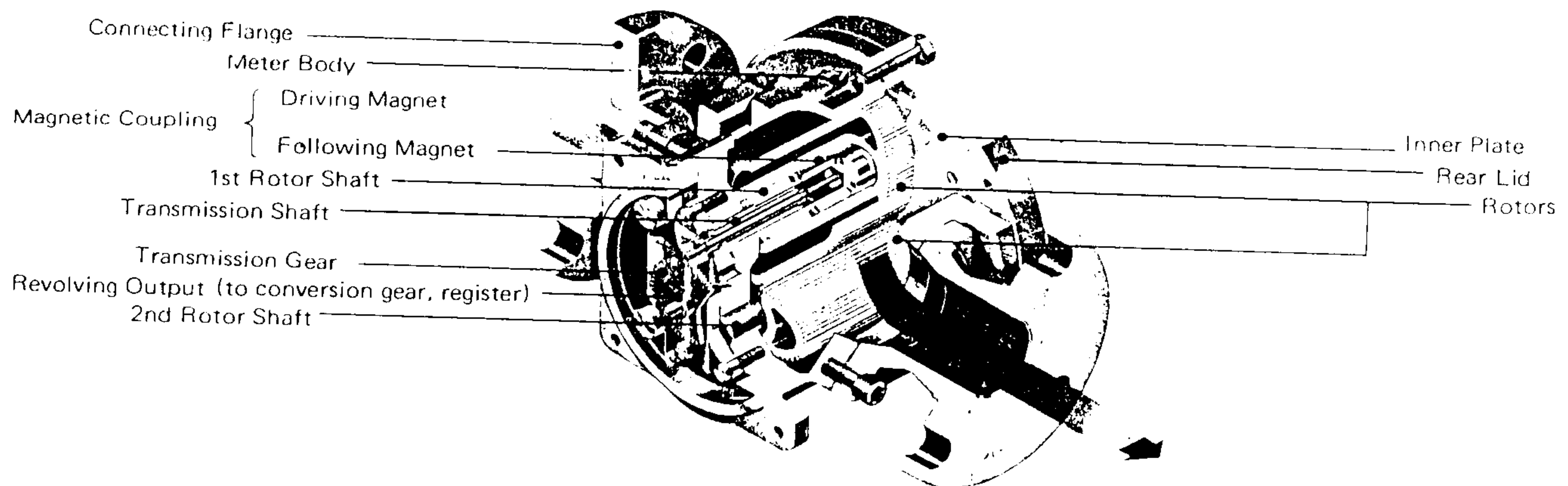


รูป 94 มาตรวัดชนิด Oval Rotary

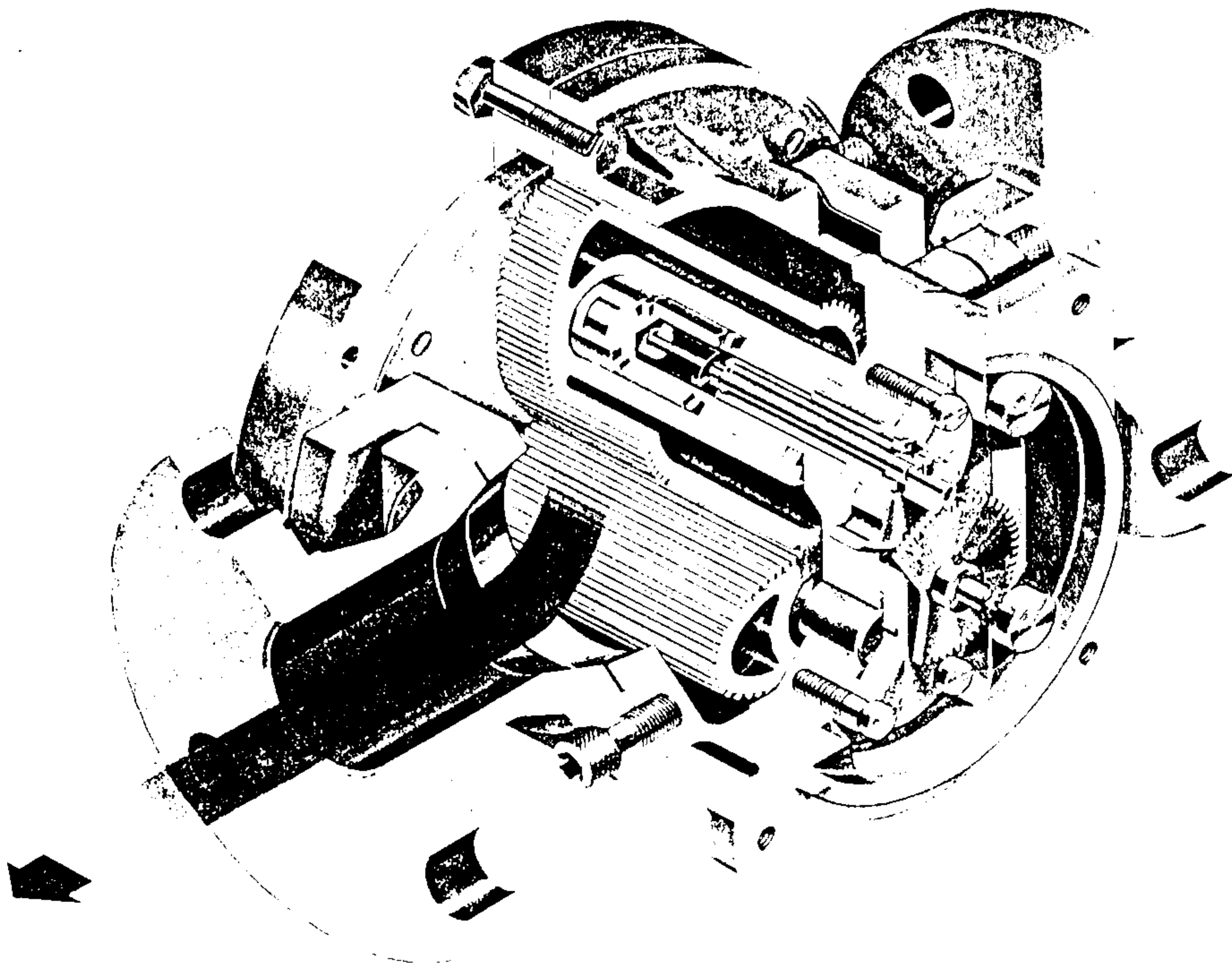
CONSTRUCTION OF OVAL FLOWMETER



Construction (typical example), Coupling System, "7", Single Case Type



รูป 95 แสดงส่วนประกอบรายละเอียดของมาตรวัดชนิด Oval Rotary

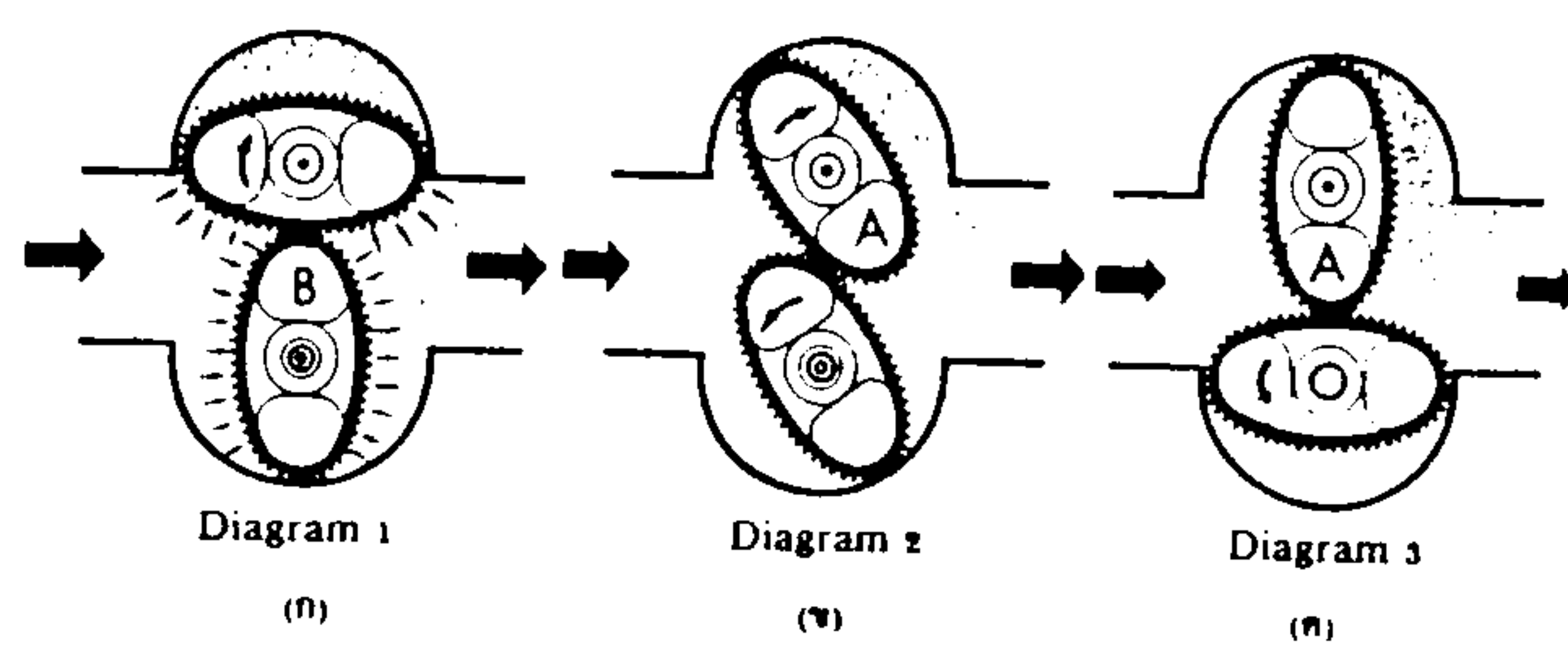
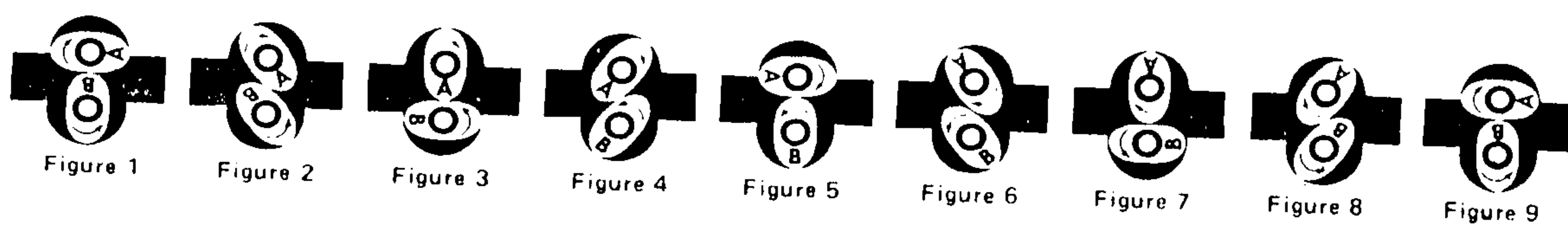
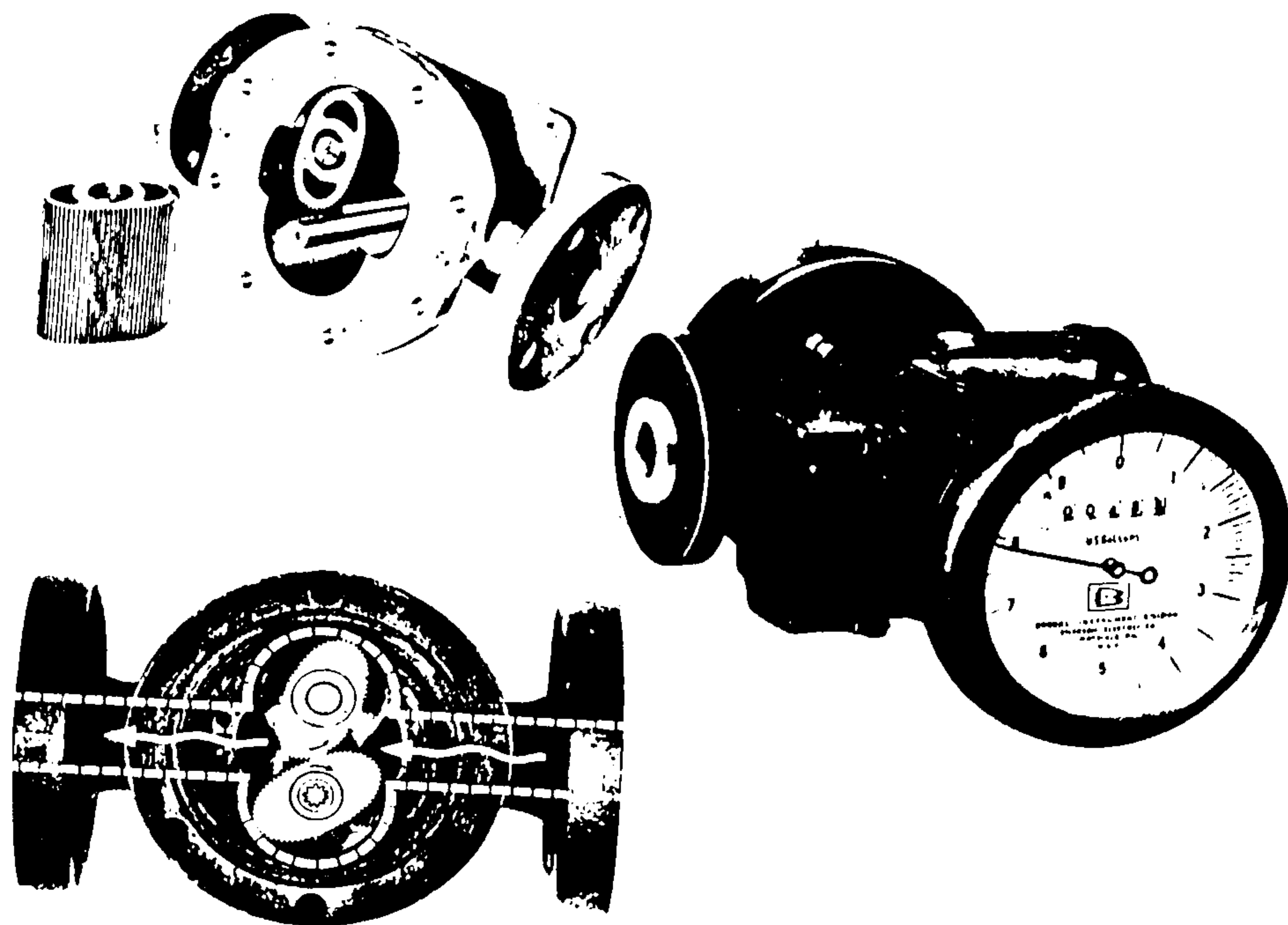


รูป 95 แสดงส่วนประกอบรายละเอียดของมาตรวัดชนิด Oval Rotary

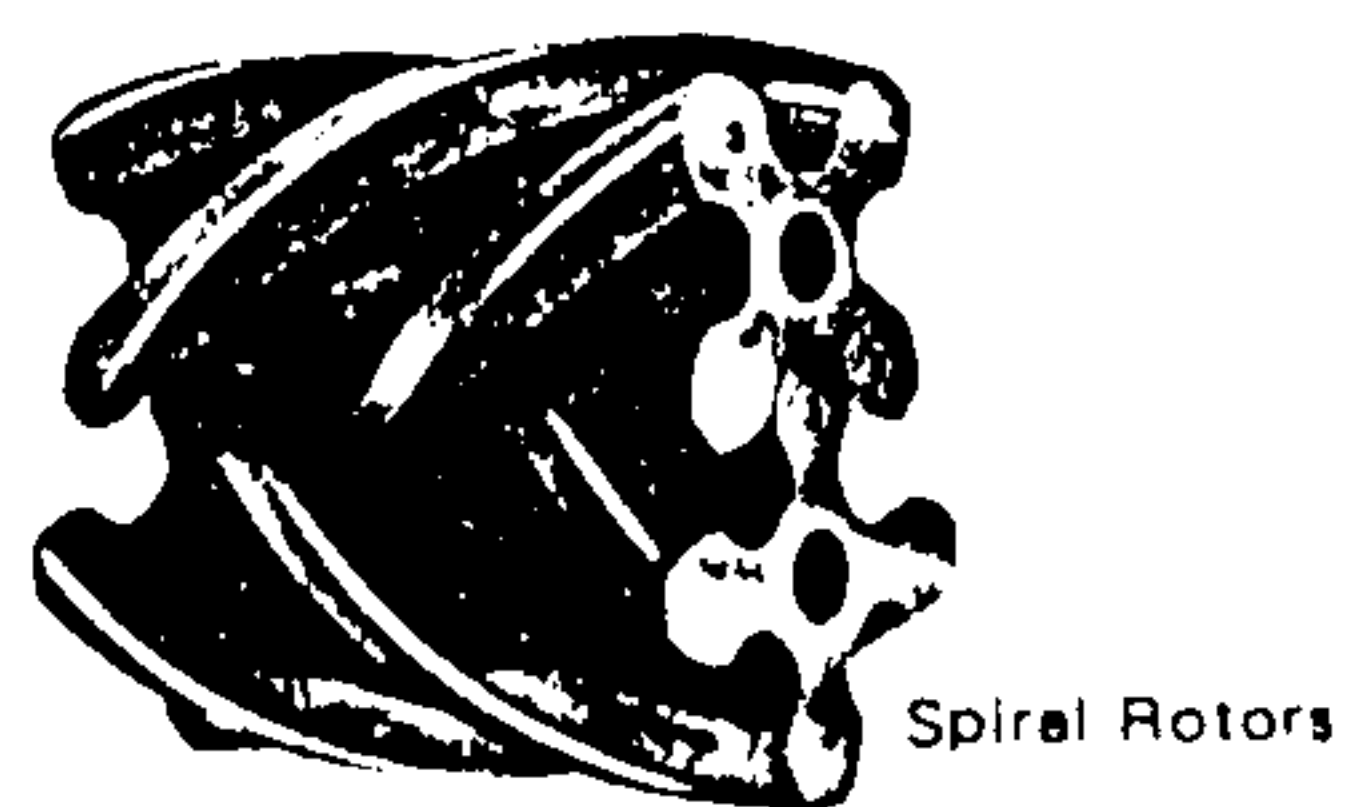
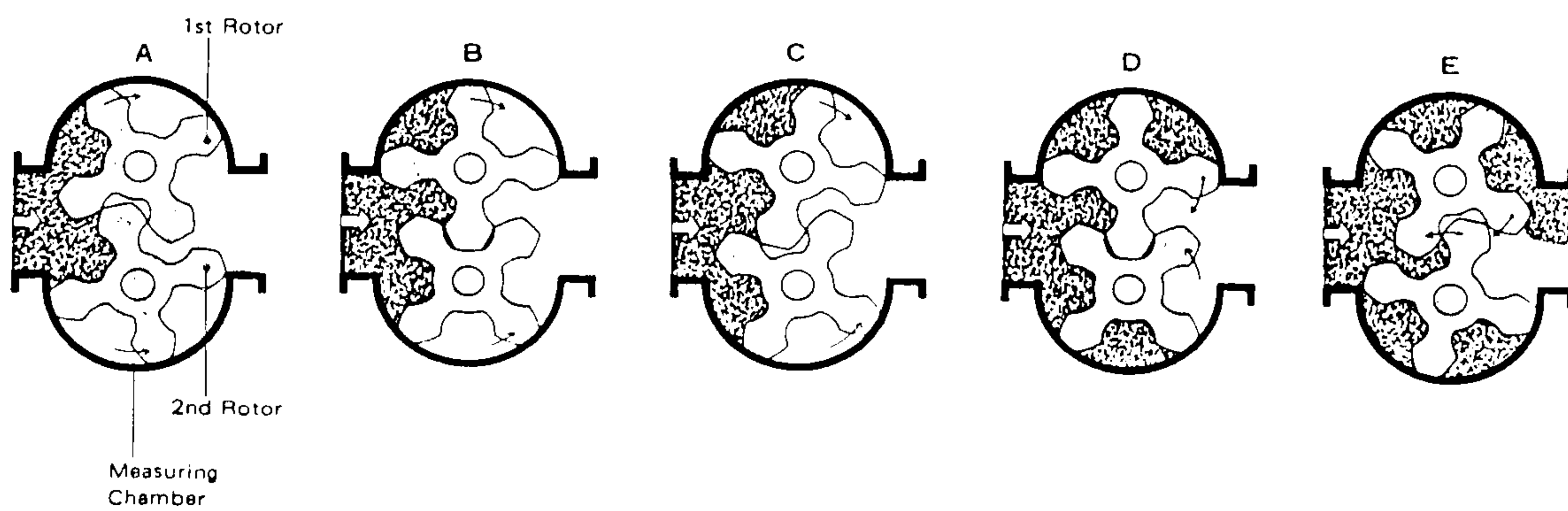
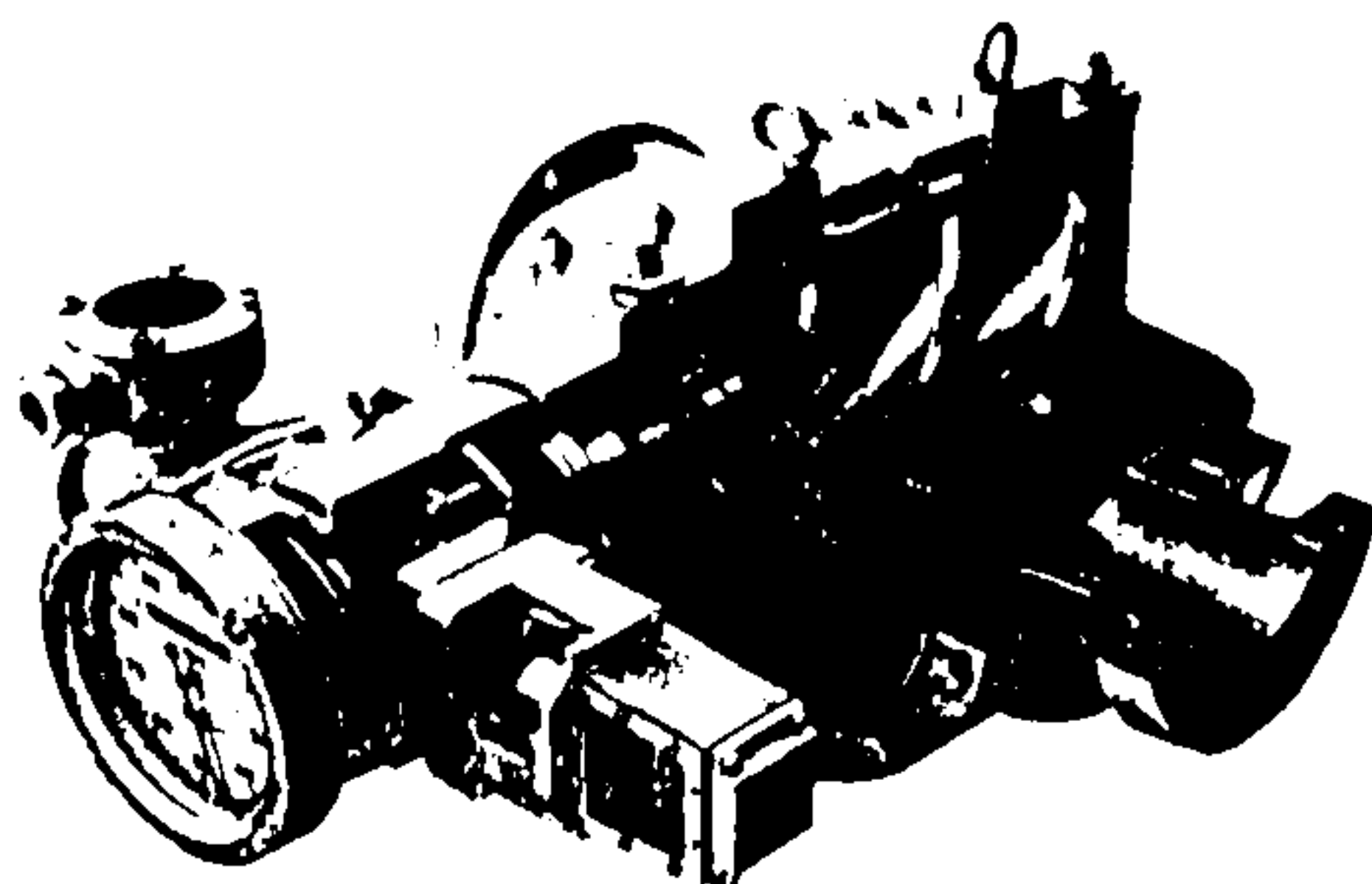
4. มาตรวัดชนิดเกียร์ (Gear Impeller)

- Helical Rotary

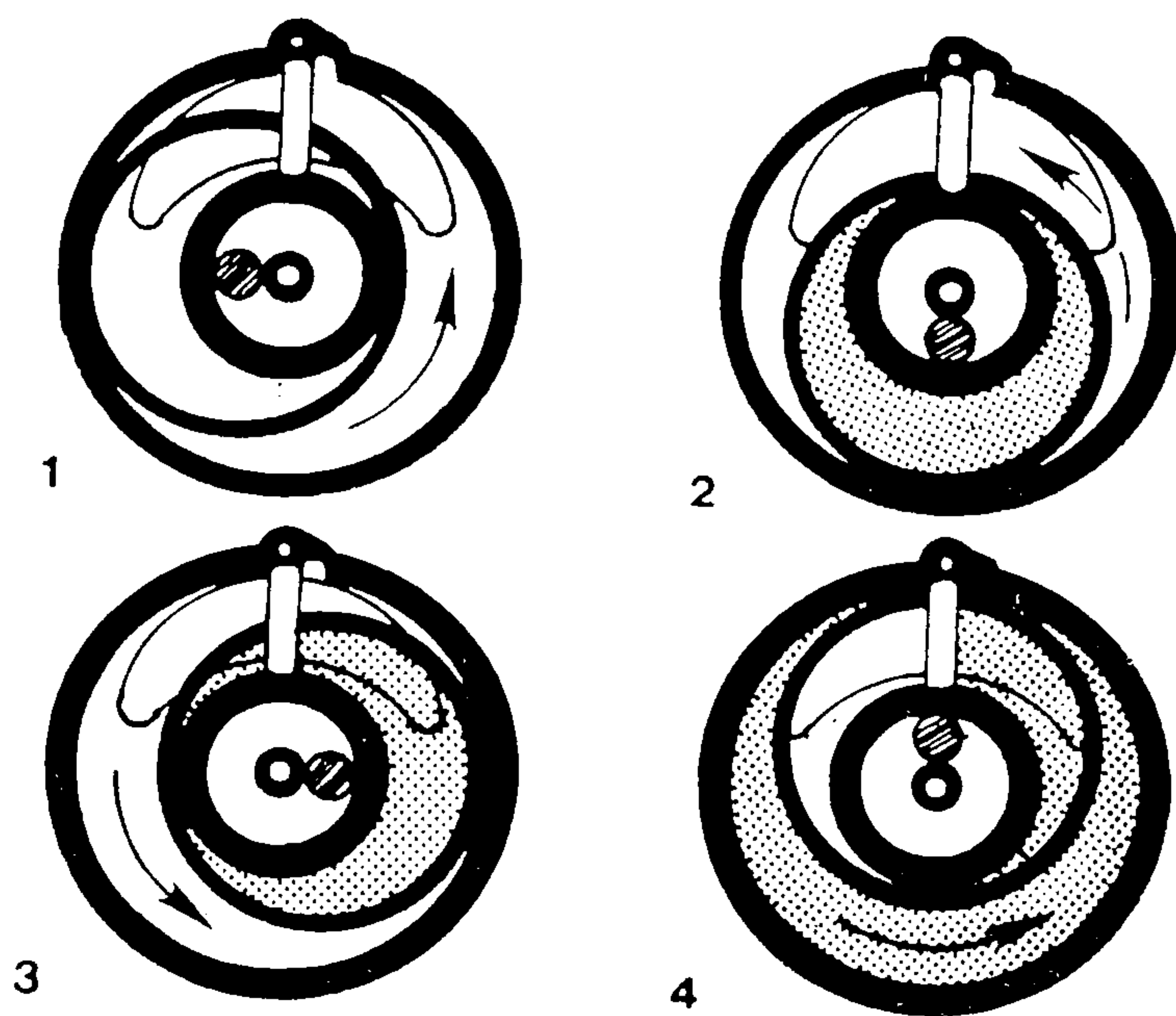
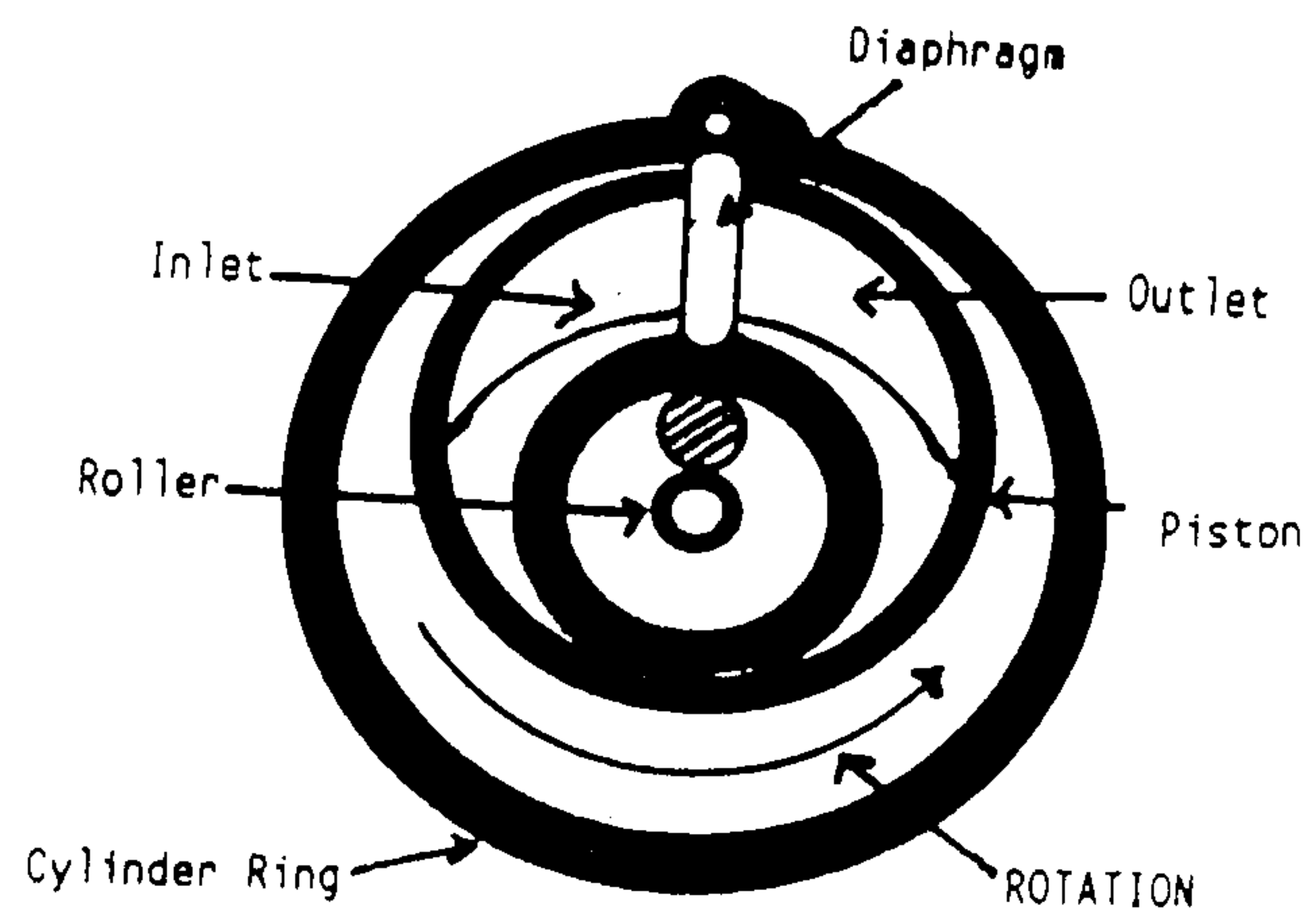
- **Oval Rotary** เป็นมาตรวัดที่วัดการไหลของเหลวได้แม่นยำสูง โดยใช้หลักการของความแตกต่างของความดัน (pressure differential) เพื่อหมุนเฟืองรูปวงรี (oval gear) 1 คู่ซึ่งขบกันอยู่ภายในห้องเครื่องวัด (measuring chamber) (ดูรูป 96) การที่เฟืองรูปวงรี (oval) ทั้ง 2 ขบกันอยู่เป็นการป้องกันการไหลของเหลวจากทางด้านเข้าผสมกับการไหลทางด้านออกอีกทั้งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความดันแตกต่างเกิดขึ้นระหว่างทางด้านเข้ากับทางด้านออกของมาตรวัด จากรูปจะเห็นว่าเฟือง B จะอยู่ในสถานะสมดุลคือความดันของเหลวกระทำต่อตัวเฟือง B ทั้ง 2 ด้านเท่ากัน แต่ในขณะที่



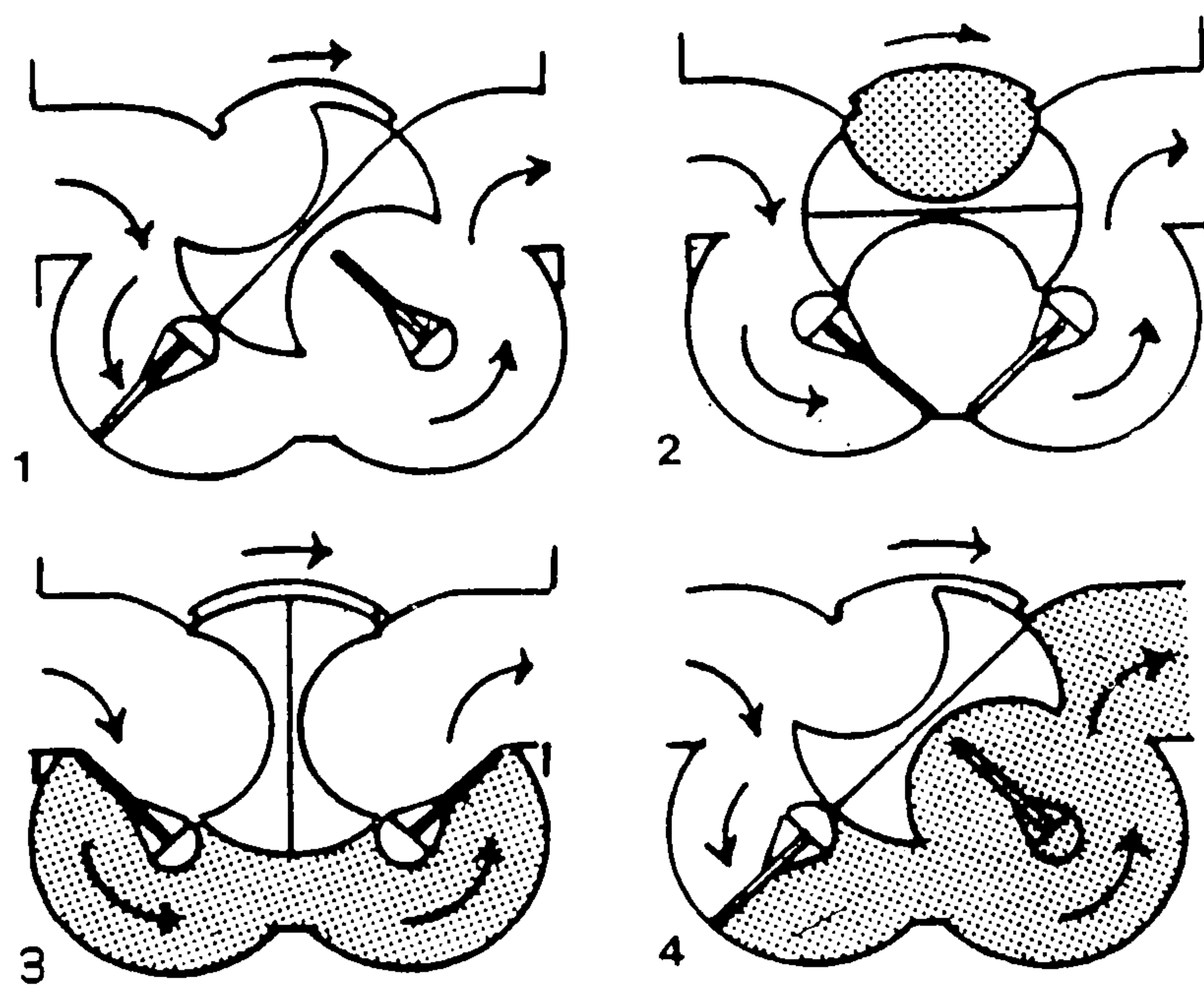
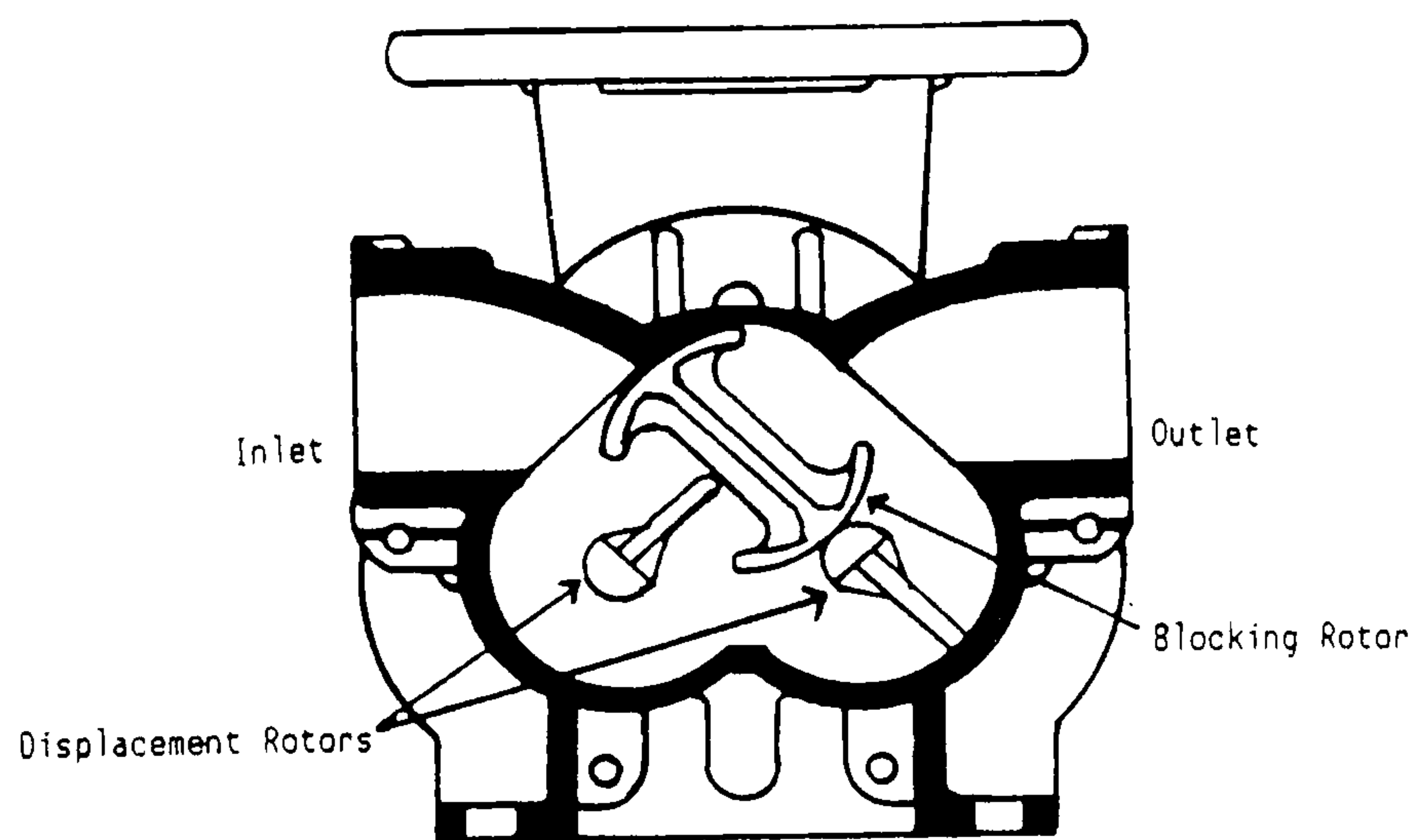
รูป ๑๖ แสดงมาตรวัดชนิด Oval Rotary รูปแบบต่างๆและลักษณะการทำงาน



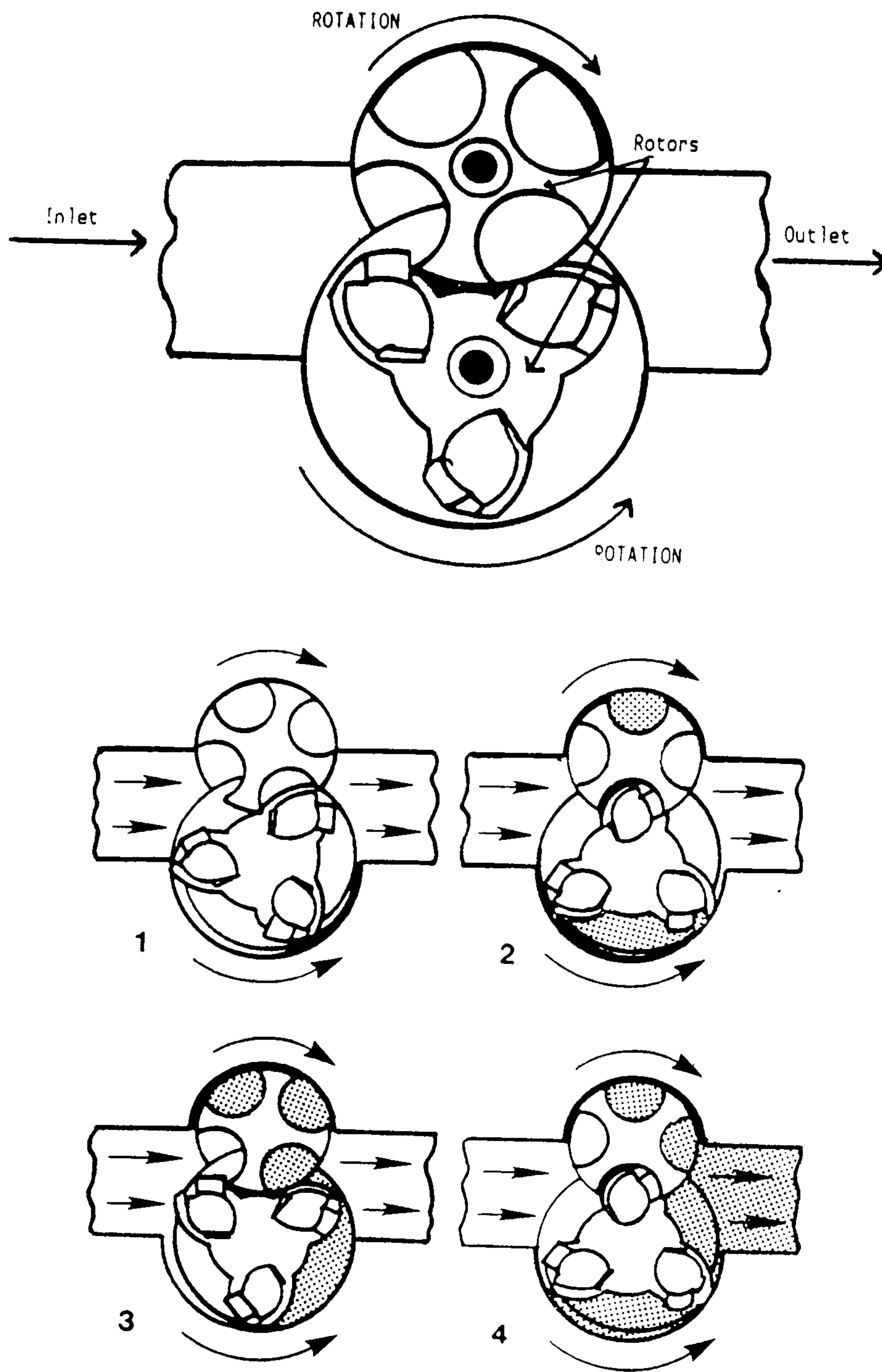
รูป 97 ลักษณะการทำงานของ Spiral Rotors



รูป ๑๘ ลักษณะการทำงานภายในห้องวัดมาตรวัดแบบลูกสูบสั่น (Oscillating Piston)

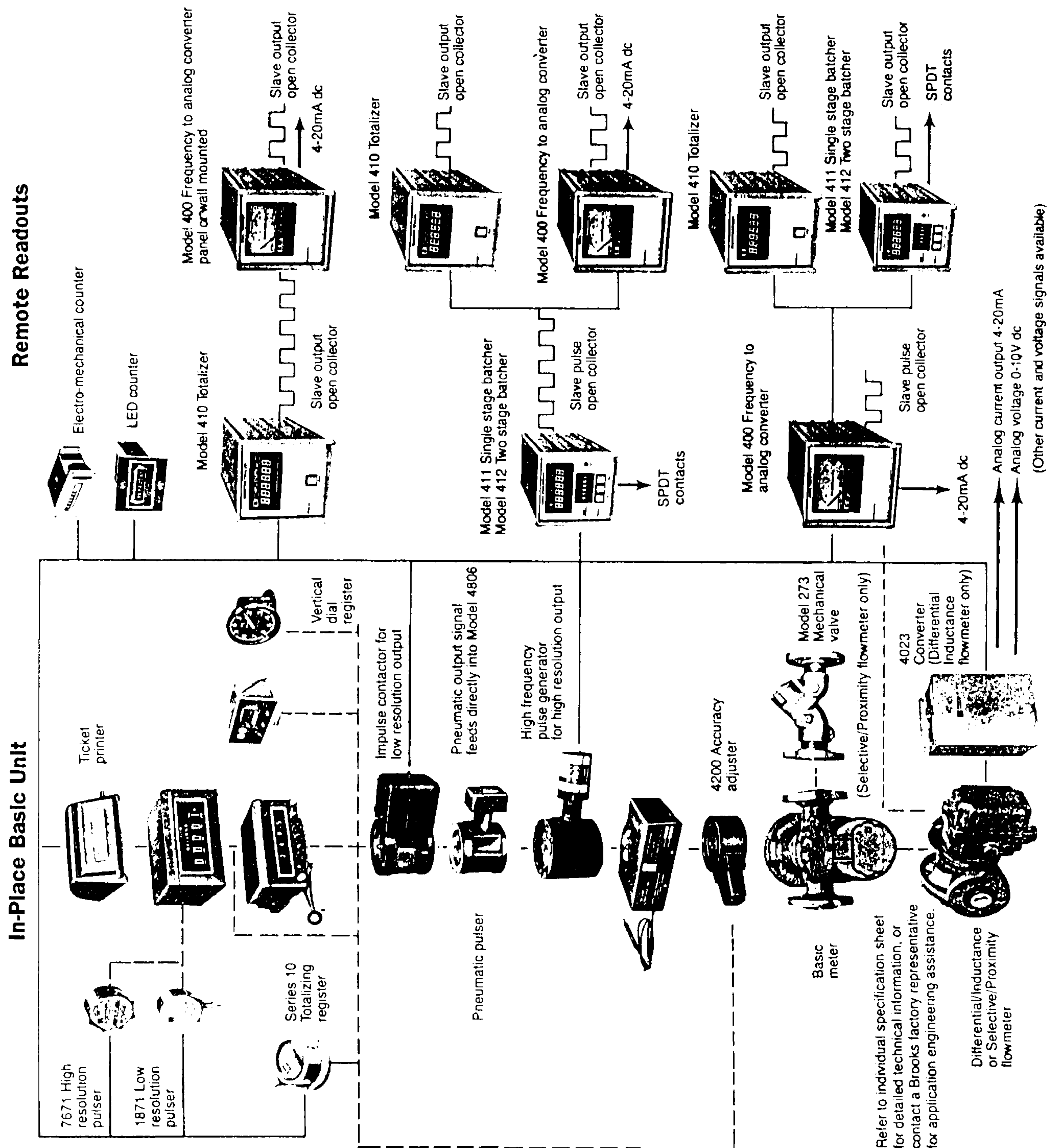


รูป 99 ลักษณะการทำงานภายในห้องวัดมาตรวัดแบบ Rotating Paddle



รูป 100 ลักษณะการทำงานภายในห้องวัดมาตรวัดแบบ BiRotor

Outputs and Readouts



รูป 101 ระบบอุปกรณ์ร่วมของมาตรวัด

เฟือง A ไม่ได้อยู่ในสถานะสมดุล ดังนั้นเฟือง A จะถูกผลักให้ไปหมุนเฟือง B จนกระทั่งเฟือง A ได้ อยู่ในสถานะสมดุลและที่ตำแหน่งนี้เฟือง B กลับไม่ได้อยู่ในสถานะสมดุลและเริ่มที่หมุนเพื่อขับเฟือง A ต่อไป เหตุการณ์ดังกล่าวนี้เกิดขึ้นสลับกันไปโดยที่ตลอดช่วงการหมุนจะเป็นไปอย่างราบเรียบ ด้วยแรงบิดเกือบจะคงที่ เมื่อเฟืองทั้งคู่หมุนไปจะเกิดจังหวะรับและส่งผ่านของเหลวสลับกันไป ตาม รูป 96 (ก) เป็นจังหวะที่เฟือง B ส่งผ่านของเหลวออกและเฟือง A รับของเหลวเข้าเต็มพร้อมที่จะส่ง ผ่านออกเมื่อเฟืองหมุนต่อไปก็จะเป็นจังหวะที่เฟือง A ส่งผ่านของเหลวออกและเฟือง B เริ่มที่จะรับ ของเหลวเข้า จนถึงช่วงจังหวะที่เฟือง B รับของเหลวเต็มพร้อมที่จะส่งผ่านออก จะเป็นเช่นนี้ ตลอดช่วงทำการวัด การที่เฟืองหมุนไปนั้นจะเป็นการกักของเหลวให้อยู่ในส่วนของห้องวัดปริมาตร (measuring chamber) ด้วยปริมาตรคงที่แน่นอน ดังนั้นการหมุนของเฟืองแต่ละรอบจะส่งผ่านของ เหลวไปได้ 4 ช่วงของปริมาตร (ช่องว่างระหว่างเฟืองกับเรือนมาตรวัด) ทั้งนี้อัตราการไหลของ เหลวจะเป็นสัดส่วนกับความเร็วการหมุนของเฟืองรูปตัววงรี

การที่ออกแบบตัวหมุนเป็นเฟืองขบกันเพื่อป้องกันการเลื่อน (slip) ของเฟืองรูปตัววงรี และเพื่อให้เป็นตัวกั้นระหว่างของเหลวทางด้านเข้าและด้านออกได้ดียิ่งขึ้น การวัดอัตราการไหลด้วย วิธีดังกล่าวนี้สามารถลดค่าผิดพลาดลงเหลือต่ำกว่า 0.5 % เท่านั้น นอกจากนี้พบว่าค่าความหนืดของ เหลวก็จะมีผลต่อการวัดอยู่บ้างโดยเฉพาะในช่วงอัตราการไหลต่ำๆ แต่อย่างไรก็ตามปริมาตรเล็ดลอด (slippage) ระหว่างเฟืองรูปตัววงรีกับผนังห้องวัดปริมาตร (measuring chamber wall) แทบจะมีค่าน้อย มากและที่สำคัญเฟืองดังกล่าวแทบจะไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความหนืด (viscosity) และ ความหล่อลื่น (lubricity) ของเหลว

ค่าความดันสูญเสีย (pressure loss) เนื่องจากมาตรวัด จะแปรเปลี่ยนไปตาม เปรอร์เซนส์ของอัตราการไหลและค่าความหนืดของเหลว ถ้าค่าความหนืดสูงจะมีค่าความดันสูญเสียสูง กว่าของเหลวที่มีค่าความหนืดต่ำ

การออกแบบและการสร้างมาตรวัด P.D.

การออกแบบและการสร้างสามารถแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มใหญ่

1. **ส่วนวัดปริมาตร (Measuring Element)** นับว่าเป็นหัวใจของส่วนทำงานของมาตรวัด ส่วนวัดปริมาตรจะเคลื่อนที่ภายในห้องเครื่องวัดทำหน้าที่แบ่งของเหลวออกเป็นส่วนๆด้วยความแม่นยำ เมื่อของเหลวไหลผ่านมาตรวัด กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ **โรเตอร์** ถึงแม้หลักการทำงานของส่วนวัด ปริมาตรค่อนข้างจะง่ายๆ แต่ก็มิใช่ว่าจะพิจารณาในการออกแบบชิ้นส่วนดังกล่าวต้องให้ความสนใจได้ว่า ปริมาณการวัดซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆที่แน่นอนโดยสามารถรู้ค่าได้ถูกต้องแน่ชัด รูปแบบและ ขอบเขตการออกแบบมีด้วยกันหลายประการด้วยกัน

- **การเชื่อมระหว่างส่วนวัดปริมาตรกับเรือนตัวนอกของมาตรวัด (Positive Metal-to-Metal Seal Between the Measuring Element and the Outer Housing)** เป็นวิธีการที่ชิ้นส่วน

โลหะประกบชิดกันด้วยความแน่นยำเพื่อให้แน่ใจว่าการไหลใดๆรอบส่วนภายในห้องวัดปริมาตรถูกกั้นไว้ให้ไม่รั่วไหลออกภายนอก วิธีการชิดด้วยการประกบกันของชิ้นส่วนโลหะ พบว่าบริเวณที่วิกฤตจะเกิดขึ้นระหว่างตัวเรือนภายนอก (outer housing) กับชิ้นส่วนภายใน (inner units) หากว่าการประกบกันระหว่าง 2 ชิ้นส่วนดังกล่าวนี้ไม่ได้ระดับและไม่ราบเรียบแล้วทำการติดยึดด้วยสกรูกับน็อต การบิดเบี้ยวก็อาจจะเกิดขึ้นได้ภายในตัวเรือนส่วนวัดปริมาตร (measuring element housing) ซึ่งมีผลกระทบต่อช่องว่างวิกฤต (critical clearances) ผลที่ตามมาก็คือความแน่นยำในการวัดรวมลดลง

- **ชิ้นส่วนทำงานวิกฤตมีมวลเพียงพอที่จะรักษาช่องว่าง (Sufficient Mass in Critical Components to Maintain Clearances)** ปกติแล้วชิ้นส่วนของมาตรวัดมักจะมี ความเค้น (stress) กระทำในระหว่างขบวนการผลิตและแน่นอนว่าจะมีโครงสร้างชิ้นส่วนหลายชิ้นส่วนด้วยกันซึ่งง่ายต่อการบิดเบี้ยวมากกว่าชิ้นส่วนอีกกลุ่มหนึ่ง ดังนั้นเมื่อนำชิ้นส่วนทั้งหมดมาประกอบรวมกันภายในมาตรวัดและในขณะเดียวกันก็ได้รับความร้อนและการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นเรื่องปกติที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในการติดตั้งมาตรวัด เมื่อนั้นชิ้นส่วนที่มีความเค้น (stress) ค้างอยู่ก็เริ่มที่จะระบายความเค้น (stress relieved) ปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้ช่องว่างวิกฤต (critical clearances) เริ่มที่จะเปลี่ยนแปลงและความแน่นยำของมาตรวัดจะได้รับผลกระทบทันที ดังนั้นวิธีการที่ดีที่สุดที่จะเอาชนะผลกระทบของการบิดเบี้ยวโลหะ (adverse effects of metal distortion) ต้องทำให้ชิ้นส่วนมาตรวัดวิกฤต (critical parts) คายความเค้น (stress relieve) ก่อนที่จะนำมาประกอบเข้าภายในมาตรวัดเพื่อให้แน่ใจว่าชิ้นส่วนดังกล่าวมีมวลเพียงพอที่จะต้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากมีความเฉื่อยในตัวตามมวลอีกทั้งยังคงรักษาช่องว่างที่ต้องการ

- **จำนวนน้อยที่สุดของช่องว่างวิกฤต (Minimal Number of Critical Clearances)** พบว่าการไหลเล็ดลอด (slippage) ผ่านช่องว่างของเหลวจะเป็นสัดส่วนยกกำลัง 3 ของช่องว่าง เช่นถ้าช่องว่างเพิ่มเป็น 2 เท่า การไหลเล็ดลอดจะเพิ่มขึ้นเป็น 8 เท่าของการไหลเล็ดลอดเดิม ด้วยเหตุนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญมากที่จะรักษาช่องว่างวิกฤต (critical clearance) ขณะทำการลดจำนวนทั้งหมดของช่องว่างที่มี ดังนั้นในการออกแบบมาตรวัดใดๆที่พยายามลดจำนวนช่องว่างของชิ้นส่วนหรือจำนวนของเส้นทางการไหลของเหลวผ่านมาตรวัดให้น้อยที่สุดมาตรวัดดังกล่าวก็จะมี การไหลเล็ดลอดในระดับจำนวนน้อยๆ

- **โรเตอร์แบบกลวงกับไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่ไปลดพื้นที่สถิตย์ (Hollow Rotor with No Moving Parts Minimizes Static Areas)** เมื่อของเหลวซึ่งไหลด้วยความเร็วสูงไหลเข้าสู่ภายในช่องว่าง (cavity) ของมาตรวัดจะมีการสูญเสียความเร็วการไหลลดลงทันที อนุภาคที่แผ่มา กับของเหลวเริ่มมีการตกตะกอนทำให้เกิดบริเวณพื้นที่อนุภาคเหล่านี้สะสมตัวซึ่งถ้าหากพื้นที่ดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีชิ้นส่วนวิกฤต (critical parts) ของมาตรวัดทำงานอยู่ก็จะเกิดความเสียหายกับมาตรวัดได้ ดังนั้นการออกแบบมาตรวัดจึงพยายามแยกส่วนเคลื่อนที่ของมาตรวัดออกจากบริเวณพื้นที่สถิตย์ (static area) ทำให้มาตรวัดยังคงรักษาความแน่นยำในการวัดอยู่ได้

2. ห้องเครื่องวัด (Measuring Chamber) ภายในห้องเครื่องวัดนี้จะบรรจุด้วยส่วนวัด ปริมาตรของเหลว (measuring element) ของมาตรวัด ขนาดและวัสดุของห้องเครื่องวัดแตกต่างกัน ตามแต่การนำไปใช้งานวัดปริมาตร วัสดุที่ใช้ทำมาตรวัดสามารถเปลี่ยนแปลงได้เพื่อให้แน่ใจว่า สามารถใช้กับของเหลวที่ต้องการวัดว่าไม่มีผลกระทบทั้งโดยตรงและโดยอ้อม ในเรื่องของความหนา ของผนังห้องเครื่องวัดก็สามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้เช่นเดียวกันแต่ต้องแน่ใจว่าสามารถทนต่อความดัน ทำงาน (operating pressure) สำหรับทางเข้า - ออกมาตรวัดอาจเป็นหน้าแปลน (flange) หรือเกลียว (thread) โดยปกติแล้วมาตรวัดชนิดนี้มีขนาดตั้งแต่ 1/4 นิ้ว จนถึง 16 นิ้ว

หน้าที่ของห้องเครื่องวัดขึ้นอยู่กับชนิดของห้องเครื่องวัดว่าเป็นชนิดตัวเรือนชั้นเดียว (single case) หรือตัวเรือน 2 ชั้น (double case) ในกรณีมาตรวัดชนิดตัวเรือนชั้นเดียว (single case meters) ผนังที่ตำแหน่งเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของตัวเรือนมาตรวัดจะทำหน้าที่เป็นผนังของส่วนวัดปริมาตร โดยปกติแล้วมาตรวัดชนิดตัวเรือนชั้นเดียวจะมีขนาดไม่เกิน 6 นิ้ว สำหรับมาตรวัดชนิดตัวเรือน 2 ชั้น (double case meters) จะแยกห้องเครื่องวัดล้อมรอบส่วนวัดปริมาตรออกอย่างอิสระสมบูรณ์ ทั้งนี้ เหตุผลที่ทำการออกแบบมาตรวัดเป็นผนัง 2 ชั้นก็เพื่อวัตถุประสงค์หลัก 2 อย่างด้วยกันคือ

- **ความสมดุลย์ความดัน (pressure balance)** เมื่อความดันกระทำต่อผนังของห้อง เครื่องวัดเกิดสมดุล การบิดเบี้ยวซึ่งเกิดจากความดัน (pressure-generated distortion) ของชิ้นส่วน ภายในห้องเครื่องวัดจะถูกทำให้หายไป ซึ่งถ้าหากการบิดเบี้ยวดังกล่าวเกิดขึ้นจะมีผลกระทบต่อช่องว่างวิกฤต (critical clearance) ภายในมาตรวัด ความแม่นยำการวัดของมาตรวัดย่อมเปลี่ยนแปลงทันที
- **การลดความเค้น (stress absorption)** ปกติระบบท่อซึ่งเป็นตัวส่งผ่านของเหลวก็มี ความเค้น (stress) ซึ่งเกิดจากหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น การขยายตัวของท่อเนื่องจากความร้อนจากแสงแดด เป็นต้น เมื่อติดตั้งมาตรวัดเข้ากับระบบท่อดังกล่าวหากมาตรวัดมีตัวเรือนชนิด 2 ชั้น (double case) ตัวเรือนภายนอกสุดจะเป็นตัวรองรับและลดความเค้นซึ่งส่งผ่านมาจากตัวท่อดังกล่าวไม่ให้ส่งผล ไปยังตัวเรือนชั้นในซึ่งเป็นห้องเครื่องวัดของส่วนวัดปริมาตร ด้วยเหตุนี้ช่องว่างวิกฤต (critical clearance) จึงยังคงมีค่าคงที่ไม่ว่าความดันภายในระบบท่อจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร

3. ชุดเกียร์ขับเคลื่อน (Counter Drive Gear Train) โดยส่วนใหญ่แล้วกลไกการนับหรือ การบันทึกของมาตรวัดจะถูกขับเคลื่อนจากส่วนวัดปริมาตรของเหลวของมาตรวัด (measuring element) หรือ โรเตอร์ (rotor) นั้นเอง ด้วยการใช้ชุดเฟืองทด (gear train) ดังนั้นเมื่อเพลลาของโรเตอร์ มาตรวัดหรือส่วนวัดปริมาตรของเหลวหมุนจะไปขับให้เกียร์นับหรือเครื่องบันทึกแสดงผลปริมาตรของ เหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดได้ที่หน้าปัดโดยตรง

แต่ในปัจจุบันสามารถต่อเข้ากับระบบดิจิทัลได้โดยตรง ถ้าเราติดตั้งเครื่องกำเนิดสัญญาณ ไฟฟ้าเป็นพัลส์ (pulse) ให้ผลิตสัญญาณตามจำนวนรอบการหมุนดังนั้นหากต้องการหาปริมาตรรวมทั้ง หมดจะได้ว่า

$$Q = K.n$$

เมื่อ Q = ปริมาตรทั้งหมดที่ไหลผ่านมาตรวัด
 K = ค่าคงที่
 n = จำนวนพัลส์ที่วัดได้
 แต่หากต้องการทราบค่าอัตราการไหล (flowrate)

$$Flow = C_F \frac{n_0}{T}$$

เมื่อ C_F = ค่าคงที่
 n_0 = จำนวนพัลส์ (pulse) ที่วัดได้ใน 1 หน่วยเวลา T

4. ตัวปรับความเที่ยงตรง (Calibrator Adjuster) จากหลักการทำงานของ displacement meter ซึ่งได้รับการออกแบบเพื่อแสดงปริมาตรที่แน่นอนค่าหนึ่งในแต่ละสิ้นสุดรอบการหมุน 360° ของโรเตอร์หรือส่วนที่เคลื่อนที่ของมาตรวัด แต่เมื่อพิจารณาจากค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้เนื่องจากการผลิตมาตรวัดจากโรงงานและการสึกหรอของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ของมาตรวัด รวมทั้งตัวเรือนมาตรวัด ระหว่างทำการวัดของเหลว อีกทั้งพบว่าช่องว่าง (clearance) ระหว่างตัวเรือนกับชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ของมาตรวัดก็ไม่มีค่าคงที่และจะเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงอายุการใช้งาน ด้วยเหตุนี้ปริมาตรที่แน่นอนค่าหนึ่งที่ได้ทำการออกแบบไว้ในแต่ละสิ้นสุดรอบการหมุน 360° ของโรเตอร์จึงมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ เพราะมีปริมาตรบางส่วนที่เล็ดลอดออกจากปริมาตรที่ถูกแบ่งออกเป็นส่วนๆที่มีค่าแน่นอน โดยปริมาตรส่วนดังกล่าวไม่ได้รับการบันทึกจากเครื่องนับหรือเครื่องบันทึกของมาตรวัด

ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นที่ต้องให้ได้ปริมาตรแน่นอนค่าหนึ่งที่ได้ออกแบบและได้เปลี่ยนแปลงไปจะต้องมีค่าเดียวกับปริมาตรของเหลวจริงที่ไหลผ่านมาตรวัด พุดัง่ายๆก็คือผลการแสดงค่าปริมาตรของมาตรวัดมีค่าใกล้เคียงมากที่สุดเท่าที่จะทำได้เมื่อเทียบกับปริมาตรจริงๆที่ผ่านมาตรวัดโดยทำการปรับอัตราส่วนของอัตราการหมุนของกลไกของเครื่องนับให้มีความสัมพันธ์กับอัตราการหมุนของโรเตอร์หากจำเป็นต้องกระทำ การหาความสัมพันธ์ดังกล่าวกระทำได้โดยหาความสัมพันธ์ของปริมาตรจริงๆที่ผ่านมาตรวัดระหว่างทำการสอบเทียบกับค่าที่อ่านได้จากเครื่องนับหรือเครื่องบันทึก การปรับอัตราส่วนของอัตราการหมุนระหว่างกลไกของเครื่องนับกับโรเตอร์กระทำได้โดยใช้ชุดเฟืองที่เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนทดได้ ซึ่งเรียกว่า ตัวปรับความเที่ยง (calibrator) เมื่อใส่ชุดเฟืองเกียร์ดังกล่าวระหว่างเพลาทงออกของมาตรวัด (meter input shaft) กับ เพลาทงเข้าเครื่องนับ (counter input shaft) ด้วยเหตุนี้แต่ละรอบการหมุนของ เพลาทงเข้าเครื่องนับอาจจะถูกเร่งหรือหน่วงให้หมุนมีความสัมพันธ์กับเพลาทงออกของมาตรวัด ดังนั้นตัวปรับความเที่ยงจึงไม่ได้ทำให้ปริมาตรของเหลวที่ผ่าน

มาตรวัดต่อการหมุนเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใดเพียงแค่แก้ไขค่าปริมาตรที่แสดงโดยเครื่องบันทึกค่าของมาตรวัดหรือเครื่องนับแสดงหรือบันทึกค่าปริมาตรเท่ากับค่าปริมาตรของเหลวที่ผ่านมาตรวัดหรือค่าใกล้เคียงค่าหนึ่ง

นอกจากนี้ยังขึ้นกับขนาดของมาตรวัด เนื่องจากปริมาตรของเหลวที่ไหลผ่านมาตรวัดอาจจะเปลี่ยนแปลงระหว่าง 10 ถึง 100 ลิตร ต่อรอบการหมุน ดังนั้นหากปริมาตรของเหลวต่อการหมุนของมาตรวัดมีค่าสูง โอกาสที่เกิดการผิดพลาดในปริมาตรรวมก็ยังมีค่าสูงมาก

ตัวปรับความเที่ยงนี้โดยปกติแล้วสามารถทำการปรับค่าการวัดของมาตรวัดได้ภายในช่วงแคบๆ ประมาณ 10% แต่ก็มีตัวปรับความเที่ยงบางตัวสามารถปรับค่าเป็นเชิงเส้นได้ตลอดทั้งรอบหรือคาบการหมุนของโรเตอร์

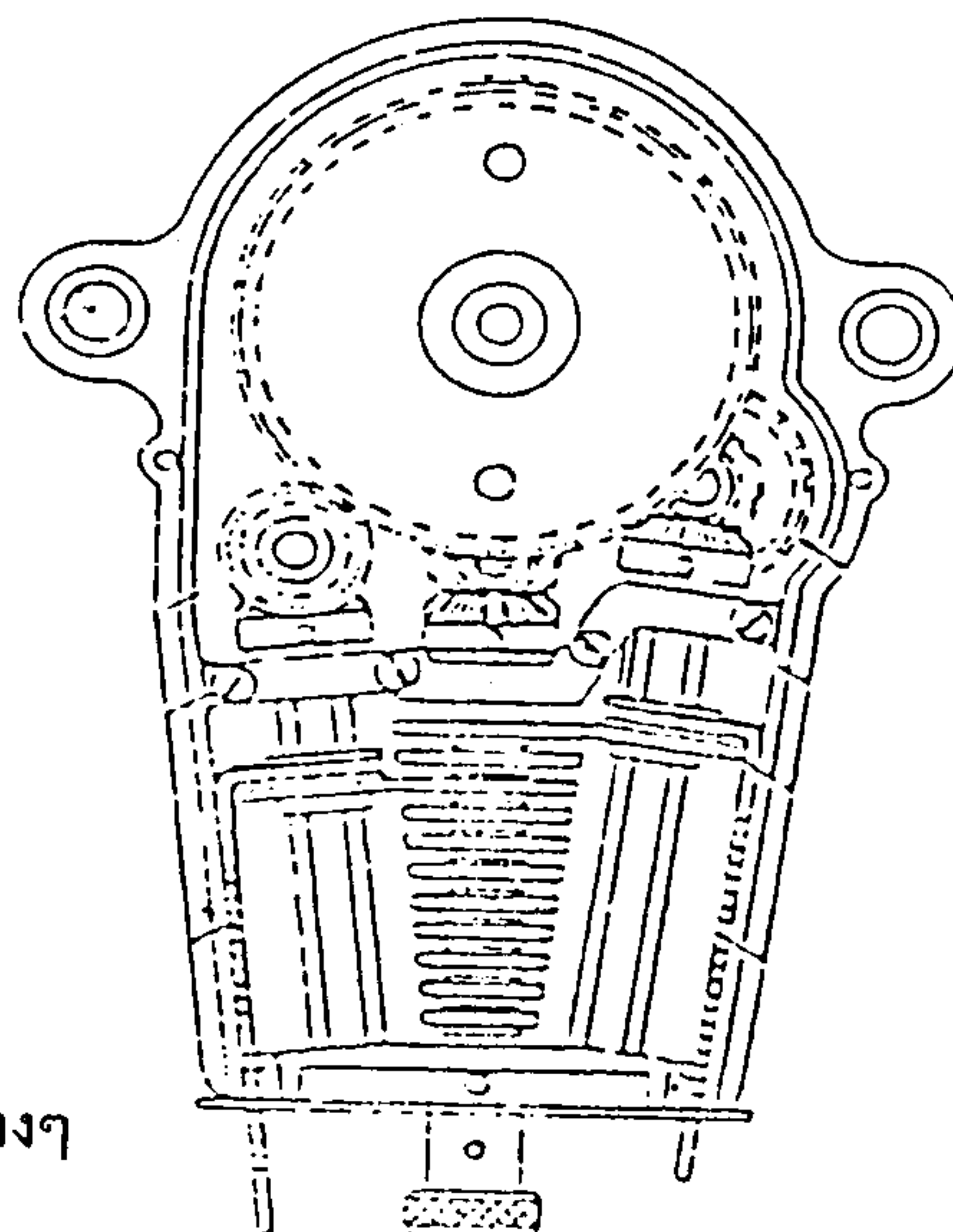
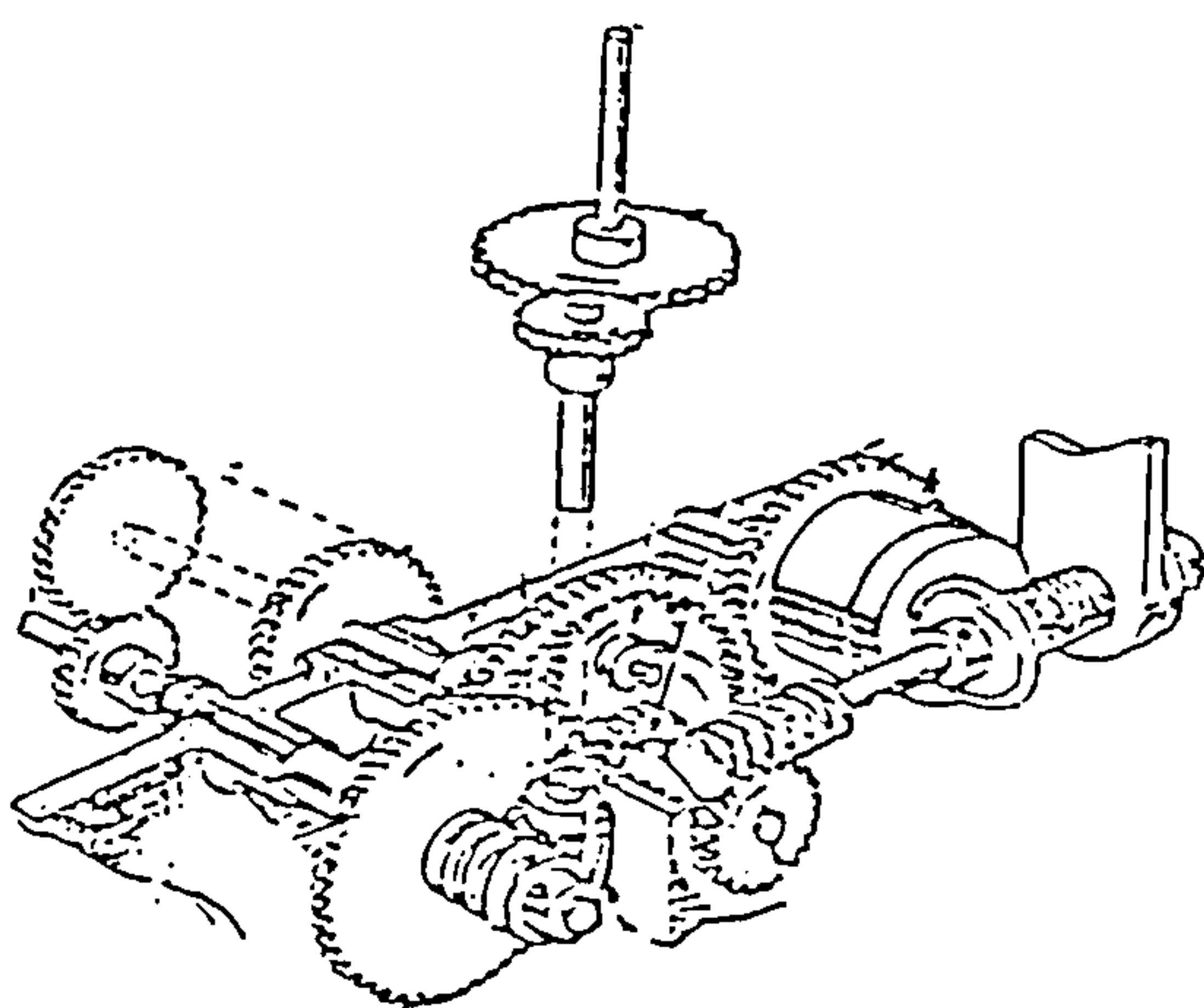
ตัวปรับความเที่ยง (calibrator) ซึ่งมีด้วยกันหลายชนิด และแต่ละชนิดก็มีข้อดี ข้อเสีย และข้อจำกัดที่แตกต่างกัน

- *Slipping Clutch Calibrators* ตัวปรับความเที่ยงชนิดนี้ประกอบด้วย clutch plates จำนวน 2 แผ่น และจุดหมุนเยื้องศูนย์กลาง (eccentric pivot) สามารถใช้ตัวปรับความเที่ยงปรับอัตราการขับเคลื่อนระหว่างโรเตอร์ของมาตรวัดกับเครื่องนับของมาตรวัดได้ภายในช่วง 0 ถึง +11% เนื่องจากตัวปรับความเที่ยงชนิดนี้ใช้การแก้ไขค่าด้วยกลไกซึ่งต่อจากด้านปลายของเพลารอเตอร์ในแต่ละรอบการหมุนโรเตอร์ (360°) ด้วยการเร่งหรือหน่วงการหมุนของเพลารอเตอร์ ด้วยเหตุนี้ปริมาตรของเหลวที่แสดงโดยมาตรวัดจะได้รับการปรับค่าทุกครั้งทีปริมาตรของเหลวไหลผ่านมาตรวัด เมื่อเสร็จสิ้นการหมุนจำนวน 1 รอบ และปริมาตรทั้งหมดจะได้เท่ากับจำนวนเท่าของปริมาตรที่ของแต่ละรอบการหมุนโรเตอร์ (ดูรูป 102)

CALIBRATORS

planetary gears

cone gears

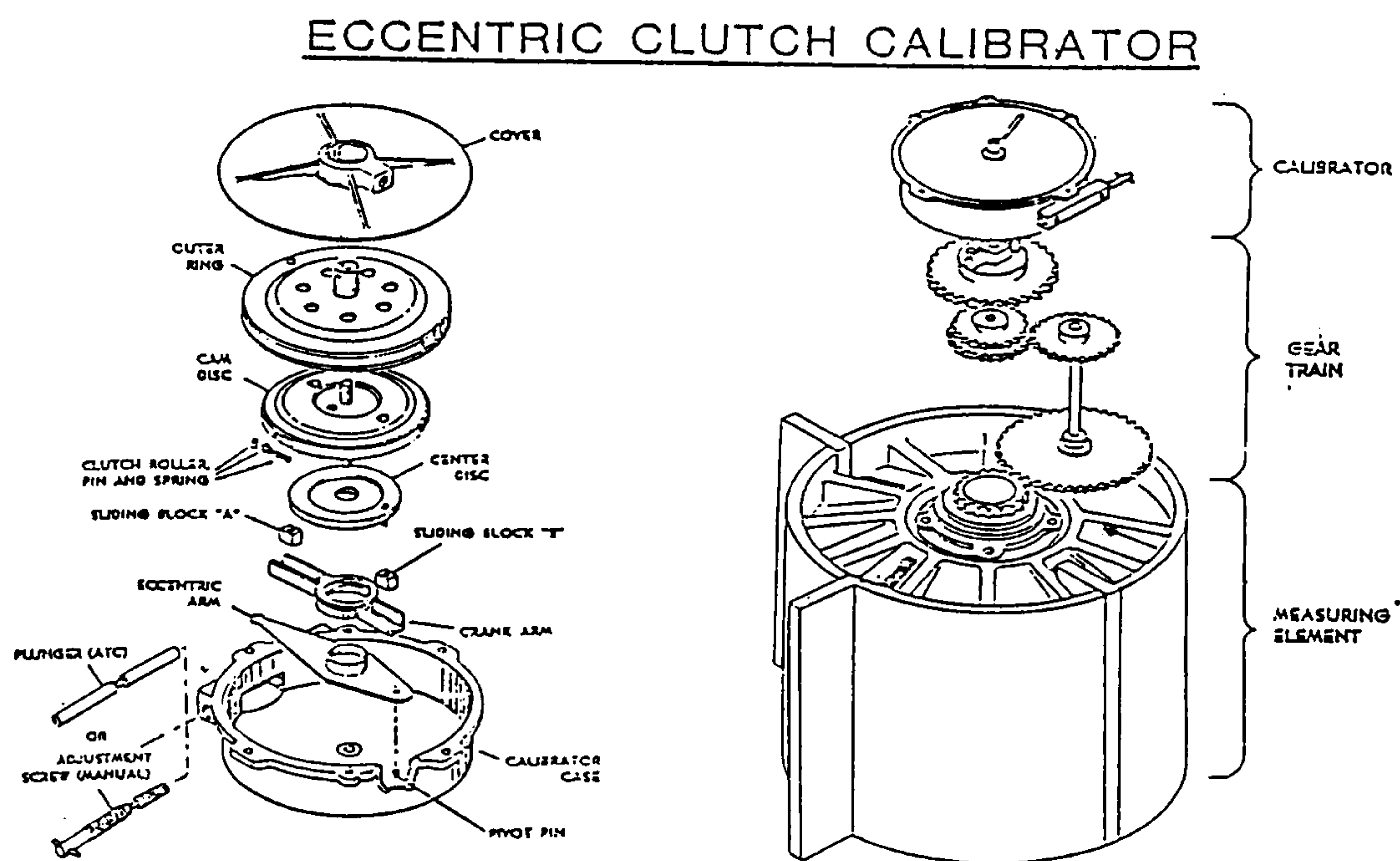


รูป 102 แสดงกลไกการทำงานของตัวปรับความเที่ยงชนิดต่างๆ

1. Planetary Gears

2. Cone Gears

- **Friction-driven Planetary Gear Calibrators** ในทางทฤษฎีไม่ว่าจะเป็นสัดส่วนการทดเพิ่มขึ้น (บวก) หรือสัดส่วนการทดลดลง (ลบ) ตัวปรับความเที่ยงชนิดนี้ก็ยังต้องใช้ปรับค่าด้วยสัดส่วนการทดการหมุนของเพลาคับโรเตอร์ด้วยค่าคงที่ แต่อย่างไรก็ตามตัวปรับความเที่ยงชนิดนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับความเสียดทานของการจับเพลาสอดคล้องไปยังเครื่องนับและอีกทั้งการเลื่อน (slippage) ก็มักจะเกิดขึ้นและเป็นปัญหาทำให้เครื่องนับหรือเครื่องบันทึกค่าคือให้ค่าความสามารถทำซ้ำได้ (repeatability) และความแม่นยำน้อยลงไป จึงมักจะมีปัญหาในทางปฏิบัติ (ดูรูป 102)



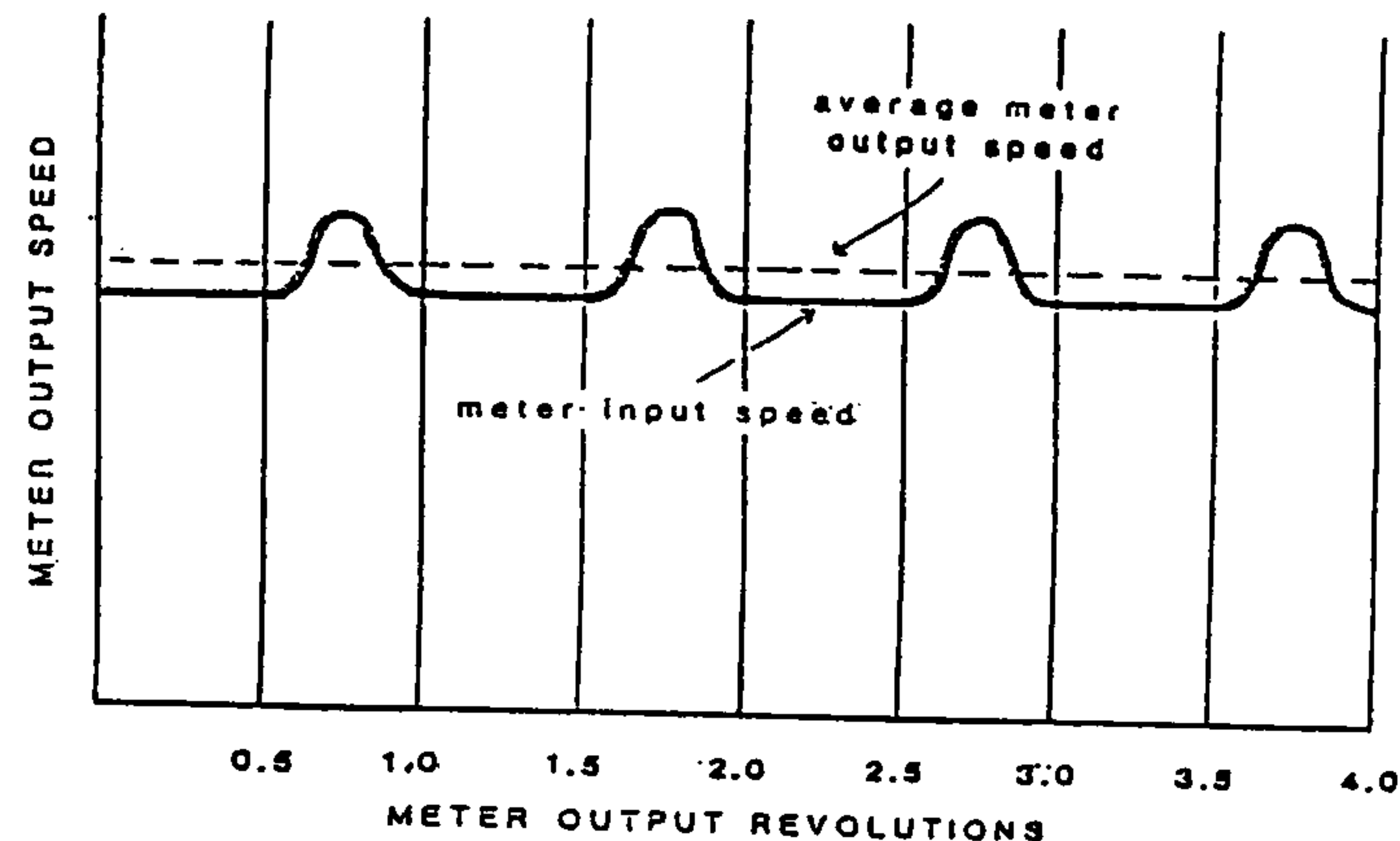
รูป 102 แสดงกลไกการทำงานของตัวปรับความเที่ยงชนิดต่างๆ

1. Planetary Gears
2. Cone Gears
3. Eccentric Clutch Calibrator

- **Change-gear and Cone-gear Calibrators** ตัวปรับความเที่ยงชนิดนี้จะมีชุดขับเคลื่อนอยู่ระหว่างโรเตอร์และเครื่องนับ เป็นตัวปรับความเที่ยงที่ได้รับการพัฒนาจากตัวปรับความเที่ยงชนิดที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ซึ่งมีลักษณะการทำงานขึ้นอยู่กับความเสียดทานของกลไก แต่อย่างไร

ก็ตามตัวปรับความเที่ยงชนิดนี้สามารถปรับค่าได้เพียงเฉพาะจุดของการทดค่าที่มีค่าแน่นอนลงตัวแต่ละค่าเรียงกันเป็นชุด จึงเป็นการยากมากที่จะปรับตัวปรับความเที่ยงให้แสดงค่าปริมาณของเหลวเท่ากับปริมาณจริงๆที่ผ่านมาตรวัดอย่างแน่นอน (ดูรูป 102)

ECCENTRIC CLUTCH CALIBRATOR (A.O. SMITH)

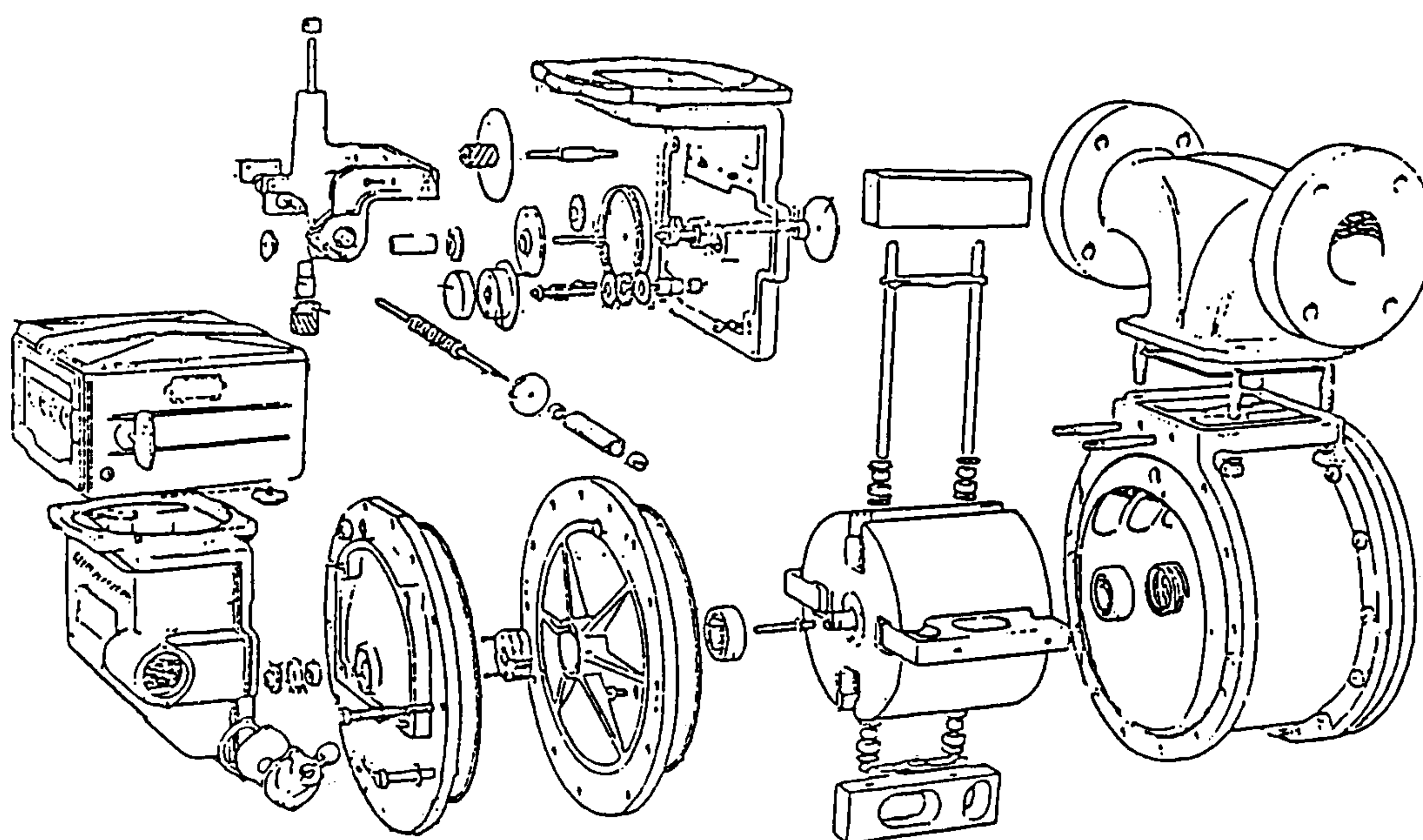


รูป 102 (ต่อ)

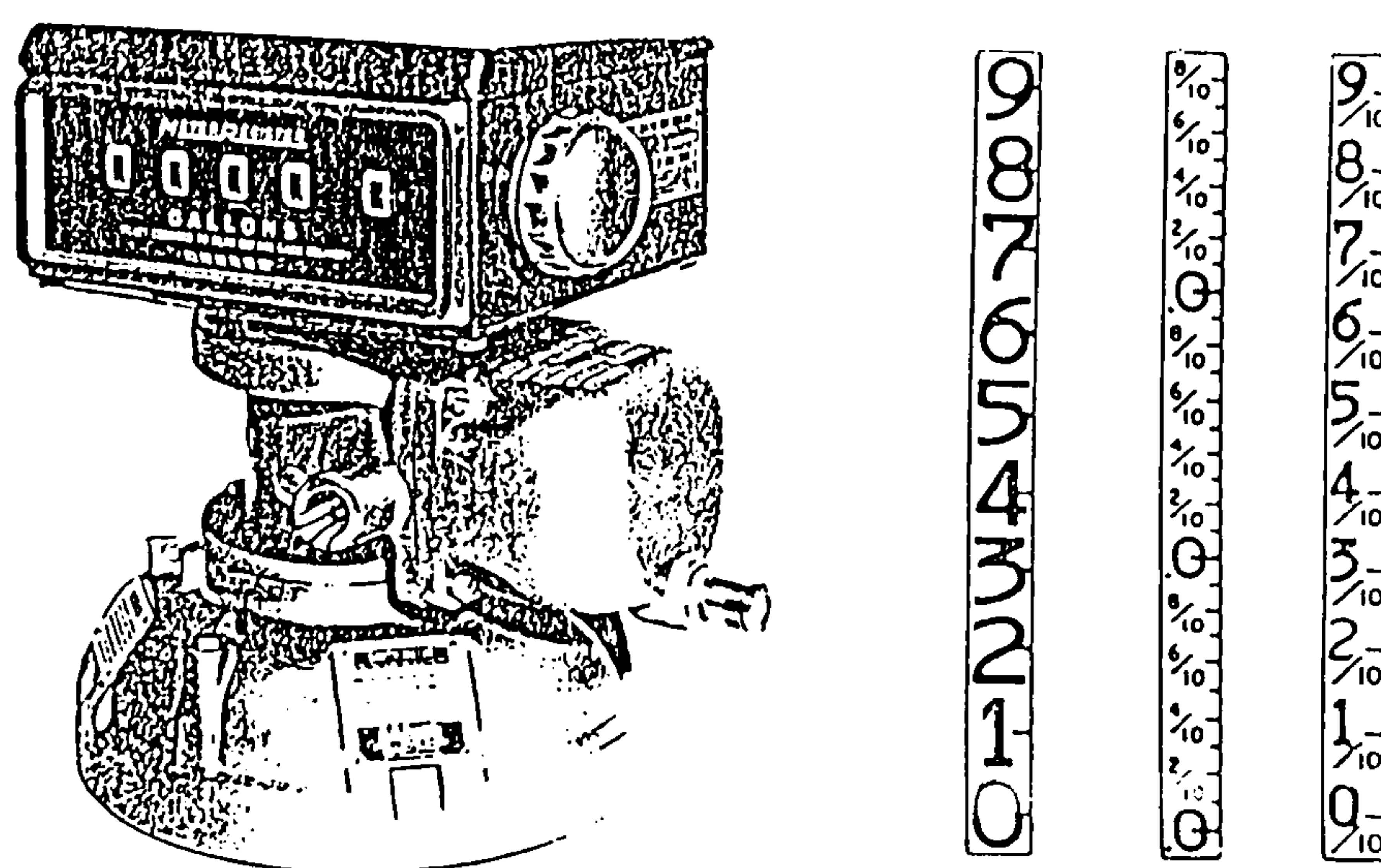
ข้อสังเกตในการใช้ตัวปรับความเที่ยงของ master meter หรือ reference meter พบว่าจะไม่ค่อยยอมรับการขับของตัวปรับความเที่ยง (calibrator) ซึ่งมีลักษณะการทำงานที่ขึ้นอยู่กับความเสียดทานของกลไกแทนที่จะใช้การต่อทางกลไกโดยตรง หรือแม้แต่วัฏจักรซึ่งเป็นแบบ epicycle ก็ต้องคอยหมั่นสังเกตเอาใจใส่ให้มากด้วยเช่นกัน

5. **เครื่องนับหรือเครื่องบันทึก (Counter or Register)** เครื่องนับและเครื่องบันทึกจะทำหน้าที่บันทึกการเคลื่อนที่ของส่วนวัดปริมาตร พบว่า displacement meter ส่วนใหญ่จะใช้กลไกซึ่งต่อจากการเคลื่อนที่ของส่วนวัดปริมาตรในการขับเครื่องนับหรือเครื่องบันทึกเพื่อให้เห็นค่าปริมาณของเหลวซึ่งไหลผ่านมาตรวัด ณ.ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันของท่อ การแสดงค่าของเครื่องนับหรือเครื่องบันทึกซึ่งถูกขับด้วยชุดเกียร์อาจจะเป็นค่าหน่วยปริมาตรใดๆ ในกรณีที่ต้องการความละเอียด (resolution) ในการอ่านค่าสูงสุด เช่นให้แสดงค่าเป็นหน่วยลิตร จึงเห็นได้ชัดเจนว่าที่อัตราการไหลค่าหนึ่งหากเครื่องนับหรือเครื่องบันทึกที่ต้องการแสดงค่าหน่วยละเอียดมากที่สุดมีค่าเป็นลิตร ชุดเกียร์จะต้องหมุนด้วยจำนวนรอบเร็วกว่าเครื่องนับหรือเครื่องบันทึกที่แสดงค่าละเอียดสูงสุดมีค่า 10 ลิตร เป็น 10 เท่า ด้วยเหตุนี้การที่ชุดเกียร์ของเครื่องนับหรือเครื่องบันทึกหมุนด้วยความเร็วรอบสูงๆ จึงอาจก่อให้เกิดเป็นปัญหาขึ้นได้ จำเป็นต้องกำหนดรอบอัตราการหมุนสูงสุด (maximum rating in rpm.)

AVERY HARDOLL DISPLACEMENT METER



COUNTERS / REGISTERS



รูป 108 แสดงชิ้นส่วนของมาตรวัด Rotary Sliding และเครื่องนับหรือเครื่องบันทึก

จากเหตุการณ์ดังกล่าวเราจึงสามารถที่จะทำการเพิ่มอัตราการไหลสูงสุดของมาตรวัดที่สามารถทำงานได้ แต่ในขณะเดียวกันความละเอียดของการอ่านค่าก็ต่ำลงไปด้วยเช่นกัน ในการทำงานบางครั้งมาตรวัดที่ได้รับการปรับให้สามารถวัดของเหลวที่อัตราการไหลสูงขึ้นก็พอยอมรับได้แต่ปัญหาที่จะตามมาอีกจะมีได้อีกเช่นเมื่อจำเป็นต้องทำการสอบเทียบมาตรวัดใหม่ซึ่งสามารถทำการสอบเทียบได้เฉพาะที่ปริมาตรน้อยมากๆเมื่อเทียบกับปริมาตรที่วัดใช้งานจริงในแต่ละครั้งโดยมาตรวัด ซึ่งสิ่งเหล่านี้ควรได้รับการพิจารณาด้วย

ตัวชดเชยอุณหภูมิอัตโนมัติ (Automatic Temperature Compensator)

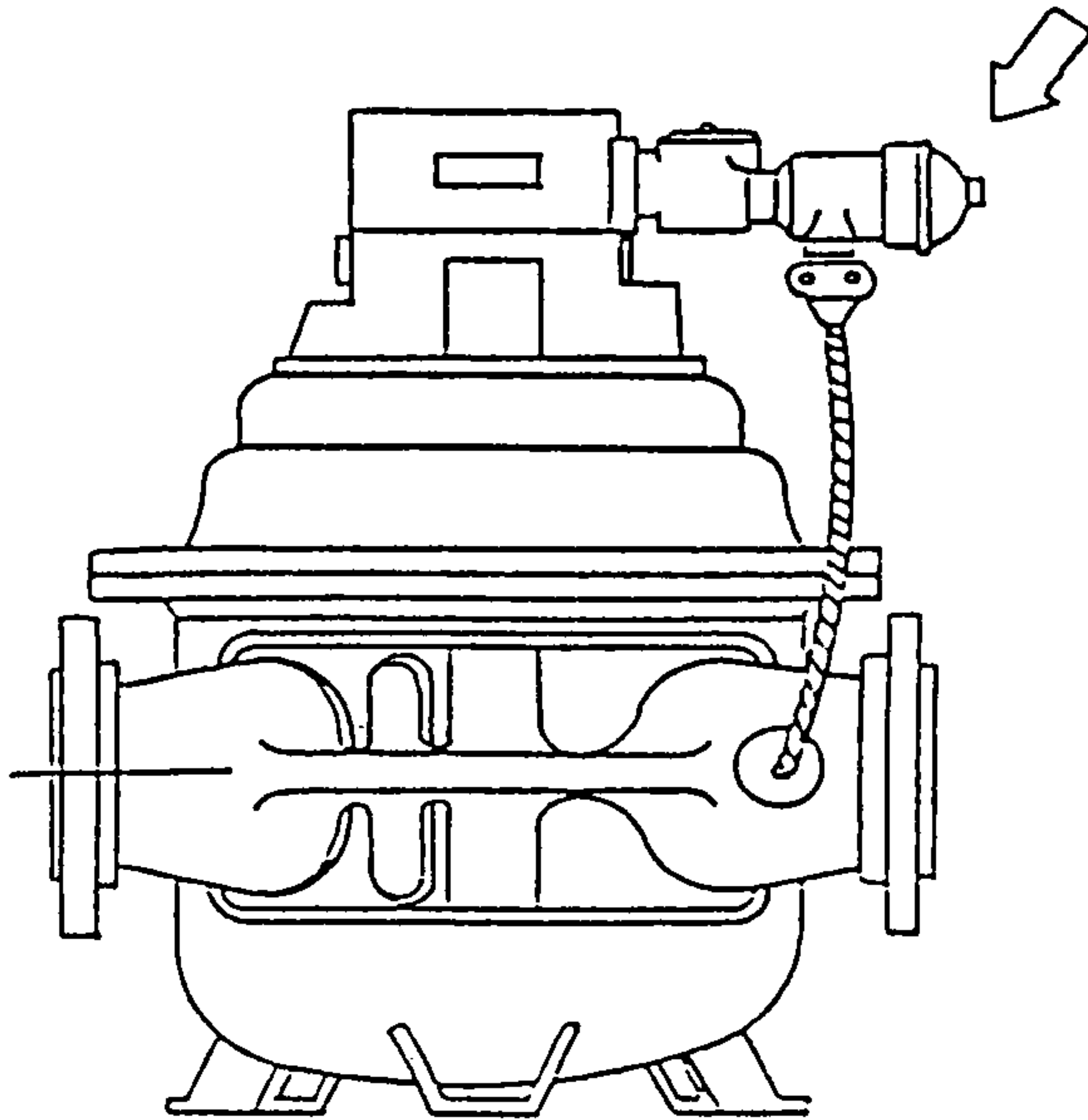
ปกติแล้วปริมาตรที่วัดได้โดยเครื่องบันทึกค่าของมาตรวัดจะเป็นปริมาตรทั้งหมด ณ. สภาพะอุณหภูมิและความดันภายในท่อขณะนั้นๆ แต่เมื่อมีความต้องการซื้อขายหรือระบบบัญชีของแต่ละผู้ประกอบการหรือเหตุผลใดๆก็ตาม เพื่อต้องการรู้ค่าปริมาตรที่วัดได้โดยมาตรวัดเทียบไปยังปริมาตรอ้างอิงหนึ่งเช่น ปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐาน $60^{\circ}\text{F} / 15^{\circ}\text{C} / 20^{\circ}\text{C}$ เป็นต้น เพื่อให้การใช้งานมาตรวัดสะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้นในการวัดปริมาตร ไม่จำเป็นต้องแปลงค่าปริมาตรที่วัดได้ด้วยวิธีการคำนวณและใช้ตาราง API ที่เหมาะสมอีกต่อไป ผู้ผลิตมาตรวัดจึงได้ผลิตมาตรวัดซึ่งมีตัวชดเชยอุณหภูมิ (temperature compensator) เพื่อทำการปรับค่าปริมาตรของเหลวซึ่งบันทึกด้วยเครื่องบันทึกค่าของมาตรวัด ณ.สภาวะอุณหภูมิและความดันภายในท่อไปยังค่าปริมาตรที่สภาวะอ้างอิงอุณหภูมิมาตรฐานหนึ่ง

ตัวชดเชยอุณหภูมิ (temperature compensator) จะทำการแก้ไขค่าปริมาตร ณ. อุณหภูมิภายในท่อไปยังปริมาตรที่อุณหภูมิมาตรฐานหรืออุณหภูมิอ้างอิงโดยปริมาตรดังกล่าวนี้ไม่ได้เป็นปริมาตรมาตรฐาน (Standard Volume) เพราะเป็นเพียงการปรับค่าเนื่องจากอุณหภูมิเท่านั้น ดังนั้นหากต้องการปริมาตรมาตรฐานจำเป็นต้องทำการปรับค่าทั้งอุณหภูมิและความดันไปยังอุณหภูมิมาตรฐานและความดันมาตรฐาน

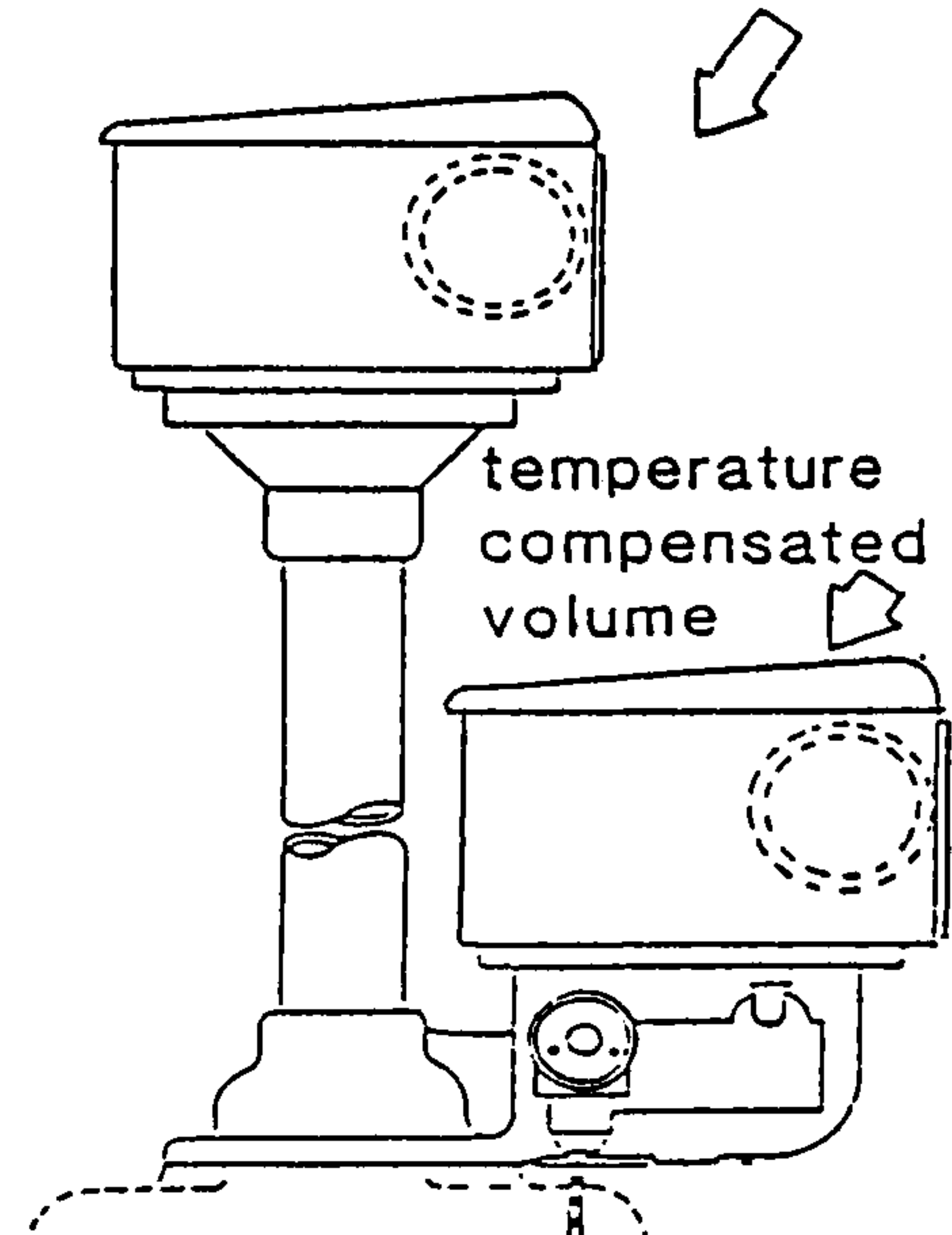
กลไกการทำงานของตัวชดเชยอุณหภูมิ มีหลักการคือทำการตรวจวัดอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ไหลผ่านตัวมาตรวัด (รูป 104) โดยใช้กระเปาะ (Bulb) ซึ่งมีของเหลวอยู่ภายในจุ่มในผลิตภัณฑ์ที่กำลังไหล กระเปาะนี้ต่อด้วยหลอดแก้วขนาดเล็ก (capillary tube) ไปยังชุดคลัตช์สปริง (bellow assembly) ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ไหลผ่านมาตรวัดเปลี่ยนแปลง จะทำให้อุณหภูมิของเหลวภายในกระเปาะและหลอดแก้วซึ่งรู้ค่าอัตราการขยายตัวที่แน่นอนเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เป็นสาเหตุให้ของเหลวดังกล่าวเกิดการขยายตัวและหดตัว ส่งผลให้ชุดคลัตช์สปริง (bellow assembly) มีการยืดและหดตัวตามเช่นกัน การยืดและหดตัวของชุดคลัตช์สปริงนี้จะส่งผลให้ไปกระดกปลายด้านหนึ่งของคานซึ่งจุดหมุน (fulcrum) ที่ปรับแต่งได้หรือกลไกที่มีลักษณะการทำงานคล้ายกัน ทำให้ปลายคานอีกด้านหนึ่งไปกระตุ้นเครื่องปรับ (adjuster) ของตัวปรับความเที่ยงตรง (calibrator) ให้ปรับตัวเองอย่างอัตโนมัติ ดังนั้นอัตราส่วนขั้วระหว่างเพลาด้านนอกของมาตรวัดกับ

AUTOMATIC TEMPERATURE COMPENSATOR

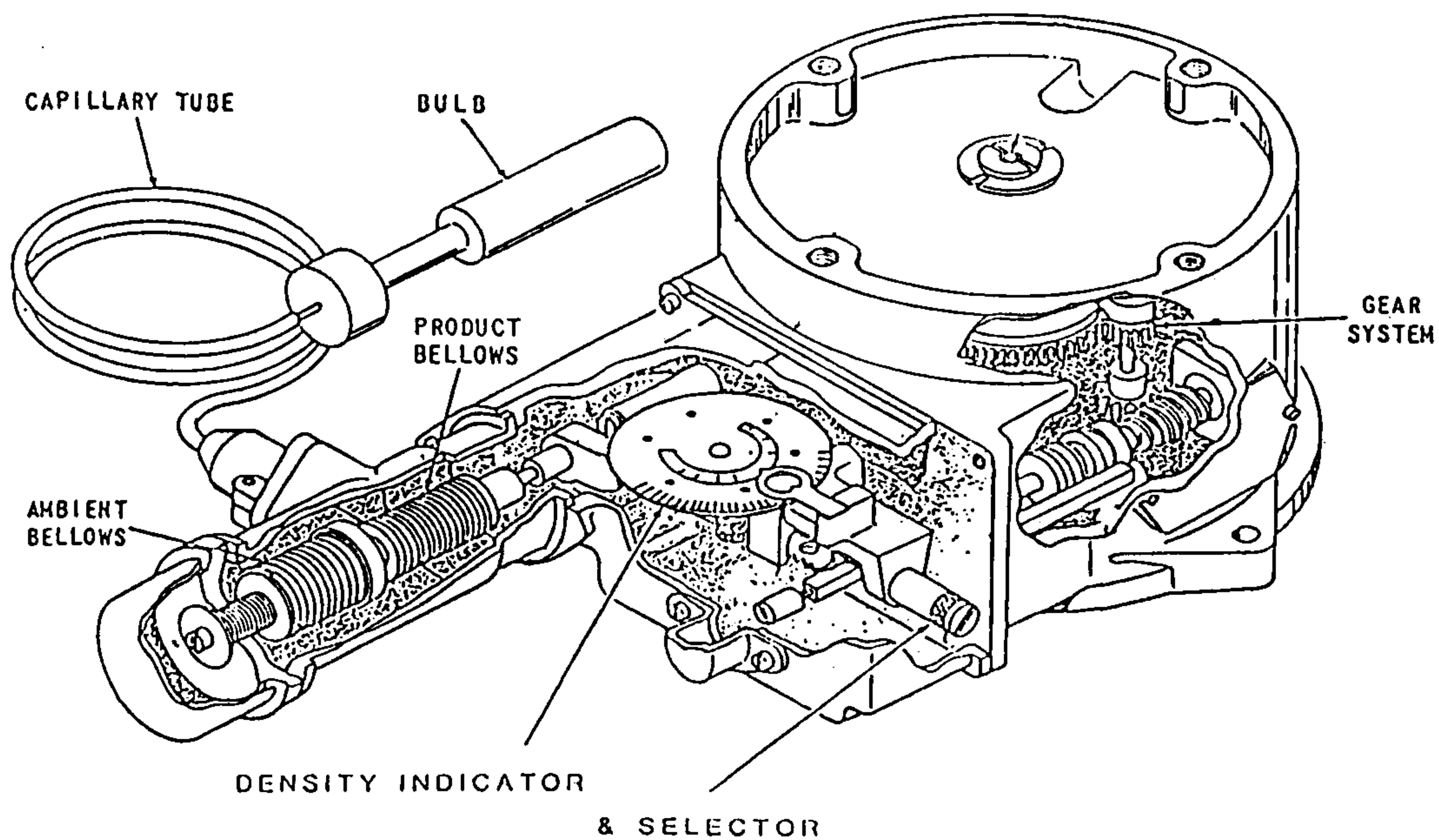
bulb, capillary tube & bellows



total indicated volume



AUTOMATIC TEMPERATURE COMPENSATOR (A.T.C.)



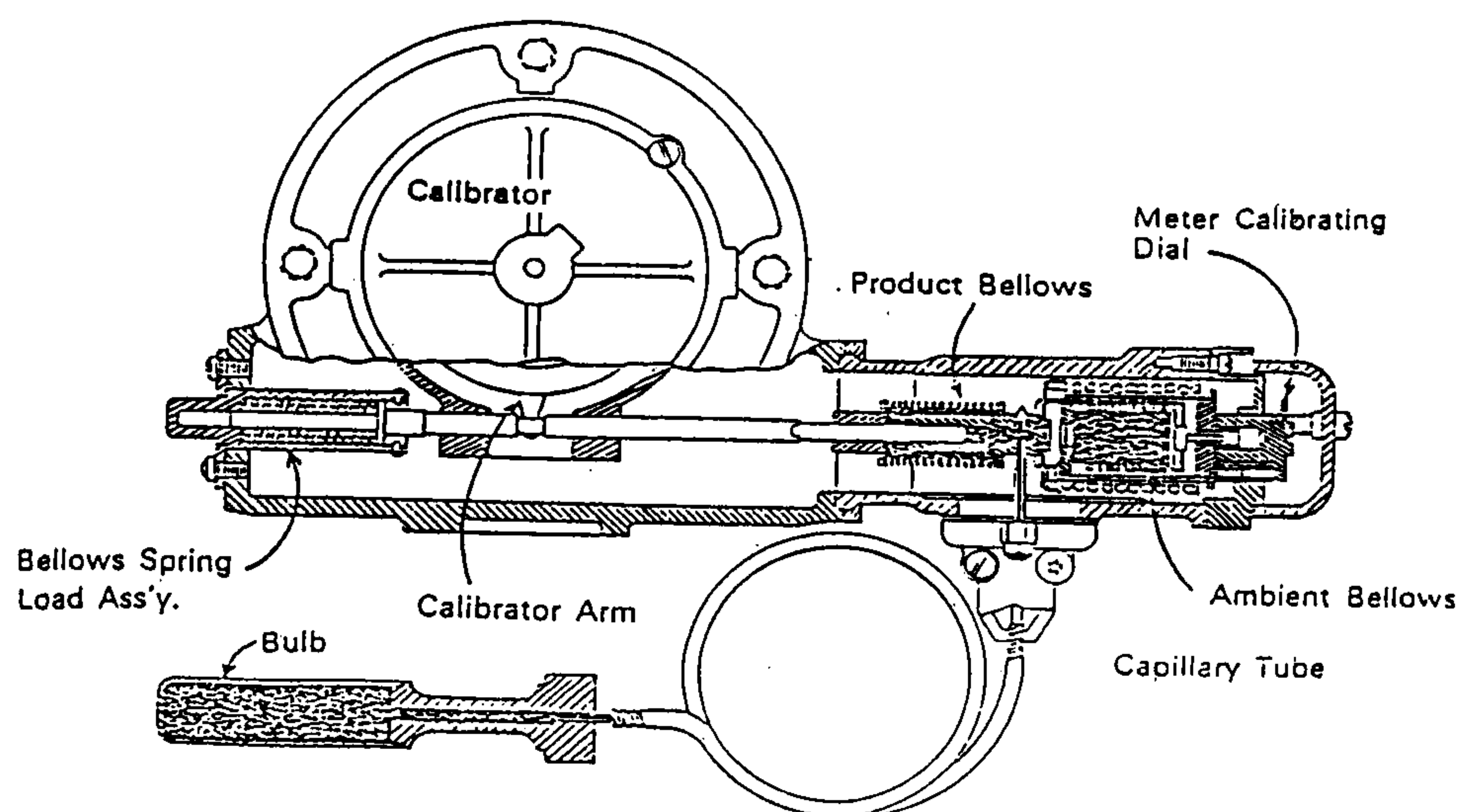
รูป 104 ส่วนประกอบและการติดตั้งตัวชดเชยอุณหภูมิอัตโนมัติ (Automatic Temperature Compensator)

เพลาด้านเข้าของเครื่องนับเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับตัวแปรแก้ไขค่าปริมาตร (volume correction factor) เนื่องจากอุณหภูมิ และความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่ไหลผ่านมาตรวัด ด้วยเหตุนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องทำการปรับค่าความหนาแน่นบนหน้าปัดของตัวชดเชยอุณหภูมิให้ถูกต้องก่อนทุกครั้งในการวัดปริมาตรเพราะการปรับค่าความหนาแน่นดังกล่าวจะทำให้กลไกเปลี่ยนจุดหมุน (fulcrum) บนคานกระดกเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าแก้ไขความหนาแน่นร้อยละตามต้องการ การเปลี่ยนจุดหมุนของคานกระดกดังกล่าวจะไปเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่างการบิดตัวของชุดดัดสปริง (distortion of the bellow) และการปรับของตัวปรับความเที่ยง (adjustment of the calibrator)

ในทางปฏิบัติมีข้อควรระวังในการใช้งานตัวชดเชยอุณหภูมิอัตโนมัติทางกลหลายข้อด้วยกัน คือ

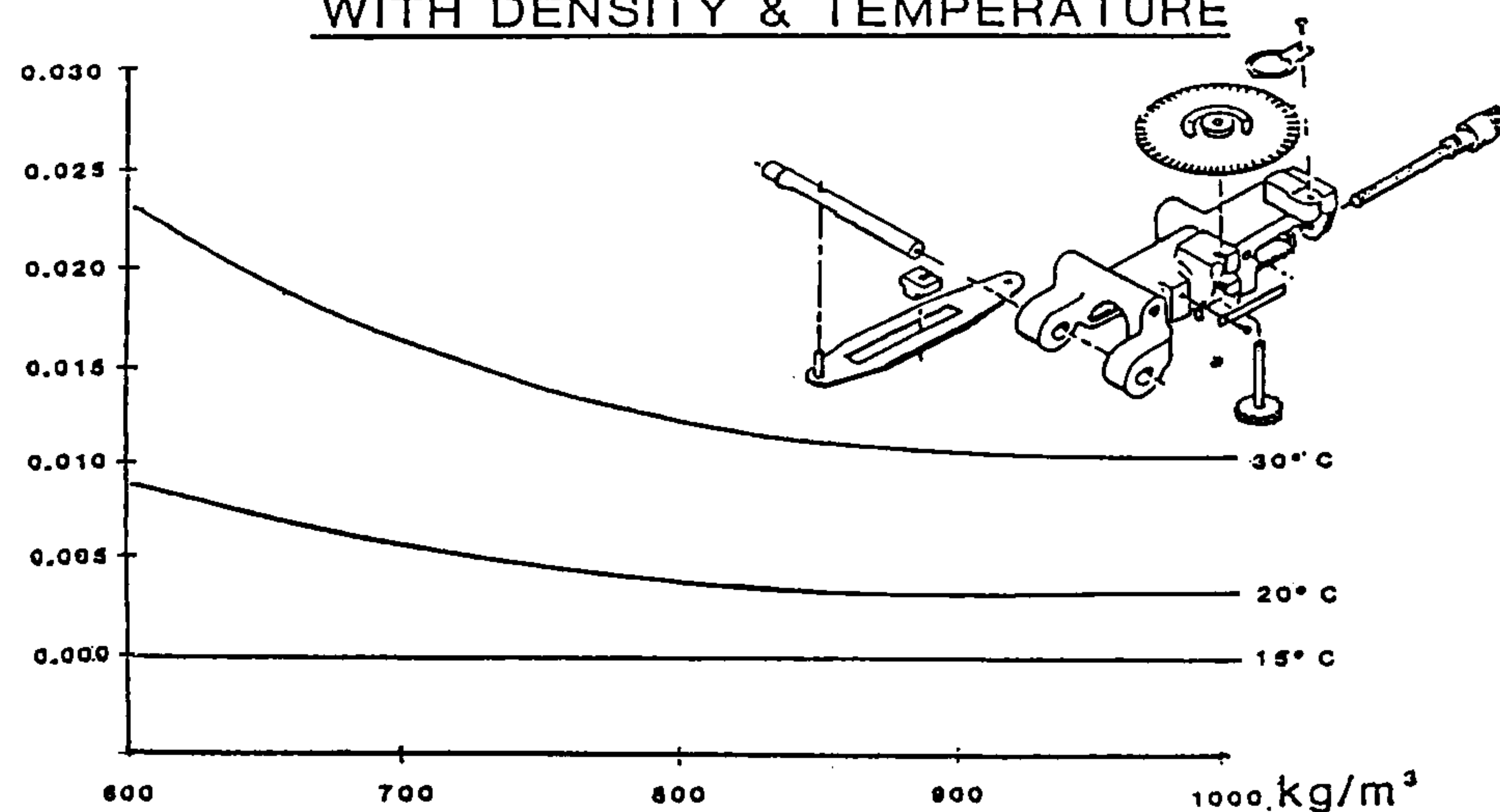
- ตัวชดเชยอุณหภูมิจะตอบสนองและแก้ไขค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปได้ช้า ต้องใช้ระยะเวลาการกระชากหนึ่งที่จะให้ชุดดัดสปริง (bellow) มีสภาพอยู่ตัวคงที่แน่นอน
- ต้องหมุนหรือปรับค่าความหนาแน่น (density) ภายในท่อที่เหมาะสมก่อนใช้งานทุกครั้ง
- อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ทำการวัดจะต้องอยู่ภายในช่วงอุณหภูมิที่กำหนดโดยชุดดัดสปริง (bellow) ซึ่งสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ของเหลวได้ ดังนั้นต้องระมัดระวังเป็นพิเศษหากจำเป็นต้องทำการเปลี่ยนหรือซ่อมแซมชุดดัดสปริง (bellow)
- ตัววัดอุณหภูมิ เช่น กระเปาะ (bulb) หรือ temperature probe ควรติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสมและมีฉนวนกันความร้อนอย่างดี

ATC — WORKING PRINCIPLES



รูป 105 หลักการทำงานของตัวชดเชยอุณหภูมิอัตโนมัติ (Automatic Temperature Compensator)

TYPICAL % SHIFT OF EXPANSION COEFFICIENT WITH DENSITY & TEMPERATURE



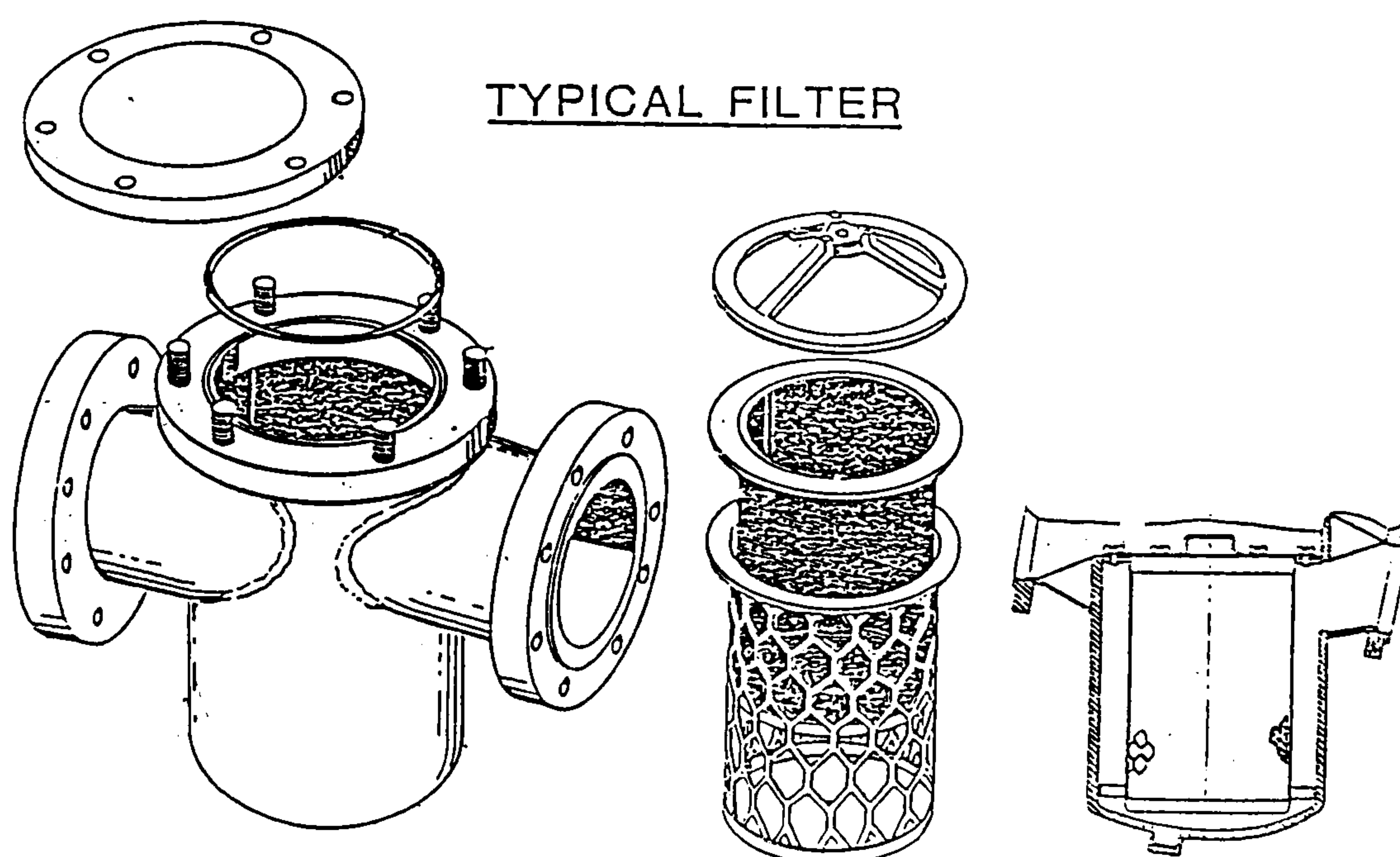
รูป 106 เปอร์เซ็นต์ เลื่อนเมื่อสัมประสิทธิ์ขยายตัวของของเหลวเมื่อความดันและอุณหภูมิเปลี่ยน

- ต้องระมัดระวังในการควบคุมอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ทำการวัดให้คงที่ซึ่งรวมไปถึงการควบคุมอุณหภูมิของท่อจ่าย และท่อหมุนเวียน (re-circulation pipework) ซึ่งในทางปฏิบัติยากต่อการควบคุม

ตัวกรอง (Filters or Strainers)

สิ่งสำคัญที่สุดที่จะป้องกันมาตรวัดได้รับอันตรายและความเสียหายจากอนุภาคหรือสิ่งแปลกปลอมไหลเข้ามาตรวัดโดยทำการติดตั้ง filters or strainers ด้านก่อนทางเข้ามาตรวัด ในส่วนของขนาดความถี่ของตะแกรง (size of the mesh) ของตระกร้าตัวกรอง (filter baskets) ปกติแล้วจะถูกกำหนดจากบริษัทผู้ผลิตมาตรวัดในบางกรณีอาจจะทำการติดตั้งตะแกรงที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือความถี่น้อยกว่าที่กำหนดจากบริษัทผู้ผลิต เพื่อต้องการลดความดันตก (pressure drop) ของระบบและเพิ่มอัตราการไหล แต่ต้องคำนึงถึงว่าหากผลที่ได้มาเนื่องจากการลดความดันตกและการเพิ่มอัตราการไหลจะชดเชยหรือเทียบเคียงกับการสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นได้แก่การลดอายุการใช้งานของมาตรวัดเนื่องจากมาตรวัดได้รับความเสียหายจากการหลุดลอยของอนุภาคแปลกปลอมเข้ามาตรวัด อีกอย่างหนึ่งที่ต้องพึงระลึกเสมอว่ามาตรวัดขนาดเล็กจะมีช่องว่างระหว่างปลายแผ่นเวน (vane) กับตัวเรือนมาตรวัด 0.08 มิลลิเมตรหรือ 0.003 นิ้ว ดังนั้นหากมีสิ่งแปลกปลอมซึ่งมีขนาดใหญ่กว่านี้หลุดเข้ามาตรวัดดังกล่าวจะทำให้อุดค้างติดอยู่ระหว่างปลายแผ่นเวน (vane tip) กับตัวเรือนมาตรวัด ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายให้กับมาตรวัด

ดังนั้นควรมีวิธีการที่จะทำการตรวจสอบสถานะการใช้งาน filter basket ด้วยการติดตั้งเกจวัดความดัน (pressure gauge) ก่อนและหลังทางเข้าตัว strainer / filter เพื่อเป็นตัวแสดงให้เห็นว่าความดันตกครหว่าง strainer / filter มากน้อยเพียงใด หากพบว่าความดันตกครหว่าง strainer / filter สูงมากกว่าค่าปกตินั้นหมายถึงมีสิ่งแปลกปลอมถูกดักค้างอยู่ภายใน strainer / filter มากให้รีบทำการถอดทำความสะอาดและตรวจสอบว่ามีรอยร้าวหรือไม่ แต่ถ้าหากไม่ได้ทำการติดตั้งเกจวัดความดันเพื่อคอยตรวจสอบสภาพ filter basket โอกาสที่ filter basket จะร้าวแตกปล่อยให้สิ่งแปลกปลอมหลุดเข้ามาตรวจวัดก็ยังมีมากขึ้น

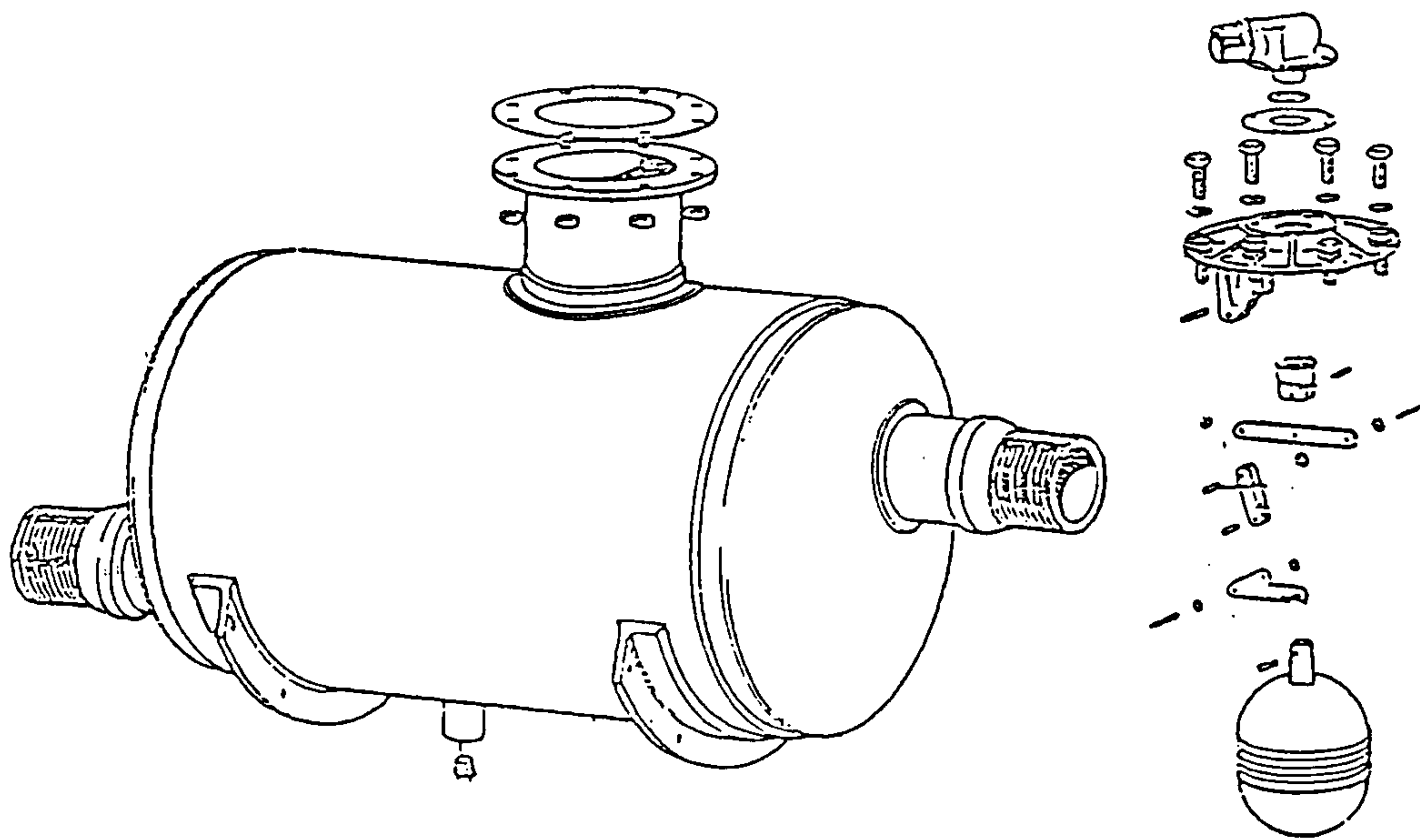


รูป 107 ส่วนประกอบตัวกรอง

ตัวแยกอากาศ / ไอน้ำ (Air / Vapour Separator)

ตัวแยกอากาศปกติแล้วจะมีลักษณะเป็นถังเล็ก ๆ ติดตั้งอยู่ระบบท่อ ส่วนใหญ่จะติดตั้งอยู่ระหว่าง strainer กับ มาตรวัด ลักษณะการทำงานของตัวแยกอากาศจะไปลดความเร็วของเหลวเพื่อที่

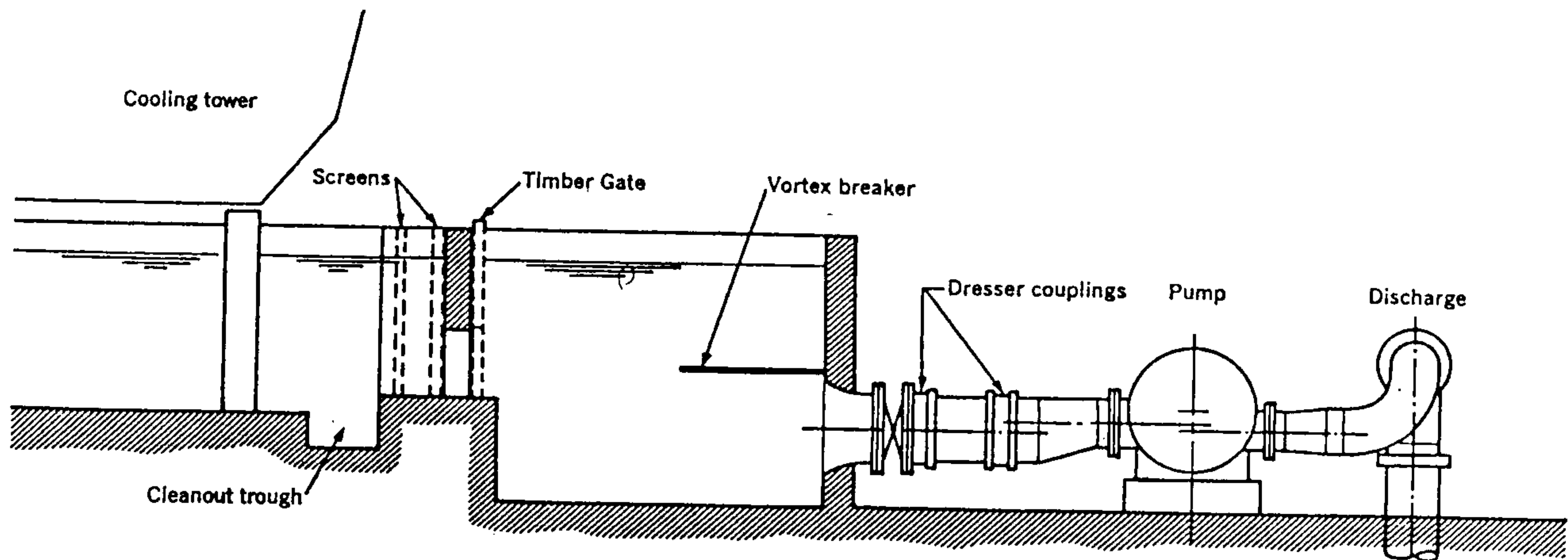
AIR & VAPOUR SEPARATOR



รูป 108 ส่วนประกอบตัวแยกอากาศ / ไอ

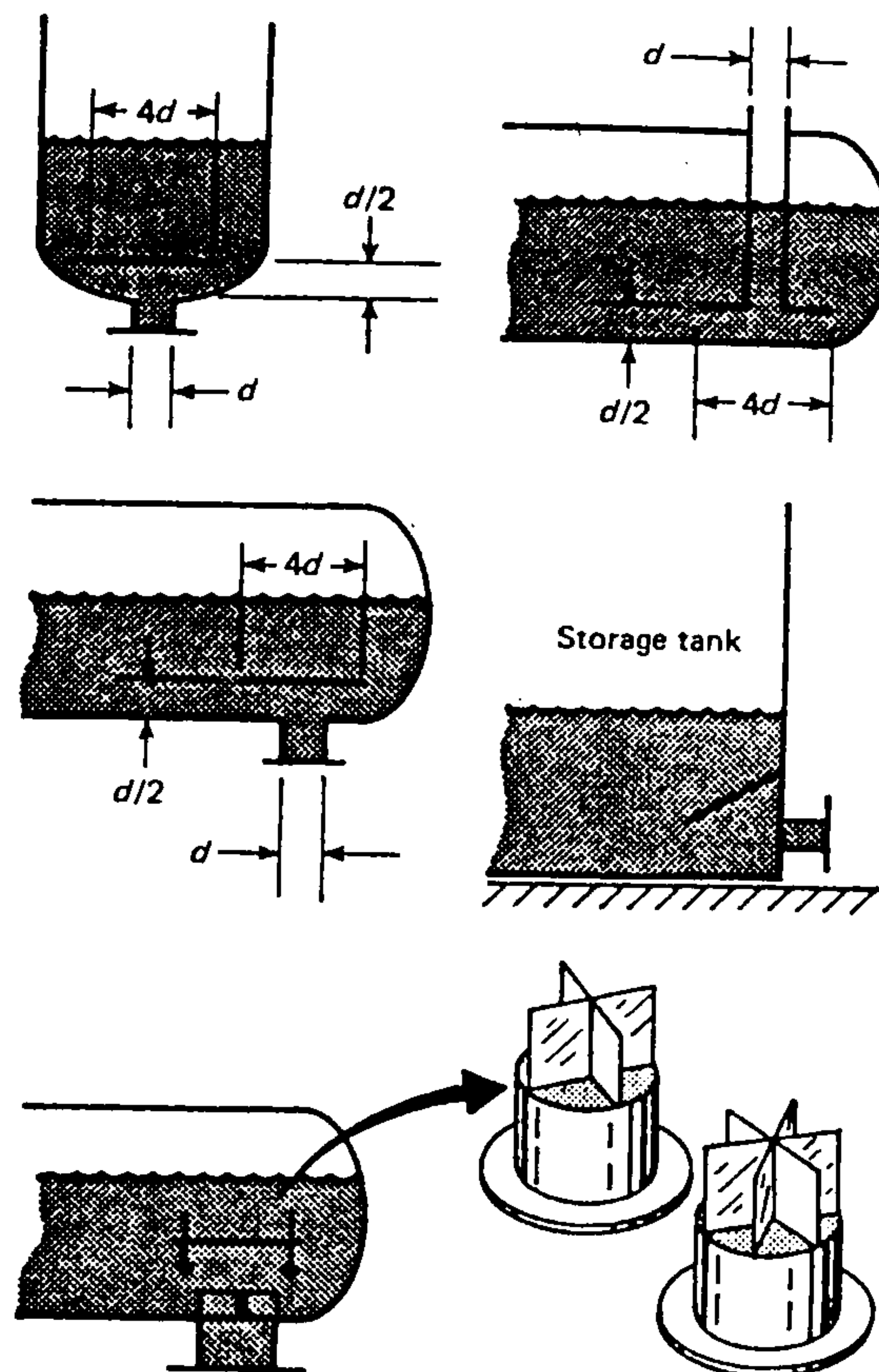
ให้ของเหลวอยู่ในถังเป็นเวลานานพอที่จะยอมให้อากาศและไอลอยตัวขึ้นเหนือผิวหน้าของเหลว ขึ้นไปยังส่วนบนของถังตัวแยกอากาศ / ไอ ส่งผลให้ระดับของเหลวภายในถังตัวแยกอากาศ / ไอ ลดลง วาล์วไล้อากาศ (float-actived vent valve) เปิดไล้อากาศ / ไอออกจากตัวแยกอากาศ / ไอ

ตัวแยกอากาศจะทำงานได้มีประสิทธิภาพดีเมื่ออากาศหรือไอซึ่งปนมากับของเหลวอยู่ในรูป ฟองอากาศใหญ่ๆ แต่ถ้าหากอากาศหรือไอผสมอยู่ในของเหลวซึ่งอยู่ในรูปของฟองเล็กๆ ตัวแยกอากาศ จะไม่สามารถแยกอากาศ / ไอ ดังกล่าวเนื่องจากระยะเวลาที่ของเหลวอยู่ในตัวแยกอากาศน้อยมากไม่ เพียงพอที่จะทำให้ฟองอากาศ / ไอ ดังกล่าวลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนได้เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงเหตุการณ์ดังกล่าว จำเป็นต้องให้ความเอาใจใส่และระมัดระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศหรือไอในรูปดังกล่าวโดยก่อนที่จะเริ่ม เติมน้ำมันต้องมั่นใจว่าปั๊มได้ดูดของเหลวจากถังซึ่งมีระดับสูงมากเพียงพอเพื่อป้องกันการเกิดการไหลวน (vortex) เนื่องจากการสูบของปั๊ม ทำการตรวจสอบปั๊มและปะเก็นของวาล์วในระบบไม่ให้เกิดการรั่วอีก ทั้งต้องมีความดันย้อนกลับ (back pressure) มากเพียงพอที่จะรักษาความดันภายในระบบเพื่อป้องกันการ เกิด cavitation โดยเฉพาะเมื่อทำการวัดผลิตภัณฑ์ที่มีความดันไอต่ำๆ เช่น น้ำมันดิบ (ดูรูป 109, 110)



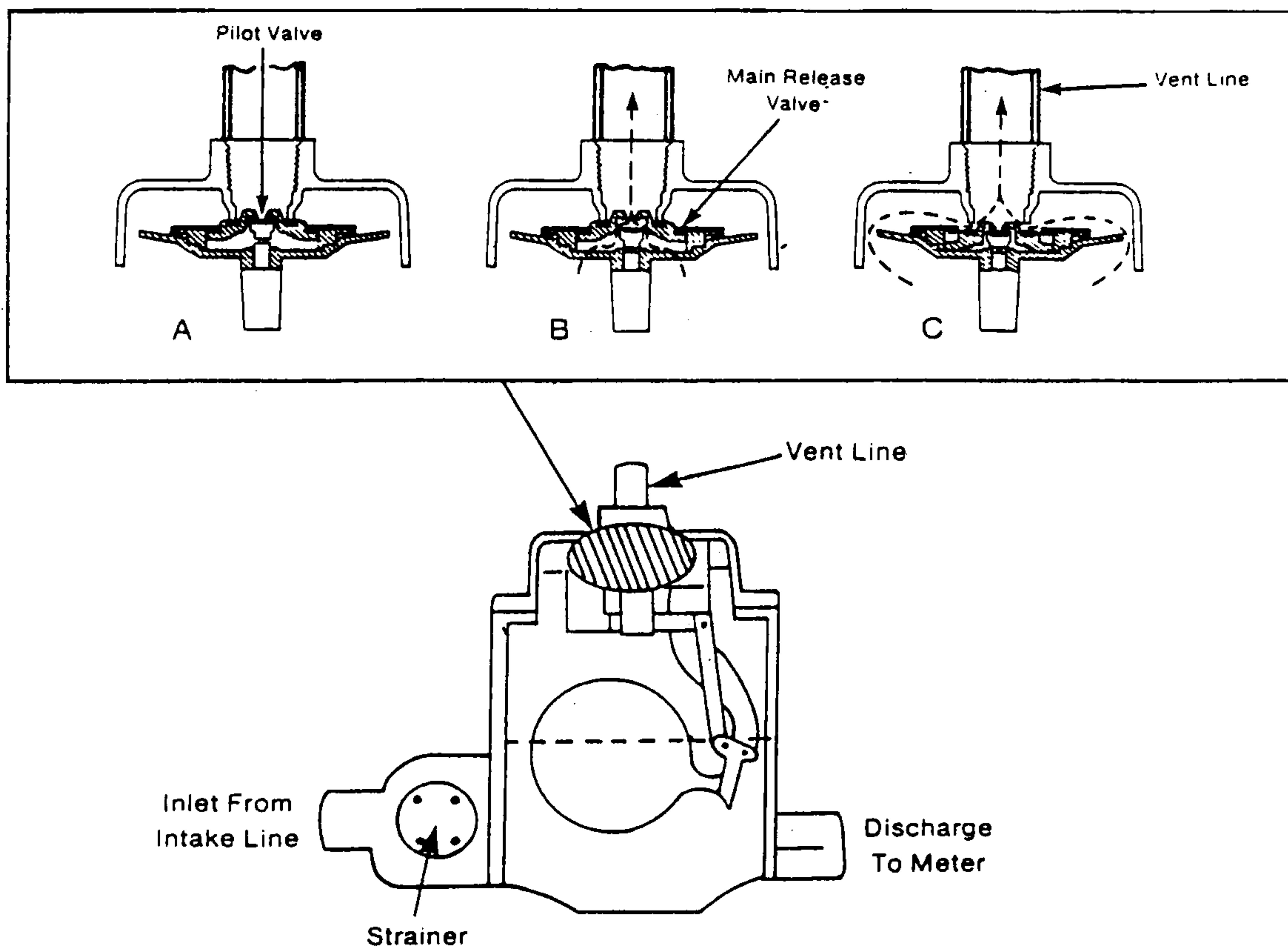
SUCTION PIPING for a cooling tower pump

Originally published October 11, 1971



VORTEX breakers in typical process vessels

รูป 109 วิธีการติดตั้ง Vortex Breaker เพื่อป้องกันการเกิด Vortex เมื่อเดินปั๊มของเหลว



Typical air/vapor eliminator.

รูป 110 การทำงานของตัวแยกอากาศ / ไอน้ำ

วาล์วควบคุมการไหล (Flow Control Valves)

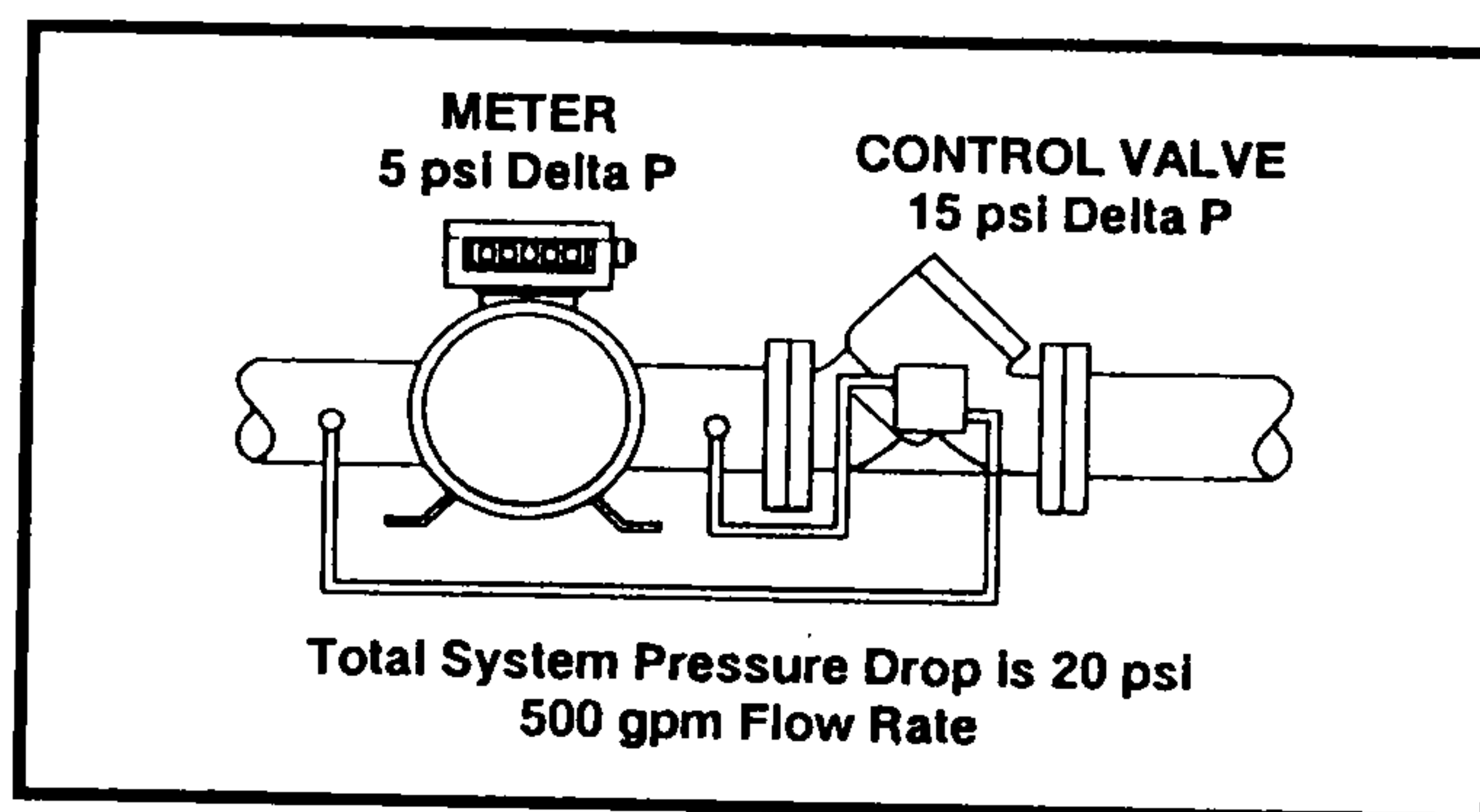
วาล์วควบคุมการไหลเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญและจำเป็นอีกชิ้นหนึ่งเช่นกันที่จัดให้ติดตั้งภายในระบบการวัดด้วยมาตรวัดชนิด positive displacement meter บริเวณทางด้านออกของมาตรวัดเพื่อทำการควบคุมการไหล

วัตถุประสงค์ของการติดตั้งวาล์วควบคุมการไหลไม่เพียงแต่รักษาอัตราการไหลผ่านมาตรวัดให้อยู่ภายในช่วงอัตราการไหลสูงสุดของมาตรวัดซึ่งยังคงสามารถทำงานได้ไม่เป็นอันตรายเสียหาย อีกทั้งยังรักษาความดันย้อนกลับ (back pressure) ภายในระบบมาตรวัด (meter run) ให้สูงมากเพียงพอเพื่อป้องกันไม่ให้เกิด cavitation นั้นหมายถึงป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบของเหลวภายในมาตรวัดกลายเป็นไออันเป็นผลจากความดันไม่เพียงพอ ซึ่งปัญหาดังกล่าวเป็นปัญหาที่สำคัญยิ่งที่จะต้องป้องกันไม่

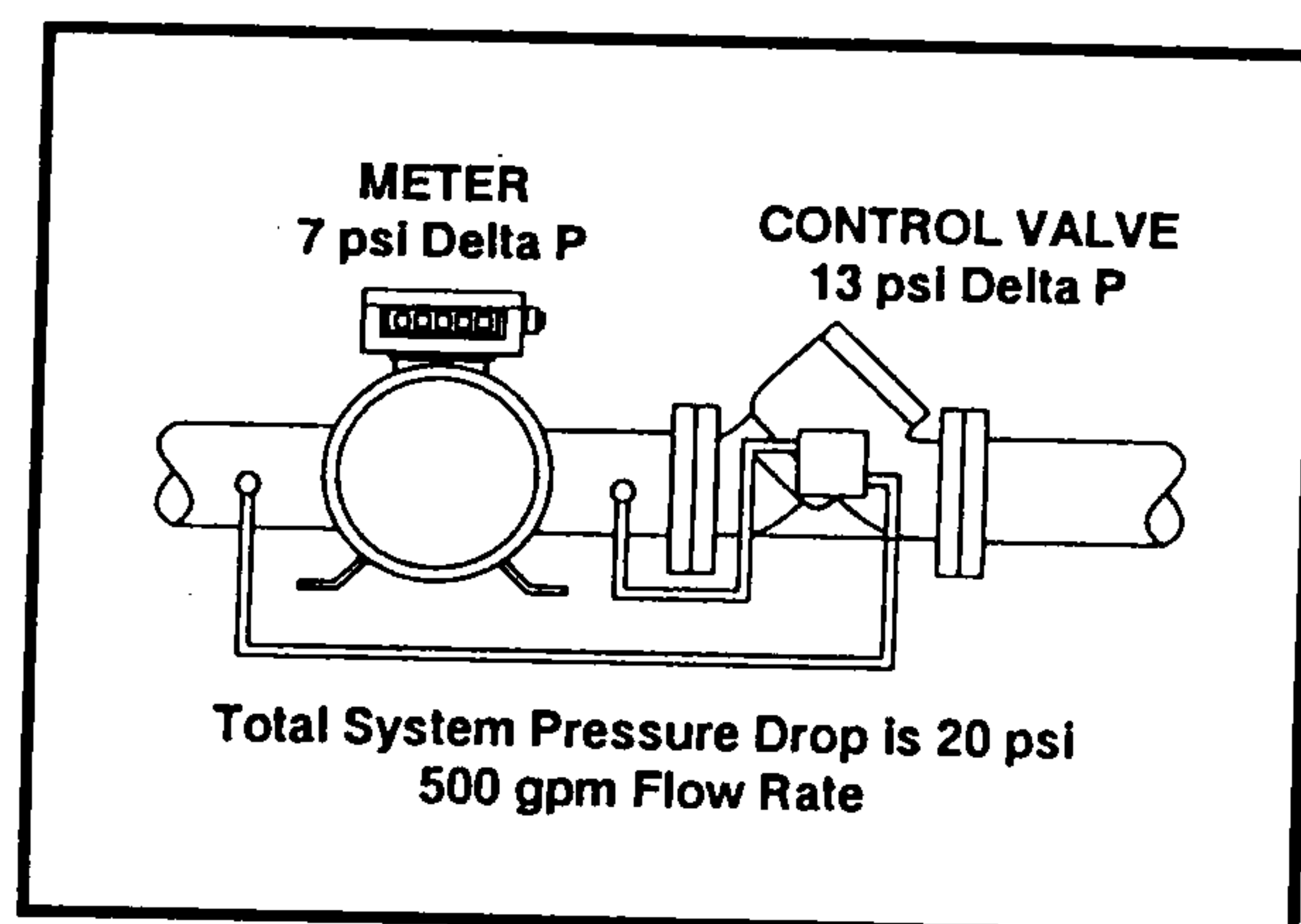
ให้เกิดขึ้นได้ในกรณีมาตรวัดชนิดเทอร์ไบน์มิเตอร์ แต่อย่างไรก็ตามหากต้องการความแม่นยำในการวัดปริมาตรก็จำเป็นต้องป้องกันไม่ให้เกิด cavitation ขณะทำการวัดปริมาตรทั้งนี้เพราะ displacement meter หรือไม่ว่ามาตรวัดชนิดใดๆ ไม่สามารถทำการวัดปริมาตรของไหลชนิด 2 เฟส (two-phase fluid) คือของเหลวและไอซึ่งผสมกันได้อย่างแม่นยำได้

เพราะถ้าหากว่า cavitation เกิดขึ้น ความเสียหายก็จะเกิดขึ้นกับมาตรวัดได้ทันทีภายในช่วงระยะเวลาอันสั้นเช่นอาจจะเกิดหลุมเล็กๆ (pitting) บนผิวหน้าแผ่นเวน (vane) หรือภายในตัวเรือนมาตรวัดได้

วาล์วควบคุมการไหลจะปรับระบบให้การไหลคงที่ตลอดเวลาช่วงการทำงานเพื่อที่จะรักษาสภาวะเงื่อนไขการทำงานที่ได้กำหนดไว้ก่อนหน้านี้ เช่น อัตราการไหล , ความดันย้อนกลับ เป็นต้น ลักษณะการทำงานระหว่างวาล์วควบคุมการไหลกับมาตรวัดจะเป็นดังนี้ ดูรูป 111 เมื่อระบบมาตรวัด

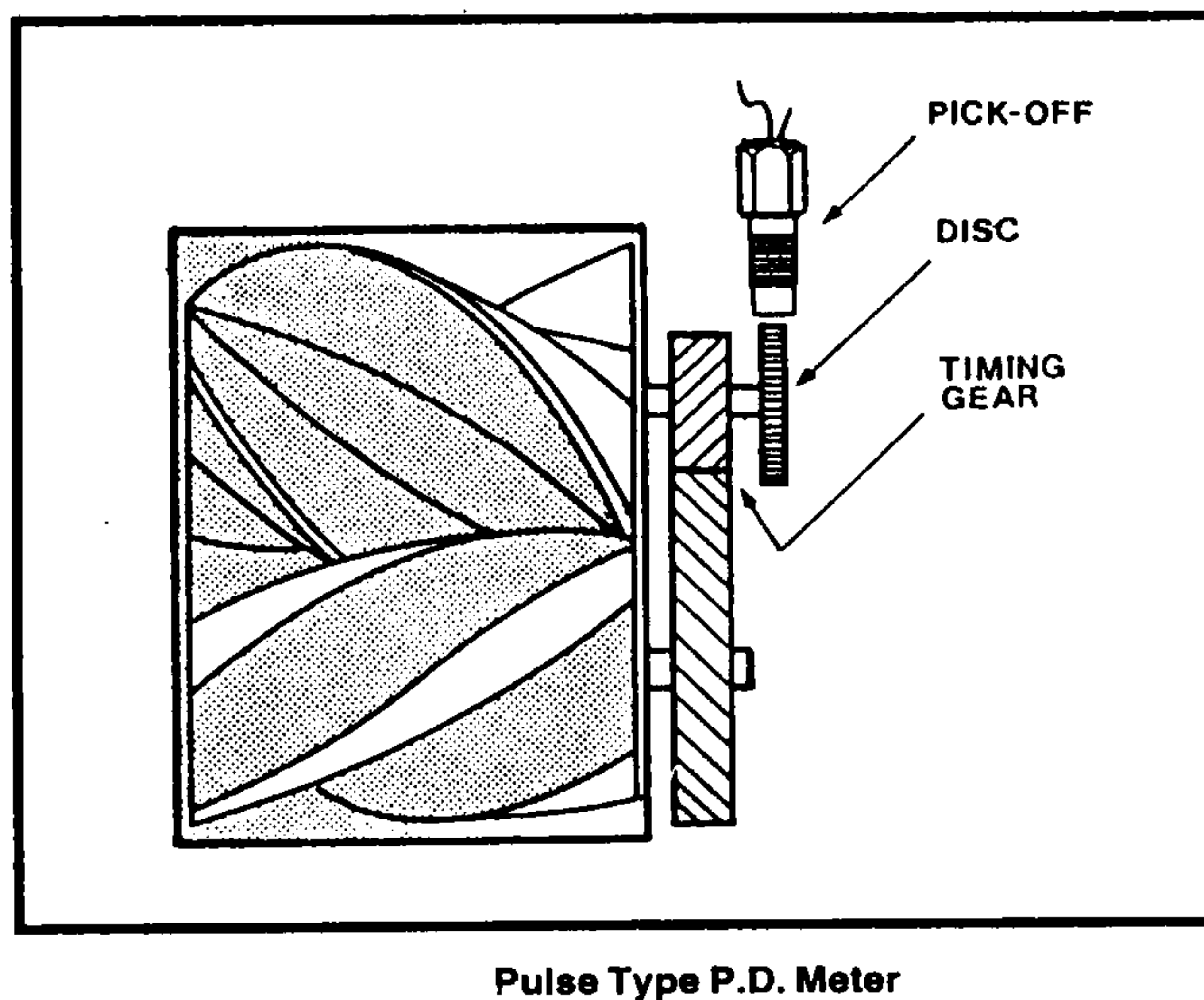


System Pressure Balance



System Pressure Balance

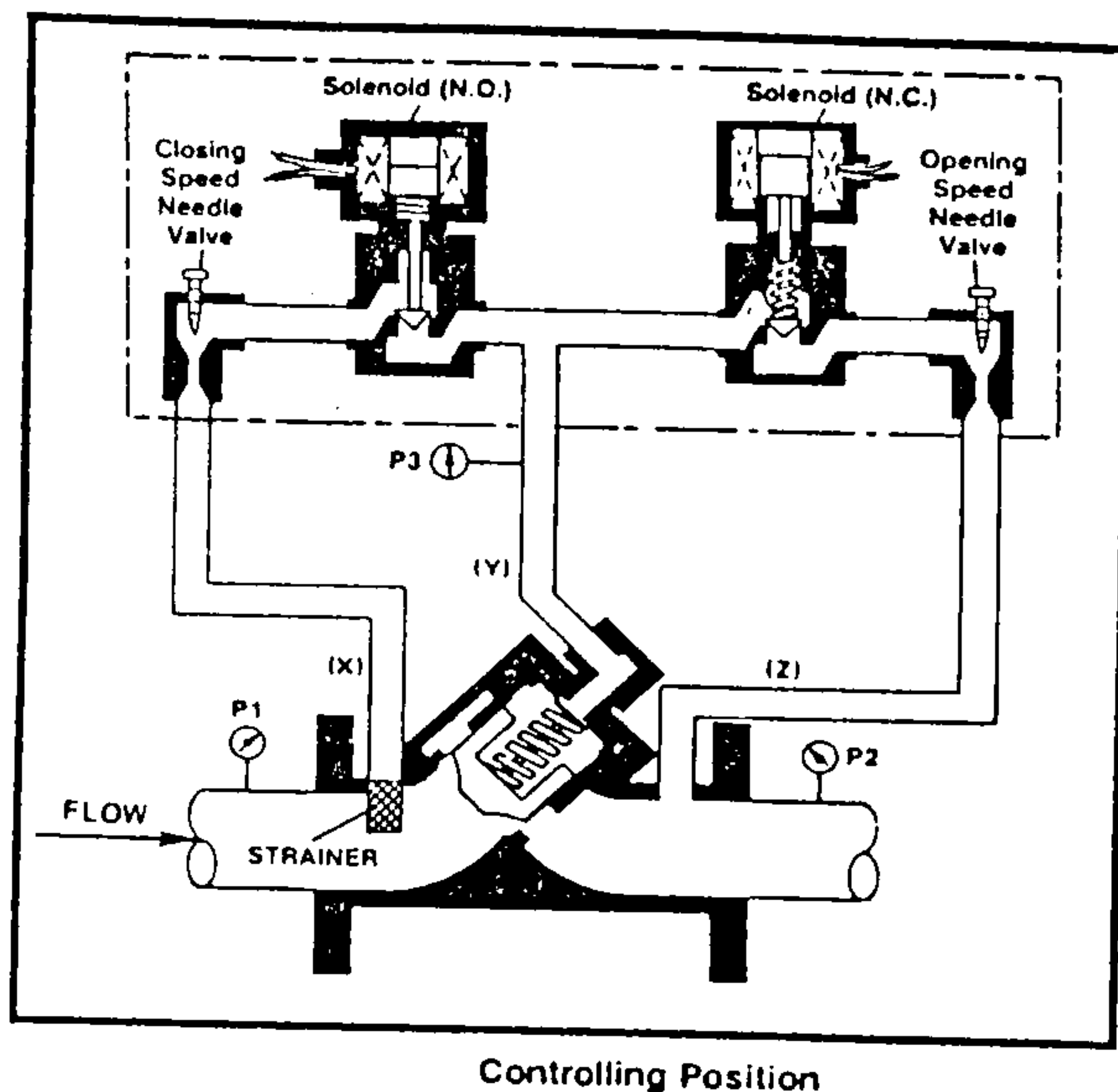
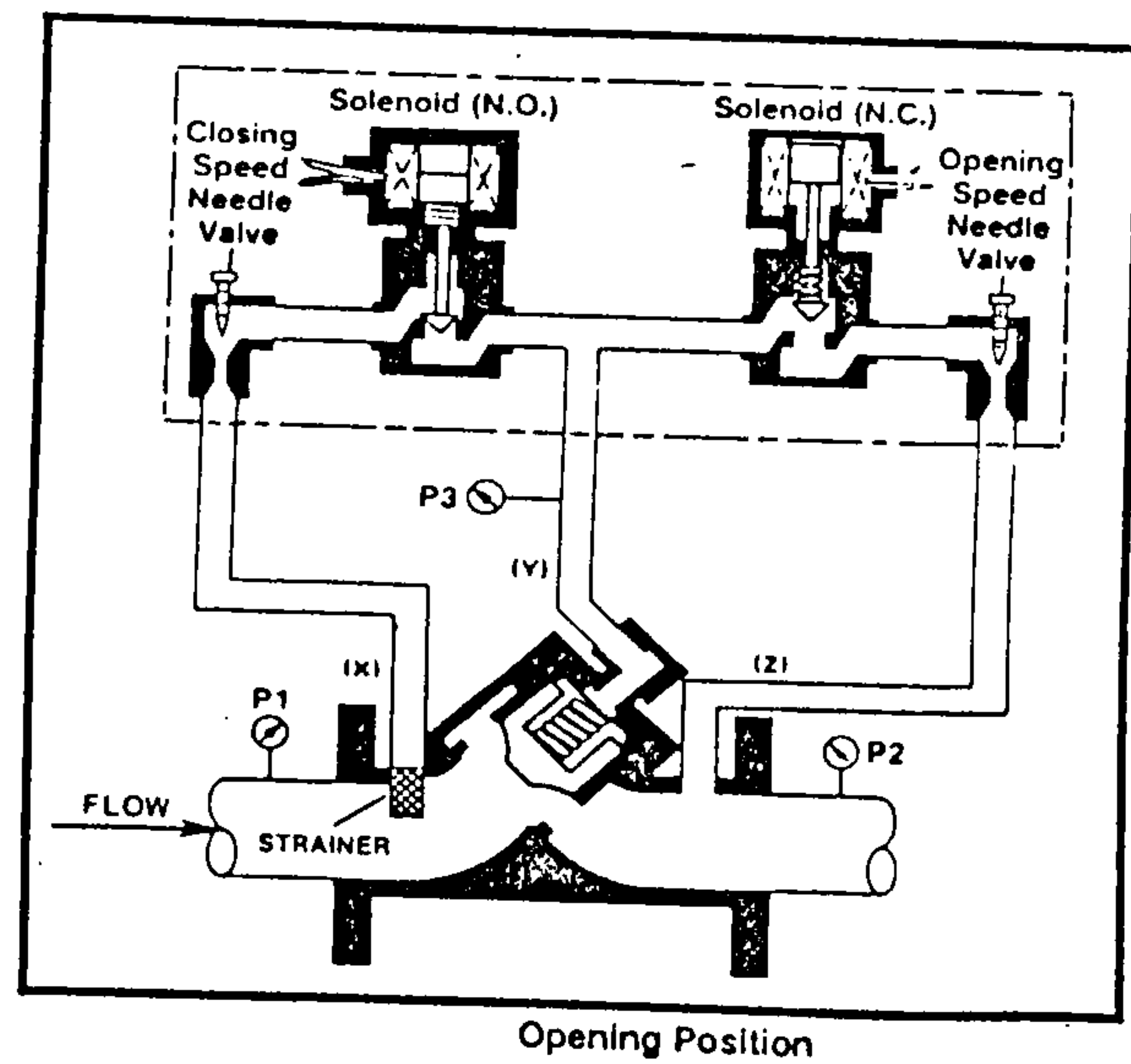
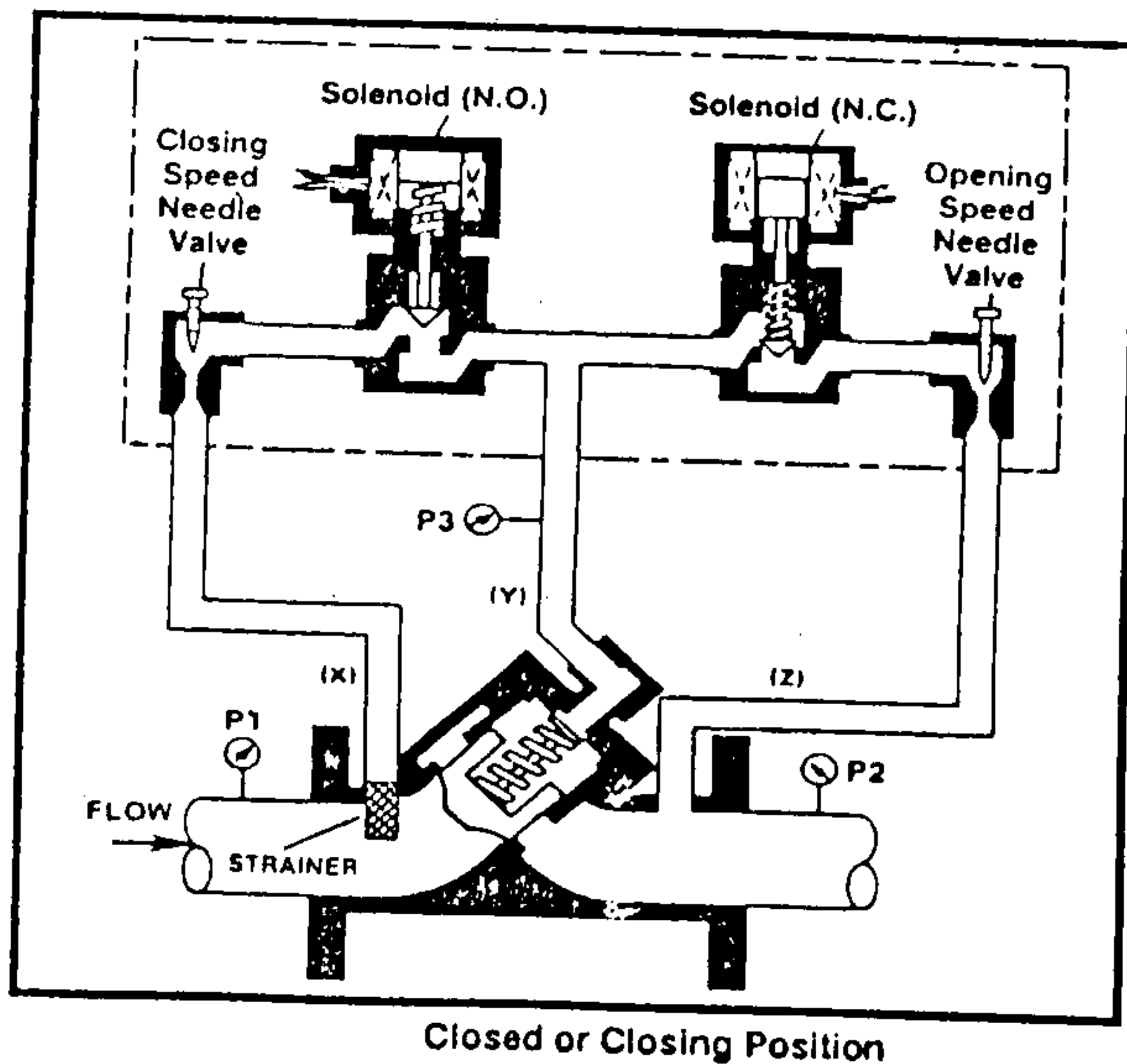
รูป 111 การทำงานของวาล์วควบคุมการไหล (Flow Control Valves)



รูป 112 ตัวกำเนิดพัลส์ของมาตรวัด P.D.

(meter run) ประกอบด้วย P.D. Meter มีความดันตก (pressure drop) 5 psi เมื่อของเหลวไหลผ่านมาตรวัด (ความดันระบบที่ลดลงเนื่องจากสูญเสียความเสียดทานเมื่อไหลผ่านมาตรวัด) และวาล์วควบคุมการไหลขณะทำงานปรับความดันตกคร่อมของระบบมาตรวัด (meter run) ให้อยู่ที่จุดควบคุมมีความดันตก 15 psi เมื่อของเหลวไหลผ่านมาตรวัด ดังนั้นความดันตกรวมของระบบมาตรวัดจึงมีค่าเท่ากับ 20 psi บวกกับความดันตกเล็กน้อยเนื่องจากท่อซึ่งพอจะตัดทิ้งได้ โดยมีอัตราการไหลผ่านระบบมาตรวัดเท่ากับ 500 แกลลอนต่อนาที หากความดันตกของ P.D. Meter เกิดเปลี่ยนแปลงไม่ว่าด้วยสาเหตุใดก็ตามเพิ่มขึ้นจาก 5 psi เป็น 7 psi วาล์วควบคุมการไหลจะมีปฏิกิริยาตอบสนองทันทีที่จะทำการเปิดวาล์วให้ช่องไหลผ่านวาล์วควบคุมการไหลเพิ่มมากขึ้นเพื่อชดเชยกับการเพิ่มความดันตกคร่อมมาตรวัดที่สูงขึ้นเนื่องจากต้องรักษาความดันตกคร่อมของระบบมาตรวัด (meter run) ให้อยู่ที่ค่าเท่ากับ 20 psi ดังนั้นเมื่อวาล์วควบคุมการไหลเปิดช่องทางไหลมากขึ้นความดันตกคร่อมก็จะลดลง 2 psi นั่นคือความดันตกคร่อมวาล์วควบคุมการไหลลดลงจาก 15 psi เหลือ 13 psi แต่ในทางปฏิบัติก็ยังคงมีปัญหาอยู่บ้างเนื่องจากการตอบสนองของระบบวาล์วควบคุมการไหลยังไม่เป็นแบบลักษณะเชิงเส้นเสียทีเดียวแต่ก็ถือว่าใกล้เคียงกับจุดสถานะสมดุลย์มากพอสมควร อีกประการหนึ่งเมื่อมีความดันตกคร่อมอุปกรณ์ในระบบก็สามารถช่วยลดการไหลแยกตัวของเหลวซึ่งไหลผ่านระบบ

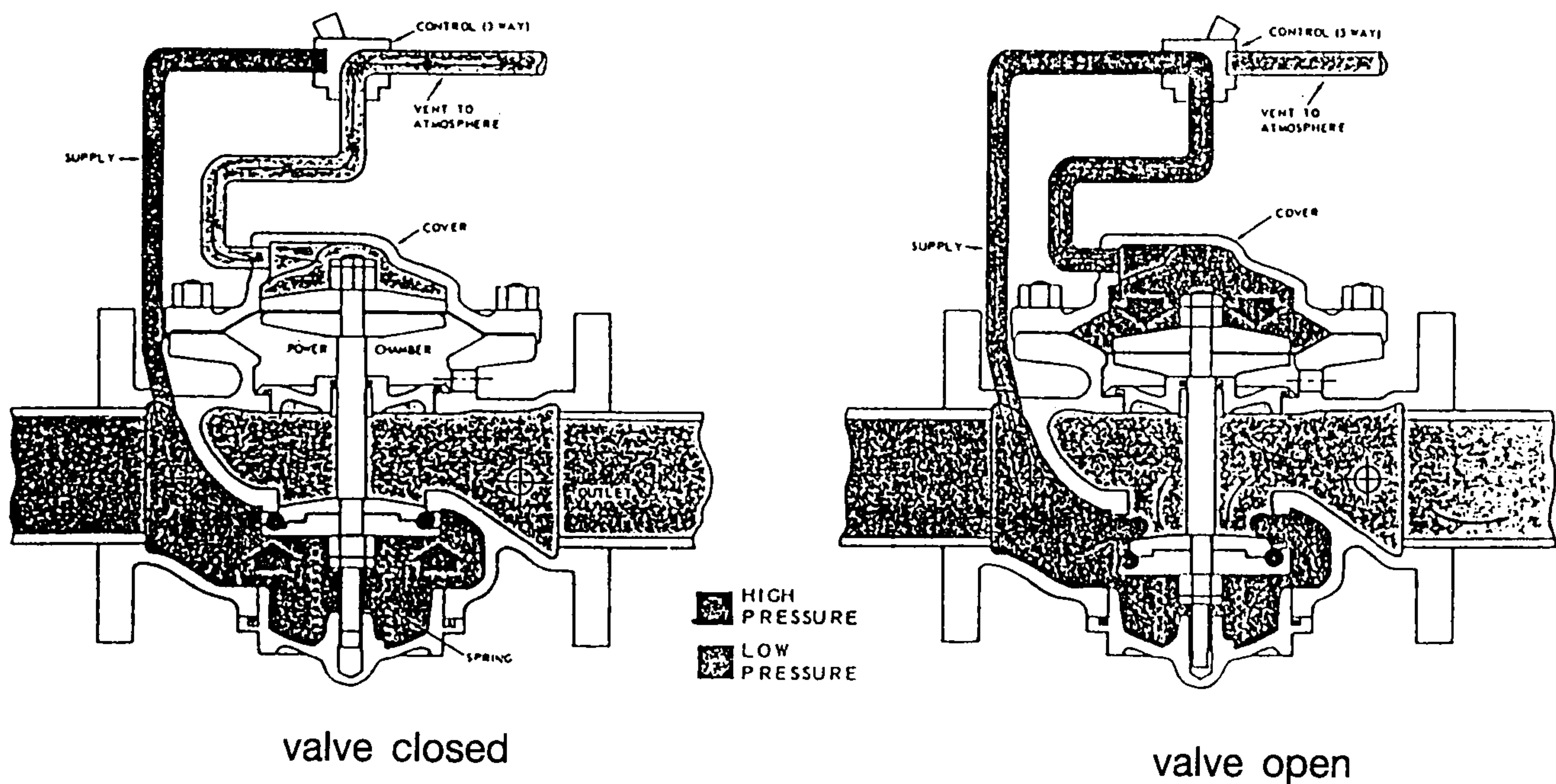
ลักษณะการทำงานของวาล์วควบคุมการไหลในรายละเอียดลึกลงไปจะขึ้นอยู่กับ บริษัทผู้ผลิต แต่พอจะยกตัวอย่างลักษณะการทำงานพอเป็นสังเขป ดังรูป 113 ในระบบการทำงานวาล์วควบคุม



รูป 113 ระบายการทำงานของวาล์ว
ควบคุมการไหล (Flor Control Valves)

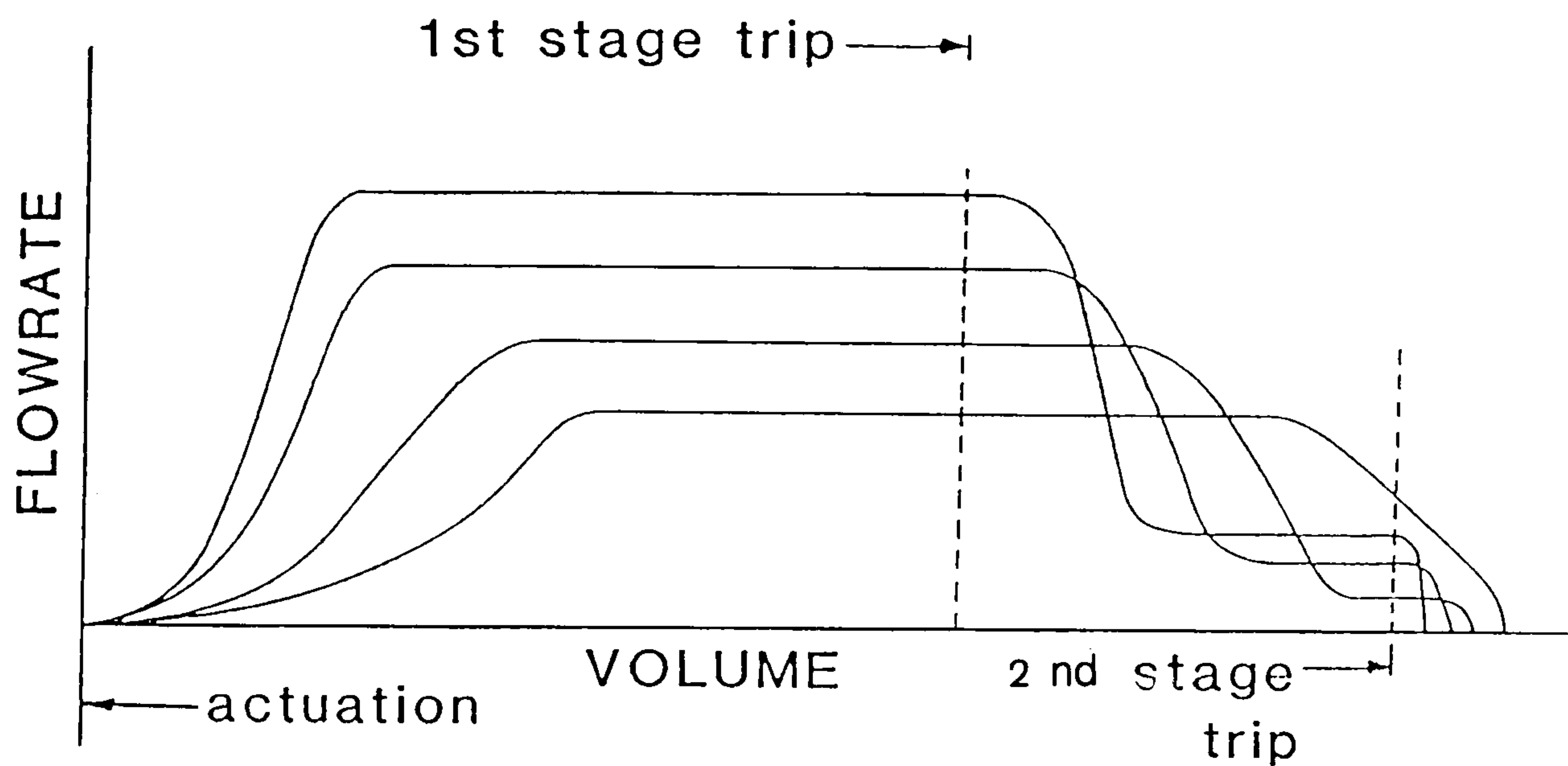
การไหลจะประกอบด้วยโซลินอยด์วาล์ว (solinoid valve) 2 ตัวคือตัวแรกปกติจะอยู่ในตำแหน่งเปิด (N.O.) อีกตัวหนึ่งปกติจะอยู่ในตำแหน่งปิด (N.C.) ซึ่งจะคอยควบคุมการปิดเปิดวาล์ว เมื่อวาล์วควบคุมการไหลอยู่ตำแหน่งปิดความสมดุลระหว่างความดันทางเข้า P1 กับความความดัน P3 และแรงดันสปริงที่กดให้ลิ้นวาล์วกดบนบ่าวาล์ว โดยที่ความดันทางออกของวาล์วควบคุมการไหล (P2) ไม่มีผลต่อสถานะสมดุลนี้แต่อย่างใดเนื่องจากโซลินอยด์วาล์ว (solinoid valve; N.C.) ปิดอยู่ แต่เมื่อวาล์วควบคุมการไหลเริ่มเปิด โซลินอยด์วาล์ว (solinoid valve; N.C.) ซึ่งปกติอยู่ตำแหน่งปิดก็จะถูกกระตุ้นให้เปิด ในขณะที่เดียวกันโซลินอยด์วาล์ว (solinoid valve; N.O.) ซึ่งปกติก็จะถูกกระตุ้นให้ปิด ส่งผลให้ความดัน P3 ต่อถึงกับบริเวณทางออกของวาล์วควบคุมการไหล P2 แต่เนื่องจากความดันทางเข้า P1 มากกว่าความดันทางออก P2 บวกกับแรงดันสปริง ดังนั้นเมื่อนำ P1 ลบด้วย P2 ก็จะมีค่ามากกว่าแรงดันสปริงส่งผลให้ความดัน P1 ดันให้ลิ้นวาล์วเปิดยอมให้ของเหลวไหลผ่านจนเมื่อถึงตำแหน่งที่วาล์วควบคุมการไหลอยู่ในตำแหน่งควบคุมไหล (controlling position) โซลินอยด์วาล์ว (solinoid valve) ทั้ง 2 จะปิดลงความดันทางเข้าวาล์วควบคุมการไหล P1 จะไม่ต่อถึงกับ

TYPICAL FLOW CONTROL VALVE

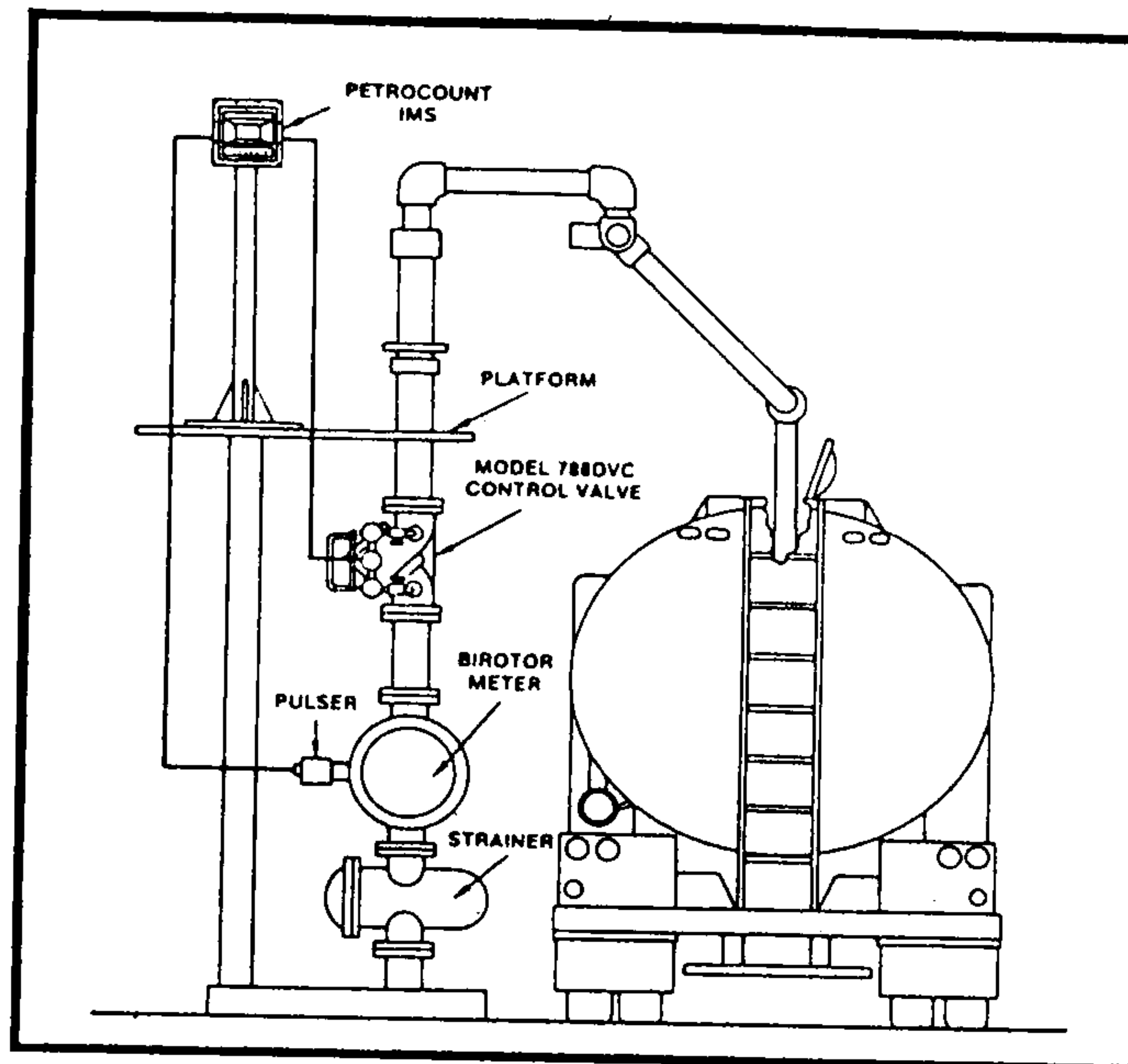


รูป 114 ระบการทำงานสของวาล์วควบคุมการไหล (Flor Control Valves)

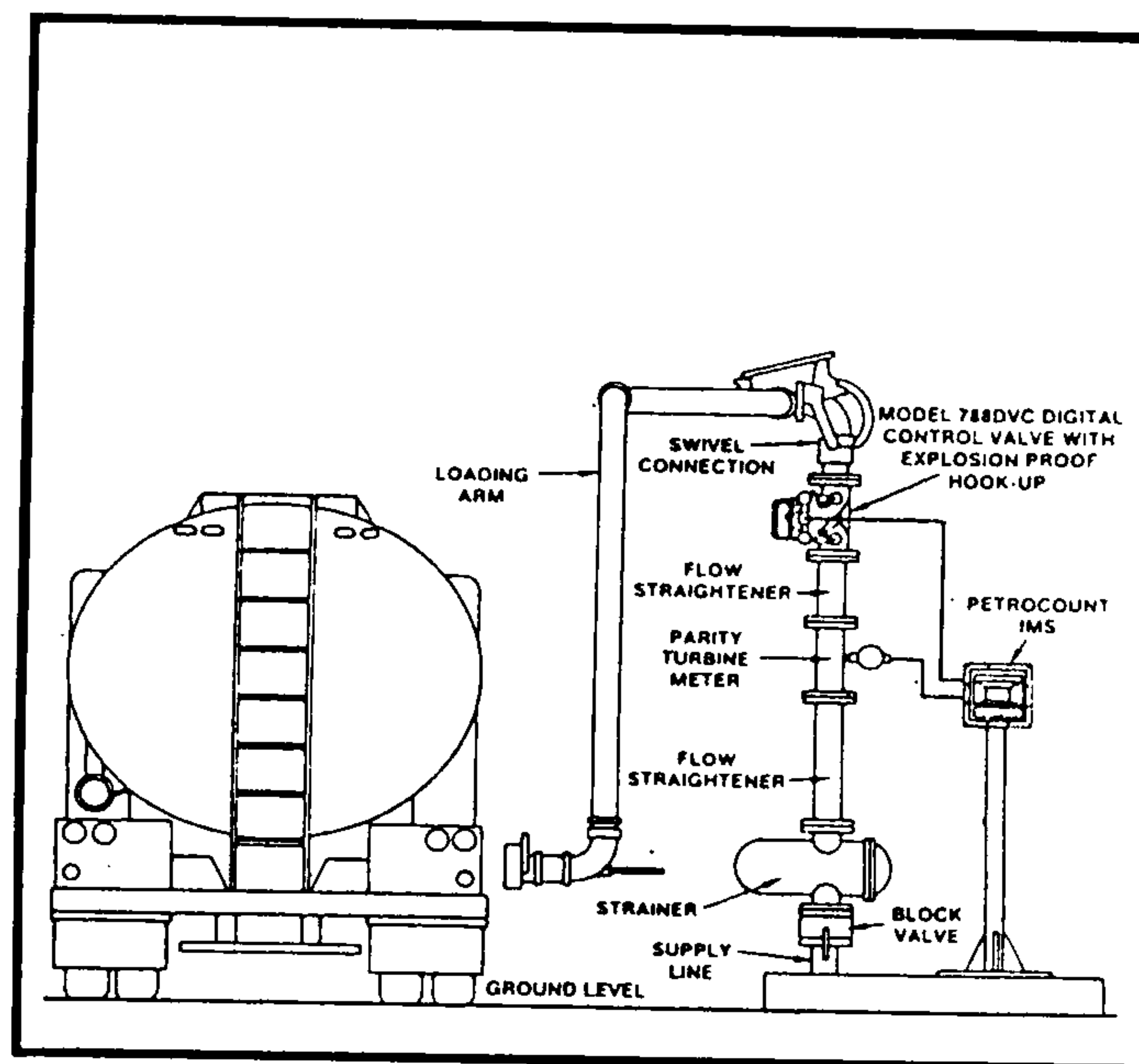
TWO-STAGE "SET-STOP" VALVE



รูป 115 จังหวะการทำงานของวาล์วควบคุมการไหล 2 จังหวะ

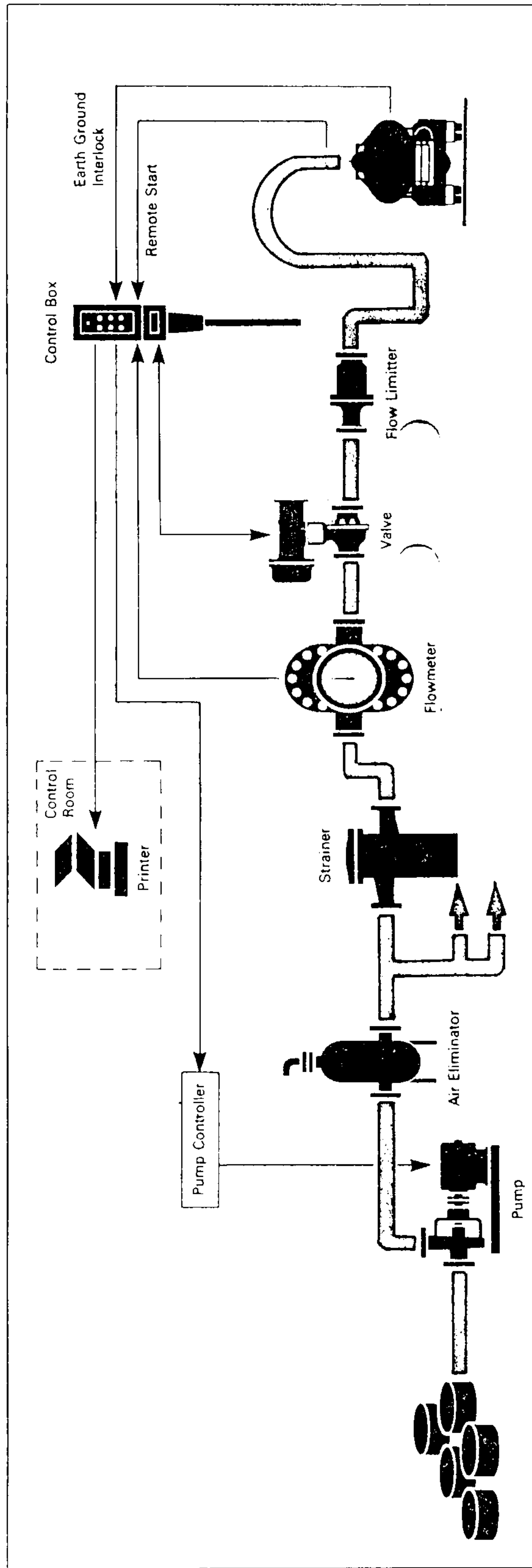
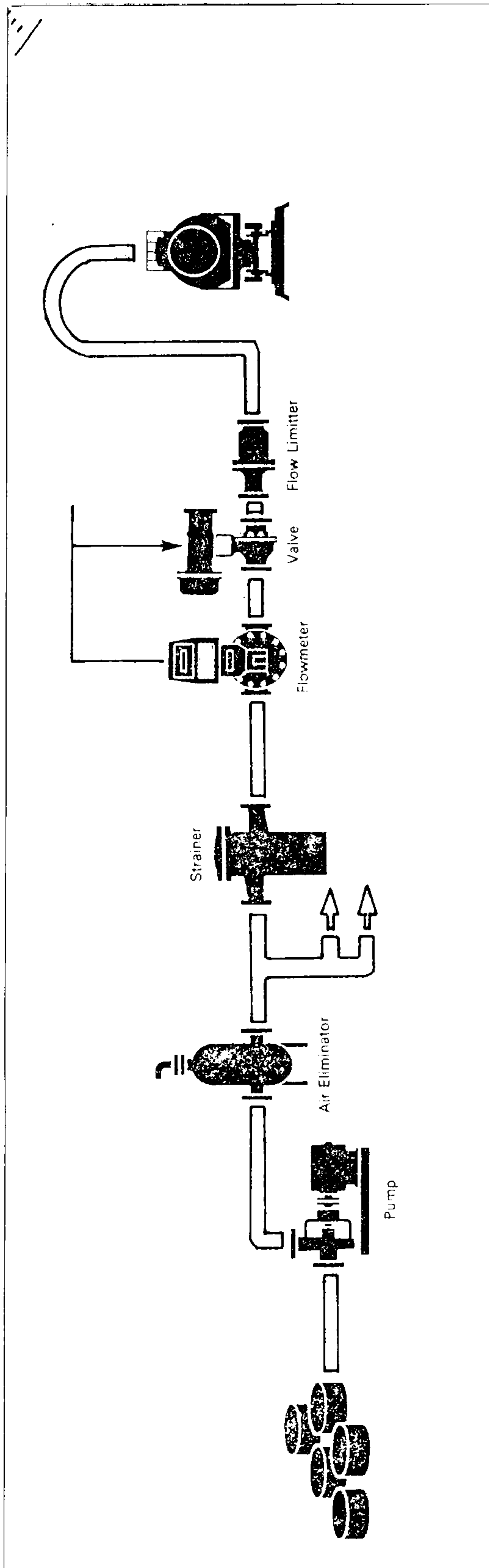


Typical Application - Top Loading

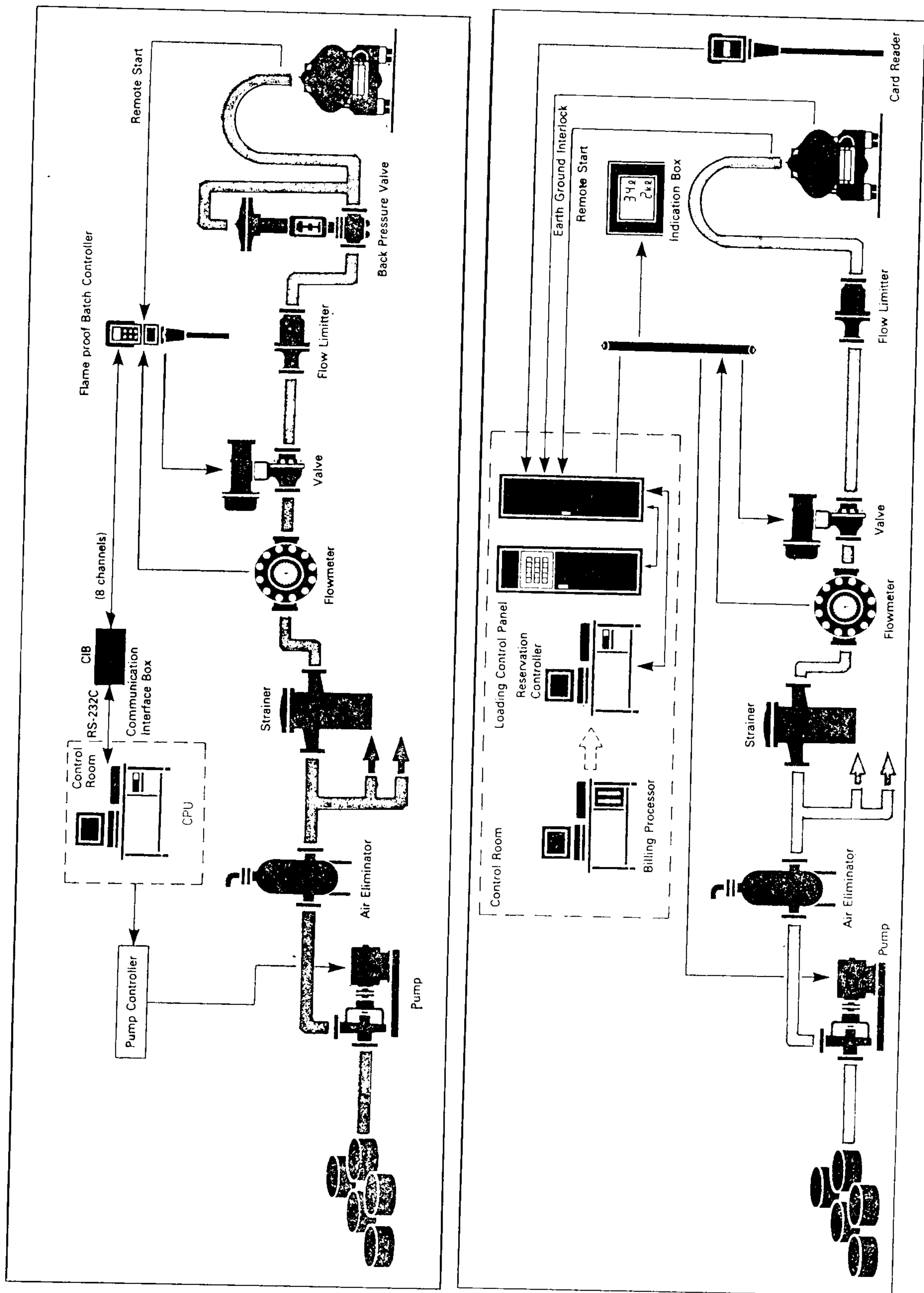


Typical Application - Bottom Loading

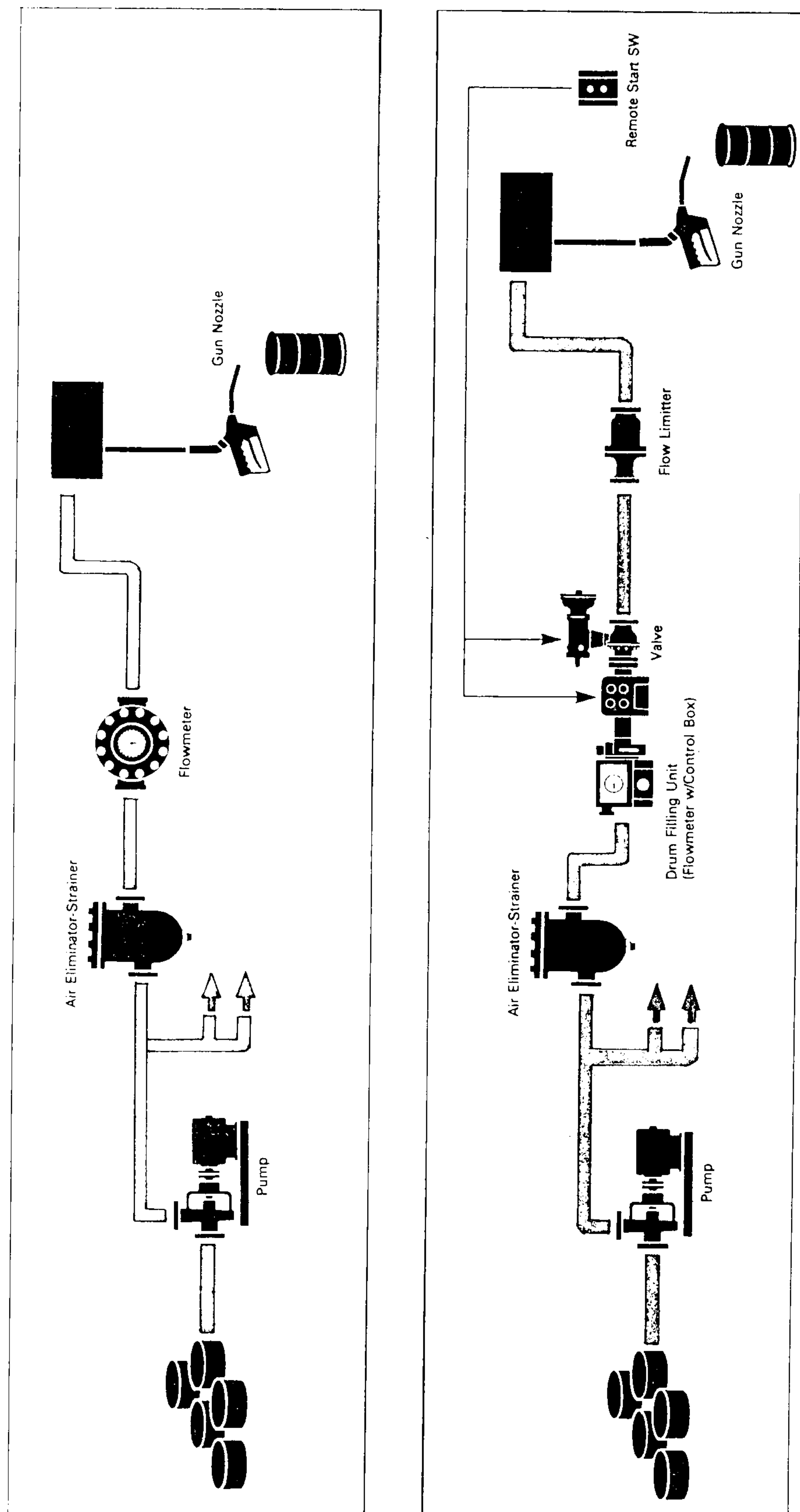
รูป 116 ลักษณะรูปแบบการติดตั้งวาล์วควบคุมการไหลสำหรับจ่ายผลิตภัณฑ์ทางรถยนต์



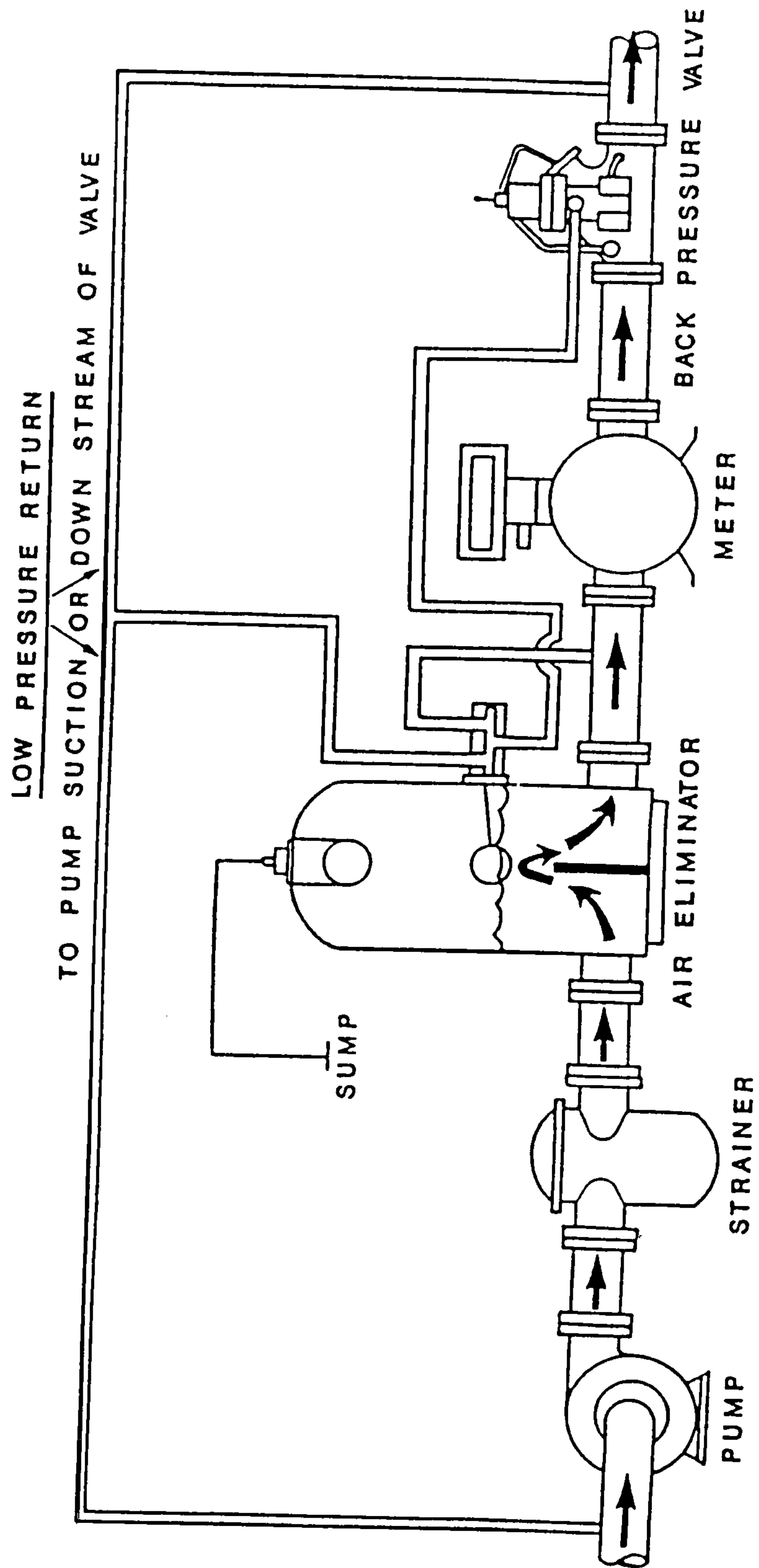
รูป 117 ระบบการติดตั้งอุปกรณ์มาตรฐานสำหรับการผลิตสินค้าทางรถยนต์และรถไฟ



รูป 117(ต่อ) ระบบการติดตั้งอุปกรณ์และมาตรวัดสำหรับการจ่ายผลิตภัณฑ์รูปแบบต่างๆทั้งทางรถไฟ รถยนต์ และการบรรจุถัง



รูป 117(ต่อ) ระบบการติดตั้งอุปกรณ์และมาตรวัดสำหรับการจ่ายผลิตภัณฑ์รูปแบบต่างๆทั้งทางรถไฟ
รถยนต์ และการบรรจุถัง



Rail Car and Road Tanker Off-Loading

ความดัน P3 และความดัน P3- ก็จะไม่ต่อเนื่องกับความดันทางออกของวาล์วควบคุมการไหล P2 ณ ตำแหน่งนี้วาล์วควบคุมการไหลจะยอมให้ของเหลวไหลผ่านด้วยอัตราการไหลด้วยอัตราไหลที่กำหนดไว้ จนกว่าจะมีสัญญาณจากชุดควบคุมกำหนดให้โซลินอยด์วาล์ว (solenoid valve) ทำงานอีกครั้งหนึ่งเพื่อที่จะทำให้วาล์วควบคุมการไหลปิดหรือเปิดต่อไป

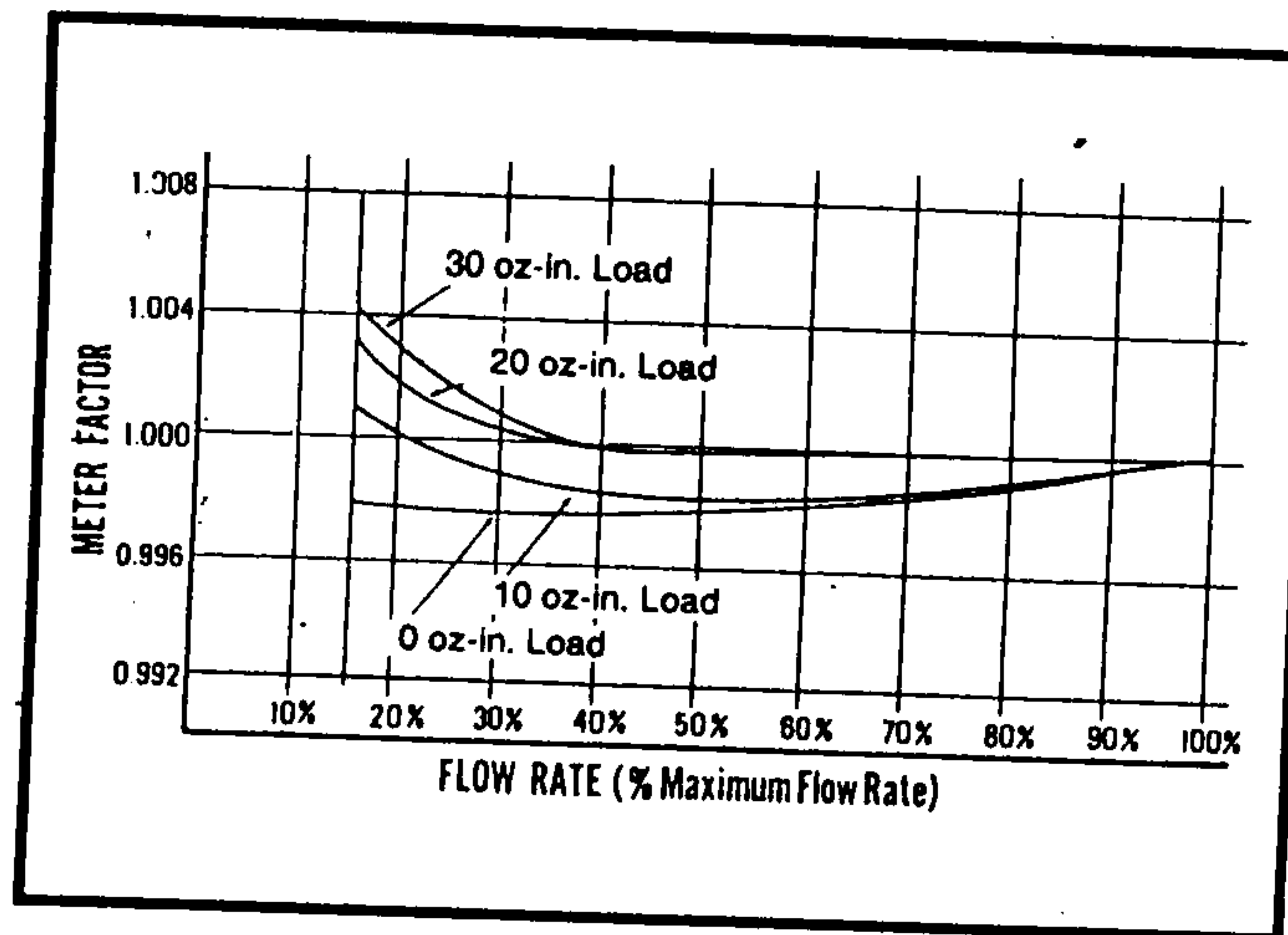
อุปกรณ์เสริม (Ancillary Components)

1. ตัวกำเนิดพัลส์ (Pulse Generator) เมื่อต้องการอ่านค่าหรือพิมพ์ค่าปริมาตรที่วัดได้ในระยะที่ห่างจากตัวมาตรวัด เช่นในห้องควบคุมเป็นต้น สามารถกระทำได้โดยใช้ตัวกำเนิดสัญญาณพัลส์อิเล็กทรอนิกส์ (electronic pulse generator) โดยสัญญาณพัลส์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งผลิตออกมาจะถูกส่งไปยังอุปกรณ์ซึ่งจะแปลงสัญญาณดังกล่าวเป็นค่า หน่วยของปริมาตร นั่นคือจำนวนพัลส์ที่ผลิตออกมาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาตรของเหลวไหลผ่านมาตรวัด

P.D. Meter ในปัจจุบันได้พัฒนาการผลิตสัญญาณพัลส์ออกมาโดยใช้วิธีการคล้ายกับเทอร์ไบน์มิเตอร์ รูป 112 โดยติดตั้งแผ่นดิสก์เซาะร่องเข้ากับโรเตอร์หรือเพลาด้านทางออกโรเตอร์ ซึ่งแผ่นดิสก์เซาะร่องนี้จะหมุนด้วยความเร็วรอบเท่ากับเพลารอเตอร์ ตัวรับสัญญาณ (pick-off coils) ซึ่งติดตั้งอยู่ในตำแหน่งใกล้กับแผ่นดิสก์เซาะร่องและทำการผลิตสัญญาณพัลส์เป็นสัดส่วนกับปริมาตรของเหลวไหลผ่านมาตรวัด ซึ่งในทางปฏิบัติต้องจัดให้มีมาตรการรักษาความปลอดภัยสัญญาณพัลส์ที่ผลิตออกมาไม่ให้เปลี่ยนแปลงแก้ไข เช่นติดตั้งตัวรับสัญญาณ (pick-off coils) จำนวน 2 ตัวให้อยู่ในตำแหน่งต่างกัน 90 องศาเฟส (90° out-of-phase) (รูป 112)

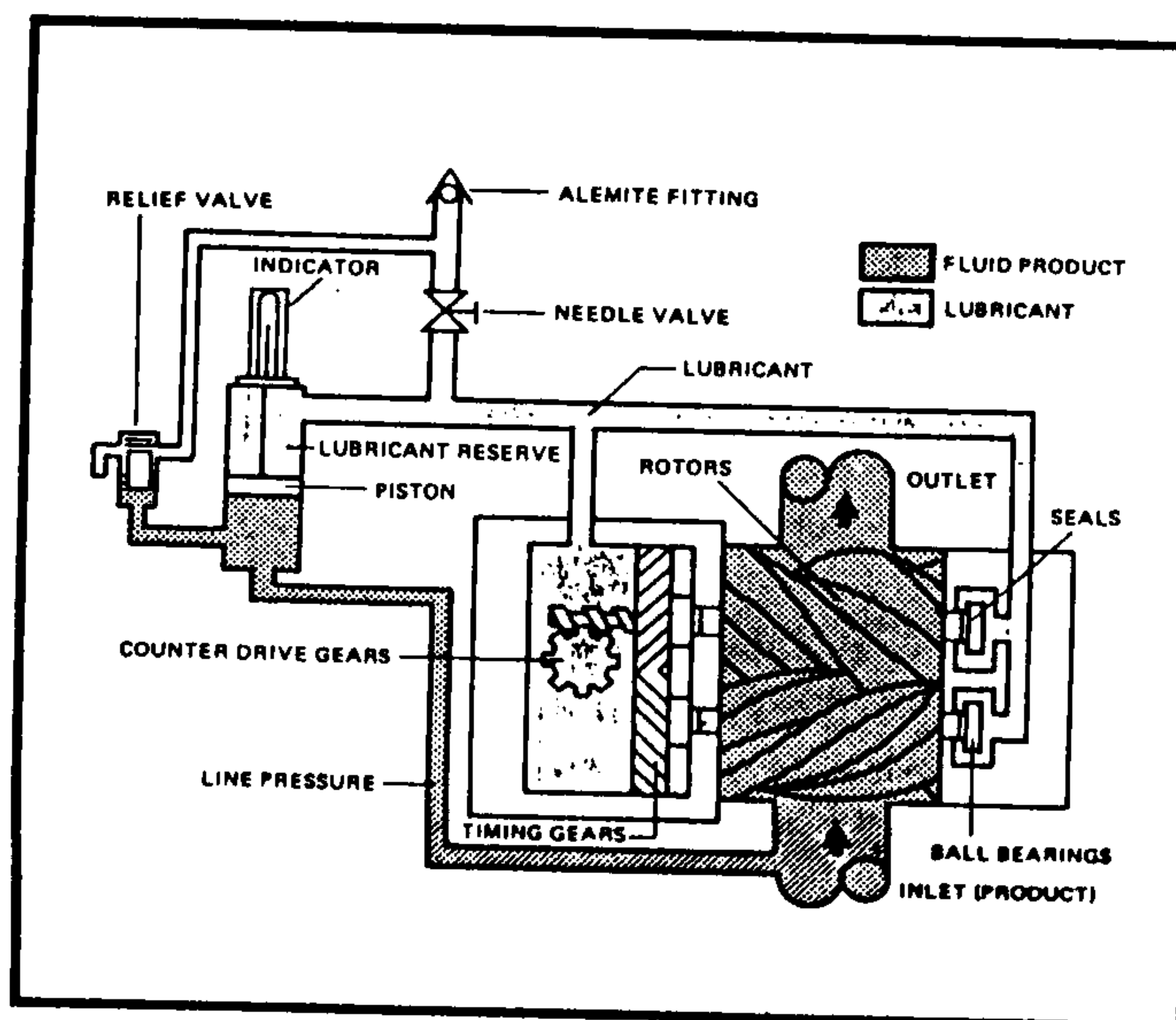
การทำงานของมาตรวัดชนิดมีตัวกำเนิดสัญญาณพัลส์ยังคงมีลักษณะเหมือนกับ P.D. Meter ทั่วไปเพียงแค่การแสดงผลค่าและการแก้ไขค่าจะกระทำด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งทำให้มีข้อดีที่น่าสนใจคือ

- **แรงบิดน้อยมาก (extremely low torque)** ระยะช่องว่างระหว่างส่วนเคลื่อนที่ (moving parts) กับส่วนอยู่กับที่ (stationary parts) ของ P.D. Meter โดยปกติแล้วมีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อมีความดันแตกต่างเกิดขึ้นระหว่างช่องว่างดังกล่าว การไหลเสียดลุด (slippage) จะเกิดขึ้น ปริมาณการไหลเสียดลุดนี้เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับแรงบิดซึ่งต้องการไปขับเคลื่อนเพื่องเกียร์ต่อไปยังตัวบันทึกค่าหรืออุปกรณ์อื่นๆที่ต้องการแรงบิดจากเพลาทงออกโรเตอร์ รวมทั้งการสึกหรอของชิ้นส่วนดังกล่าวก็ยังเป็นตัวเสริมให้ต้องการแรงบิดเพิ่มมากขึ้น หากอุปกรณ์เสริมมีส่วนประกอบที่ต้องใช้น้ำมันหล่อลื่นระบบชุดเพื่องเกียร์ต่างๆ รูป 118 ในฤดูหนาวพบว่าความสามารถในการหล่อลื่นของน้ำมันหล่อลื่นดังกล่าวจะมีผลให้เพิ่มแรงบิดเป็นภาระเพิ่ม ดังนั้นไม่ว่าปัจจัยใดๆที่มีผลไปเพิ่มแรงบิดให้กับเพลาทงออกโรเตอร์ก็จะมีผลกระทบต่อสมรรถภาพของมาตรวัด แต่สามารถลดผลกระทบดังกล่าวได้ในมาตรวัดซึ่งมีตัวผลิตสัญญาณพัลส์ (pulse type P.D. Meter)



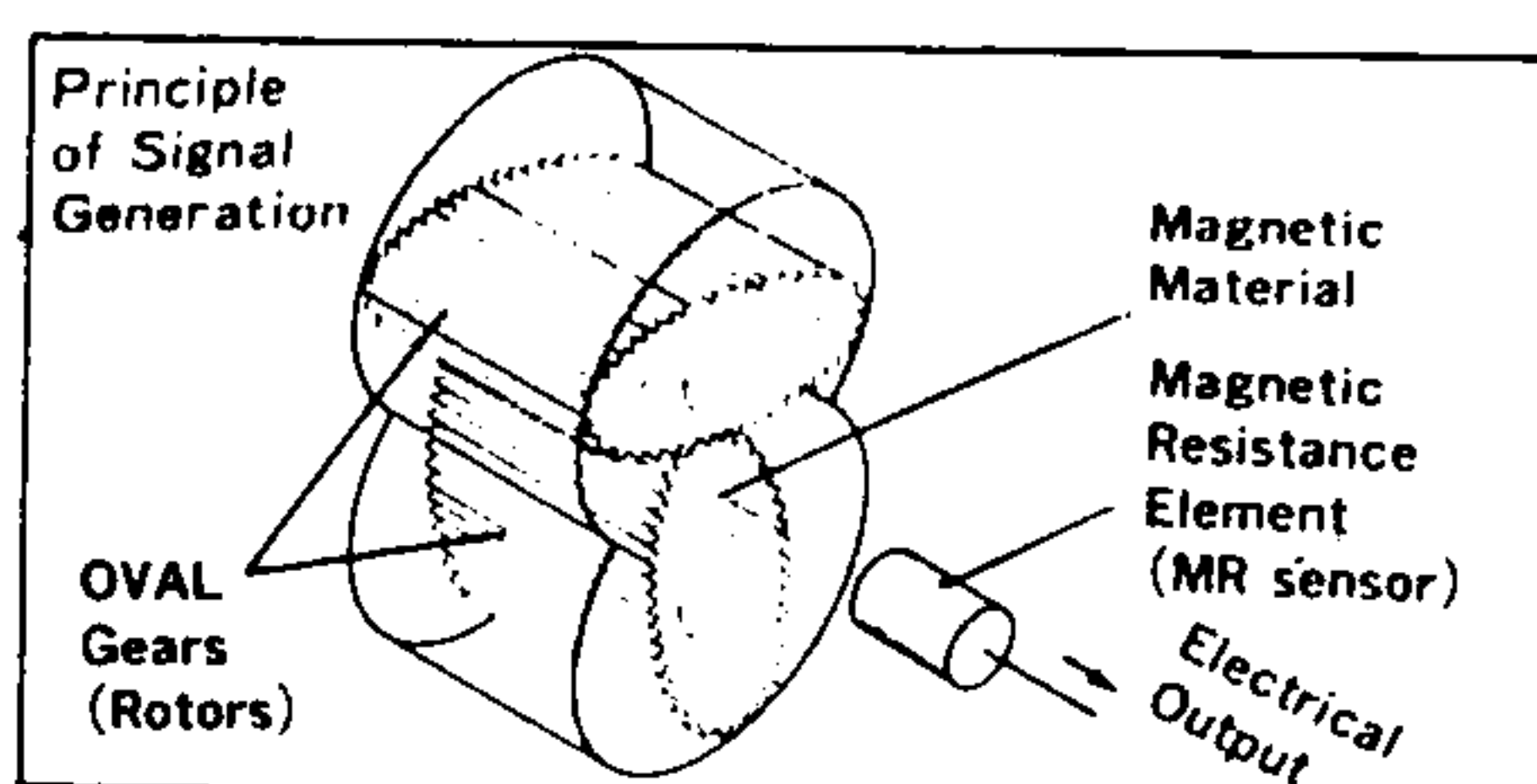
Torque Load and Meter Accuracy

รูป 118 ภาระแรงบิดและความแม่นยำของมาตรวัด P.D.



Automatic Pressure Lubricated System

รูป 119 ระบบหล่อลื่นอัตโนมัติของมาตรวัด P.D. (Automatic Pressure Lubricated System)



รูป 120 การใช้ตัวกำเนิดพัลส์กับมาตรวัด P.D.

- **การเปลี่ยนแปลงความถี่พัลส์ต่ำ (low pulse-frequency variation)** พบว่าสัญญาณพัลส์ซึ่งผลิตได้โดยตรงจากเพลททางออกโรเตอร์จะไม่แสดงให้เห็นถึงปัญหาที่เกิดจากการเลื่อมของเกียร์ (gearing backlash) หรือ cyclic calibration ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญเมื่อทำการสอบเทียบกับ compact prover เพราะความถี่สัญญาณพัลส์มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

- **ความยืดหยุ่นในการใช้งาน (flexibility)** มาตรวัดซึ่งมีตัวผลิตสัญญาณพัลส์ (pulse type P.D. Meter) สามารถต่อพ่วงเข้ากับอุปกรณ์เครื่องมือวัดได้หลากหลาย อีกทั้งสามารถเป็นทางเลือกทดแทนเทอร์ไบน์มิเตอร์หากของเหลวที่ทำการวัดอยู่มีความหนืดสูงกว่าช่วงการทำงานได้ของเทอร์ไบน์มิเตอร์ นับว่าเป็นทางออกอีกวิธีหนึ่ง

- **ลดค่าบำรุงรักษา (reduced maintenance)** ประหยัดค่าใช้จ่าย

ตัวกำเนิดพัลส์ (pulse generator) อาจจะติดตั้งถาวรอยู่บนมาตรวัดหรือจะเป็นแบบชั่วคราวเฉพาะเมื่อทำการสอบเทียบมาตรวัด สำหรับกรณีที่มาตรวัดมีตัวชดเชยอุณหภูมิ (temperature compensator) ตัวกำเนิดพัลส์ (pulse generator) มักจะอยู่ในตำแหน่งก่อนตัวชดเชยอุณหภูมิด้วยเหตุนี้สัญญาณพัลส์ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาตรของเหลวที่ยังไม่ได้ถูกปรับค่าด้วยตัวชดเชยอุณหภูมิ (indicated volume) แต่อย่างไรก็ตามสัญญาณพัลส์ก็อาจจะแสดงถึงค่าปริมาตรของเหลวที่ได้รับการปรับค่าชดเชยอุณหภูมิมาตรฐานหรือสถานะมาตรฐานก็อาจเป็นไปได้ ดังนั้นในภาคสนามจำเป็นต้องทำการตรวจสอบให้แน่ชัดจนเสียก่อนหากทำการสอบเทียบ (proving) มาตรวัด

หากต้องการให้มาตรวัดสามารถอ่านค่าได้ละเอียดสูง (high resolution) ผู้ผลิตมาตรวัดส่วนใหญ่จะใช้วิธีการทศจุดเฟืองเกียร์ด้วยอัตราส่วนการทดที่สูงดังนั้นผลของการอ่านค่าที่วัดได้จึงไม่ค่อยจะมีความแม่นยำเนื่องจากชุดเฟืองเกียร์มีการเลื่อมล่า (backlash) ถึงแม้จะมีการปรับค่าเครื่องนับชนิดกลไกก็อาจจะเป็นสาเหตุก่อให้เกิดพัลส์ปลอม (spurious pulse) ผลที่จะตามมาระบบตัวกำเนิดพัลส์ (Pulse Generator) อาจจะหยุดทำงานลงได้หรือทำงานได้ไม่ถูกต้อง

ในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ของเหลวเกิดขึ้นภายในมาตรวัดอันเนื่องจากอุณหภูมิของเหลวมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีการรั่วของวาล์วกันกลับ (non-return valves) เครื่องบันทึกการรวมชนิดห่านไก (reote totalizer) ก็จะทำการนับปริมาตรดังกล่าวทันทีก็เพราะว่าเมื่อส่วนวัดปริมาตร (measuring element) ของมาตรวัดมีการเคลื่อนที่ สัญญาณพัลส์ก็จะถูกผลิตออกมาทันทีไม่ว่าจะถึงว่าส่วนวัดปริมาตรของมาตรวัดจะหมุนไปในทิศทางใด สิ่งที่ต้องคำนึงอีกอย่างหนึ่งในเมื่อทำการติดตั้งตัวกำเนิดพัลส์ (pulse generator) แบบชั่วคราว แรงบิดที่ต้องการสำหรับขับตัวกำเนิดพัลส์ควรมีค่าน้อยมากๆเพื่อที่จะไม่ไปเพิ่มแรงบิดให้กับโรเตอร์ของมาตรวัด

ในกรณีตัวปรับความเที่ยง (calibrator) เป็นแบบกลไกทางกลแต่ในขณะเดียวกันตัวแปลงสัญญาณพัลส์ (scaler) เป็นชนิดอิเล็กทรอนิกส์ เราจำเป็นต้องหาตัวแปลงสัญญาณพัลส์ชนิดที่สามารถทำการปรับค่าให้กับ meter error ได้ด้วย

สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ หากระบบตัวกำเนิดพัลส์ (pulse generator) ถูกนำมาใช้กับมาตรวัดการออกแบบแนวการเดินสายสัญญาณพัลส์ระหว่างตัวมาตรวัดกับตัวแปลงสัญญาณพัลส์ควรกระทำ

ให้รัดกุมเพื่อที่ลดปัญหาการเกิดสัญญาณปลอม (spurious pulse) จากการรบกวนของสัญญาณคลื่นเสียง (eletronic noise) ซึ่งผลิตจากสายเคเบิลหรืออุปกรณ์เครื่องมือในบริเวณใกล้เคียง

2. Set-Stop Valves เมื่อผู้ปฏิบัติงานต้องการตั้งค่าล่วงหน้าปริมาตรที่จ่ายแน่นอนค่าหนึ่งที่จะทำการจ่ายลงรถหรือรถไฟบรรทุกผลิตภัณฑ์ เขาสามารถทำได้โดยการตั้งค่าปริมาตรการจ่ายที่ pre-set batch counter ซึ่ง เป็นอุปกรณ์ที่จะหยุดการจ่ายผลิตภัณฑ์ ณ.ที่ตำแหน่งปริมาตรที่เลือกตั้งค่าไว้แน่นอนอย่างอัตโนมัติ โดยระบบควบคุมจะสั่งให้ set-stop valves ปิดลง ดังนั้น set-stop valves จึงทำหน้าที่หลายอย่างด้วยกันคือป้องกันมาตรวัดเพิ่มความเร่งหรือความหน่วงการหมุนอย่างรวดเร็วเกินไปโดยทำการลดความดันสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (pressure surge หรือ pressure shock) ภายในมาตรวัดให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่มาตรวัดและอุปกรณ์ต่างๆที่อยู่ภายในระบบท่อสามารถทนได้

set-stop valves ปกติแล้วจะเปิดด้วยความเร็วที่ควบคุมและจะปิดด้วยอัตราควบคุมอีกเช่นกัน โดยปกติจังหวะการปิดจะมี 2 จังหวะด้วยกัน ลักษณะการทำงานของวาล์วชนิดนี้จะใช้วิธีการชักนำและเปลี่ยนทิศทางความดันผลิตภัณฑ์ของเหลวเข้ามาภายในบริเวณส่วนหัวของวาล์วเพื่อที่จะทำให้วาล์วเปิด ปิด หรือหรี ด้วยเหตุนี้ความเร็วที่วาล์วชนิดนี้เปิดหรือปิดจึงขึ้นอยู่กับความดันผลิตภัณฑ์ของเหลว ในการปรับแต่งการเปิด - ปิด หรือหรี จึงกระทำกันในภาคสนามขณะทำงานทดสอบการทำงานของระบบการวัดทั้งหมดเพื่อที่จะได้รู้ค่าความดันของผลิตภัณฑ์จริงๆที่เกิดขึ้น

เห็นได้ชัดเจนว่าการทำงานของวาล์วจึงขึ้นอยู่กับความดันผลิตภัณฑ์ภายในท่อ ณ.เวลาที่มีการกระตุ้นวาล์วให้ทำงาน ด้วยเหตุนี้ในกรณีที่ระบบการวัดหนึ่งมีปั๊มจำนวน 1 ตัวต่อมาตรวัดจำนวน 1 ตัว การเปลี่ยนแปลงความดันภายในระบบท่อจะไม่มีผลต่อการทำงานของวาล์ว แต่หากว่าใช้ปั๊ม 1 ตัวสำหรับมาตรวัดหลายตัวเช่นจำนวน 3 ตัวเป็นต้น ความดันภายในระบบท่อก็จะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่กว้างมากทีเดียว ส่งผลให้มีผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัด 2 ทางด้วยกันคือ ช่วงเวลาการปิด - เปิด วาล์วจะขยายออกไปเนื่องจากการลดลงของความดันภายในระบบท่อ ส่งผลให้ช่วงเวลาการไหลหลัก (main-flow) ที่เปิดวาล์วเพื่อให้ของเหลวไหลให้เต็มทีลดลง มิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) ก็อาจจะไม่เป็นตัวแทนในการปรับค่าของช่วงการจ่ายโดยสมบูรณ์ อีกทั้งปัญหาหนึ่งคือ เมื่อความดันภายในระบบท่อของผลิตภัณฑ์ลดต่ำลง การปิดของวาล์วในช่วงท้ายของการจ่ายผลิตภัณฑ์ก็ยังล่าช้าลง ทำให้มีการจ่ายผลิตภัณฑ์ออกไปมากกว่าค่าที่ตั้งไว้

สมรรถนะมาตรวัด P.D.

(Meter Performance)

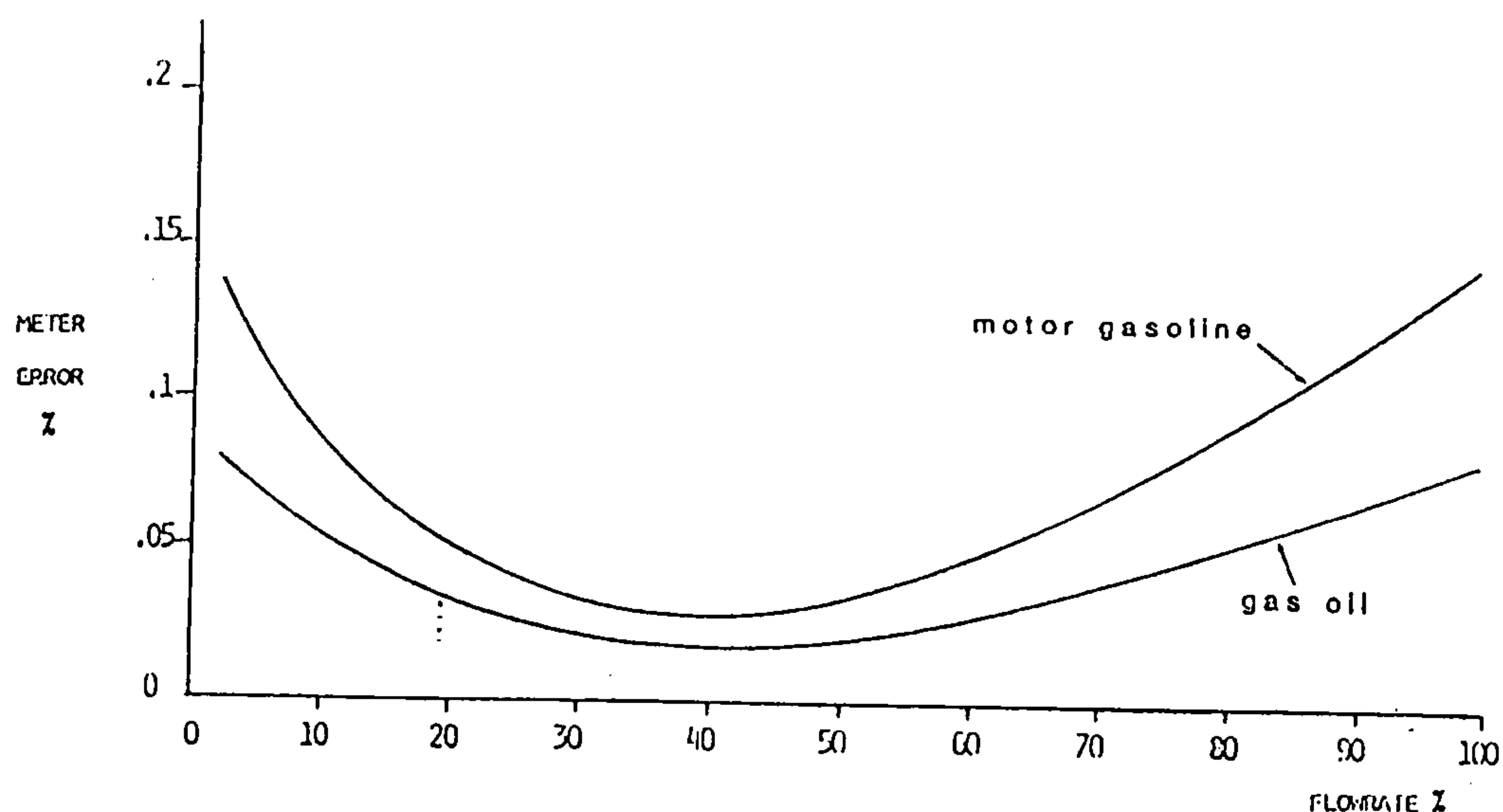
มาตรวัดในอุดมคติจะเป็นมาตรวัดที่ไม่มีการไหลล้น (slippage) ของเหลวผ่านมาตรวัดไม่ว่าที่อัตราการไหลใดๆ โดยปราศจากการบันทึกค่าจากเครื่องนับหรือเครื่องบันทึกค่า นั่นหมายความว่ามาตรวัดต้องไม่มีความเสียดทานและความดันตกคร่อม (pressure drop) ขณะทำงาน เพลาทางออกมาตรวัด (output shaft of measuring element) จะหมุนด้วยความเร็วสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรงเมื่อเทียบกับปริมาณที่ไหลหรืออัตราการไหลผ่านมาตรวัด โดยไม่ขึ้นกับค่าความหนืด , อุณหภูมิ , ความดัน , อัตราการไหล , ความสามารถในการหล่อลื่น (lubricity) ของเหลว และปัจจัยอื่นๆ แต่ในทางปฏิบัติจริงๆ แล้วชิ้นส่วนของมาตรวัดไม่ว่าห้องวัดปริมาตร (measuring chamber) และส่วนวัดปริมาตรต่างๆ (measuring elements) ก็มีการเปลี่ยนแปลงขยายตัวและหดตัวตามสภาวะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันที่กระทำต่อมาตรวัด ดังนั้นการไหลล้น (slippage) ผ่านมาตรวัดจะเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหล , ความหนืด , อุณหภูมิ , ความดัน และ ความเสียดทานของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ต่างๆ

มี P.D. Meter จำนวนน้อยที่มีหลักการทำงานเป็นมาตรวัดแบบ positive displacement meter จริงๆ นั่นคือเป็นมาตรวัดที่ประกอบด้วยซีลชนิด positive seal (ทำหน้าที่กั้นของเหลวภายในมาตรวัดด้วยวัสดุซึ่งทำด้วยวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงจริงๆ ไม่ได้อาศัยปรากฏการณ์ใดๆ ช่วยในการซีล) แต่ P.D. Meter ส่วนใหญ่จะมีระบบซีล เป็นแบบ capillary seal หลักการทำงานอาศัยปรากฏการณ์ capillary โดยจะสร้างความตึงผิวหน้า (surface tension) ของแผ่นฟิล์มของเหลวซึ่งติดอยู่ระหว่างผิวหน้า 2 ชิ้นงานเพื่อป้องกันการไหลของเหลวออกจากห้องวัดปริมาตรเมื่อทำการแบ่งแยกปริมาตรของเหลวเป็นค่าแน่นอนออกเป็นส่วนๆ เท่าๆ กัน ยกตัวอย่างเช่น มาตรวัดชนิด rotary sliding vane meter แผ่นฟิล์มของเหลวซึ่งติดอยู่ระหว่างผิวหน้า 2 ชิ้นได้แก่ ช่องว่างระหว่างปลายแผ่นเวน (vane tips) กับตัวเรือนมาตรวัด (meter body)

แต่อย่างไรก็ตามการทำงานของ capillary seal ก็ไม่สมบูรณ์แบบครบถ้วนทุกประการยังพบว่าประสิทธิภาพการทำงานจะสูงขึ้นเมื่อความหนืดของเหลวสูง และประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อความหนืดของเหลวต่ำ ด้วยเหตุนี้ P.D. Meter จึงมีแนวโน้มที่จะทำงานได้ดีขึ้นเมื่อใช้กับการวัดของเหลวซึ่งมีความหนืดสูงดังรูป 121 จากการทดลองแสดงให้เห็นว่ามาตรวัดตัวเดียวกันแต่เมื่อใช้วัดการไหลของเหลวที่มีความหนืดซึ่งมีค่าแตกต่างกัน พบว่าค่า meter error สำหรับของเหลวที่มีความหนืดน้อยกว่าจะมีค่ามากกว่าของเหลวที่มีความหนืดมากกว่า สาเหตุที่ค่า meter error เพิ่มขึ้นโดยภาพรวมทั้งหมดอธิบายได้ว่าการไหลล้นของเหลวผ่านมาตรวัดมากขึ้นเมื่อของเหลวมีความหนืดน้อยลง แต่นั่นก็ไม่ใช่สาเหตุเพียงประการเดียวยังมีอีกหลายสาเหตุด้วยกัน แต่ถ้าหากว่า meter error เพิ่มขึ้นเนื่องจากการไหลล้นของเหลวเพียงปัจจัยเดียวจริงๆ เป็นสิ่งที่ง่ายต่อการแก้ไขให้มีค่า meter error น้อยลงด้วยการทำการสอบเทียบ (proving) ใหม่ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงลักษณะเส้นกราฟ

(รูป 121) จะเห็นได้ว่ากราฟทั้ง 2 เส้นมีค่า meter error เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วที่บริเวณด้านปลายทั้ง 2 ข้างของช่วงอัตราไหล เหตุที่เส้นกราฟทั้ง 2 เบี่ยงเบนไปจากลักษณะความเป็นเชิงเส้นมาตรวัด (meter linearity) สามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออัตราไหลต่ำๆ ความเสียดทานของกลไกภายในตัวมาตรวัดมีแนวโน้มที่จะหน่วงการหมุนของโรเตอร์หรือส่วนวัดปริมาตร อีกทั้งของเหลวที่มีความหนืดต่ำกว่า (ได้แก่ motor gasoline) จะมีแนวโน้มที่จะไหลเล็ดลอดผ่านช่องว่าง (clearance) เมื่อโรเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบต่ำๆ ได้เร็วกว่าของเหลวซึ่งมีความหนืดสูงกว่า (ได้แก่ gas oil) แต่เมื่ออัตราไหลเพิ่มสูงขึ้นความดันตก (pressure drop) คร่อมตัวมาตรวัด โดยเฉพาะความดันแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเวนแต่ละแผ่นภายในมาตรวัดชนิด rotary sliding vane meter จะมีแนวโน้มที่จะดันของเหลวซึ่งมีความหนืดต่ำกว่าให้ไหลผ่านช่องว่างได้รวดเร็วกว่าของเหลวซึ่งมีความหนืดสูง ด้วยเหตุนี้เมื่ออัตราไหลเพิ่มขึ้นสูงๆ ค่า meter error จึงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและจะชัดเจนมากขึ้นเมื่อเป็นของเหลวซึ่งมีค่าความหนืดต่ำ

CHANGE IN METER PERFORMANCE CAUSED BY VARIATIONS IN PRODUCT VISCOSITY



รูป 121 การเบี่ยงเบนสมรรถนะของมาตรวัดเนื่องจากความหนืดผลิตภัณฑ์

ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของมาตรวัด P.D. Meter

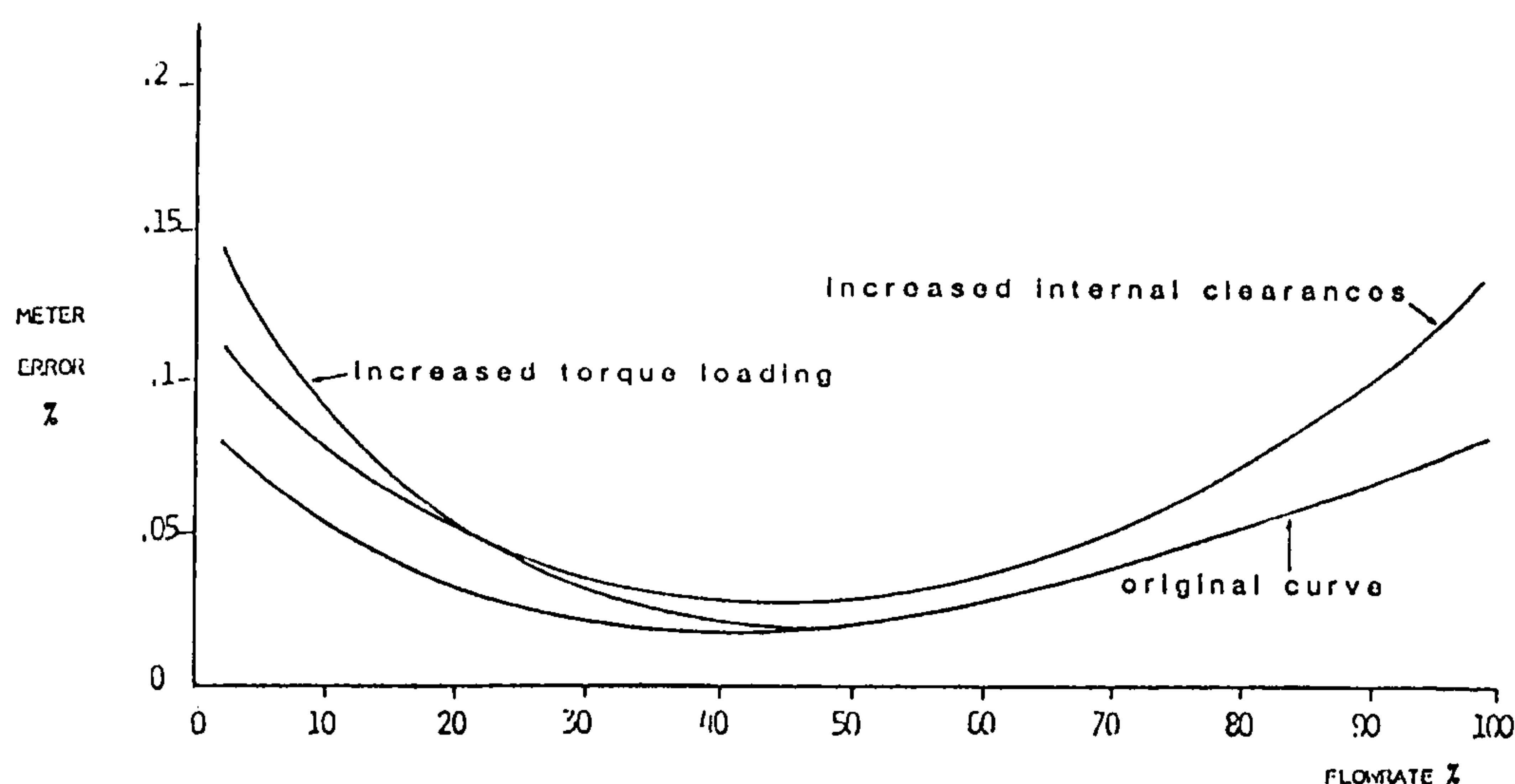
1. อุณหภูมิของเหลว (Liquid Temperature) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเหลวไหลผ่านมาตรวัดจะมีผลกระทบต่อชิ้นส่วนหลักของมาตรวัด ได้แก่ ห้องวัดปริมาตร , ส่วนวัดปริมาตร และตัวปรับความเที่ยง ให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ผลที่ตามมาสมรรถนะของมาตรวัดจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่นกัน

- **การขยายตัวของห้องวัดปริมาตรและส่วนวัดปริมาตร** (*Expansion of the measuring chamber and measuring elements or rotor*) เมื่ออุณหภูมิของเหลวไหลผ่านมาตรวัดเปลี่ยนแปลงพบว่าห้องวัดปริมาตรและส่วนวัดปริมาตรจะมีการเปลี่ยนยืดยาวหรือหดตัว ส่งผลให้ปริมาตรต่อรอบการหมุนของส่วนวัดปริมาตรเปลี่ยนแปลง ผลตามมาจะทำให้มีเตอร์แฟกเตอร์ (meter factor) และ meter error เปลี่ยนแปลงตามทันที

ยกตัวอย่าง มาตรวัดประกอบด้วยตัวเรือนมาตรวัดและส่วนวัดปริมาตรหรือโรเตอร์ ทำด้วยวัสดุเหล็กหล่อ (cast steel) ห้องวัดปริมาตรอาจเปลี่ยนแปลงปริมาตรไปประมาณ 0.02% ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 5 °C แต่ถ้าหากตัวเรือนมาตรวัดทำด้วยเหล็กหล่อเหมือนเดิมแต่ทำการเปลี่ยนส่วนวัดปริมาตรทำด้วยอลูมิเนียม ปริมาตรของห้องวัดปริมาตรอาจเปลี่ยนแปลงลดลงเหลือประมาณ 0.006 % ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 5 °C ดังนั้นหากจำเป็นต้องเลือกมาตรวัดเพื่อใช้งานกับของเหลวซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อนข้างมากก็ควรพิจารณาวัสดุที่ใช้ในส่วนประกอบของมาตรวัดซึ่งก่อนข้างมีค่าการขยายตัว (thermal expansion coefficient) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก่อนข้าง หรือทำการปรึกษากับบริษัทผู้ผลิตเพื่อขอคำแนะนำ

- **ช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนเปลี่ยนแปลง** (*changing in working clearances*) โดยเฉพาะช่องว่างระหว่างปลายแผ่นวนกับตัวเรือนมาตรวัด การขยายตัวและการหดตัวของแผ่นวน (vanes หรือ blades) ทำให้ไปเปลี่ยนแปลงระยะช่องว่างระหว่างผิวหน้าส่วนที่เคลื่อนที่กับผิวหน้าอยู่กับที่ของมาตรวัด ส่งผลให้มีการไหลเล็ดลอดผ่านมาตรวัดเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน (ดูรูป 122)

DETERIORATION IN METER PERFORMANCE CAUSED BY WEAR AND MECHANICAL DAMAGE

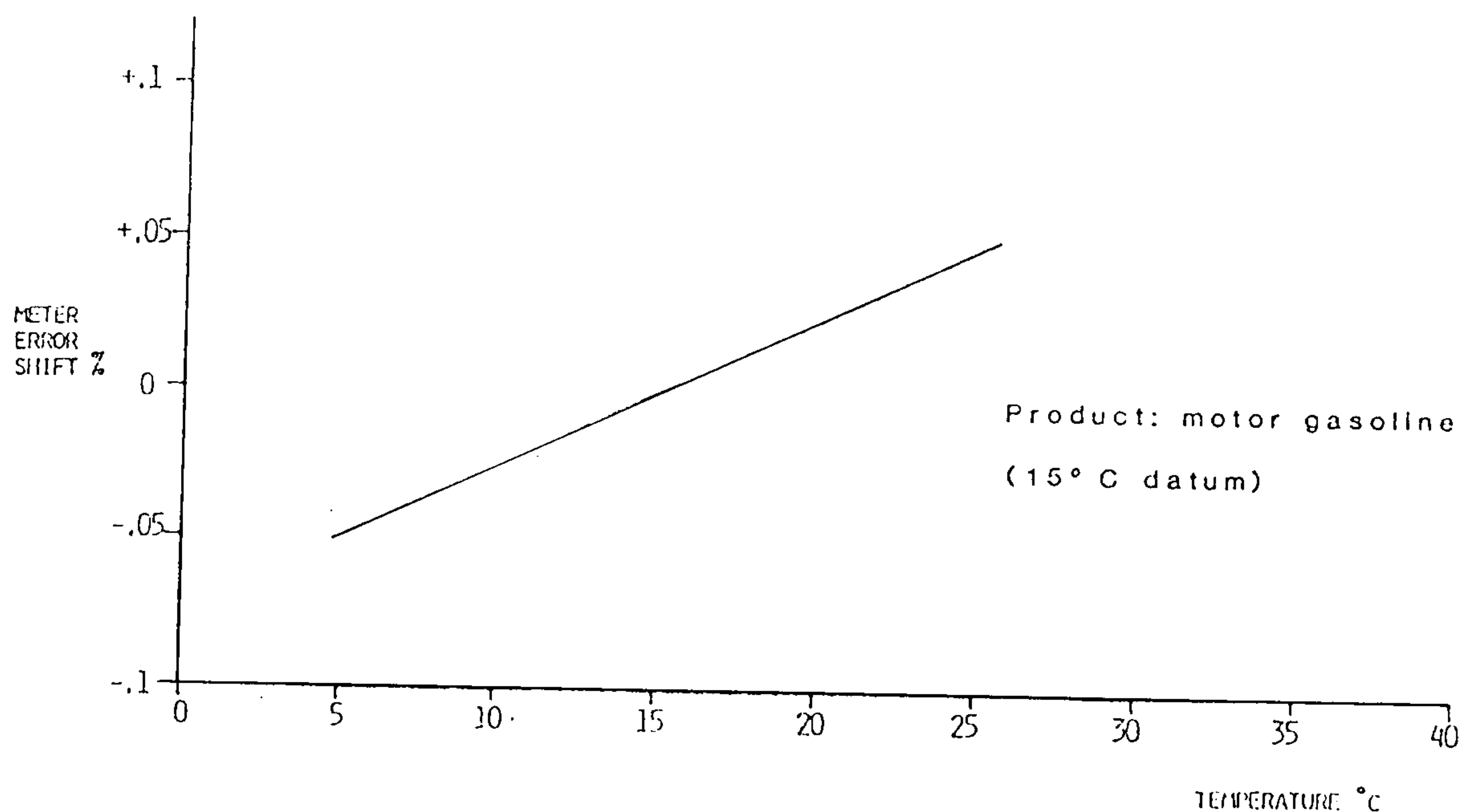


รูป 122 การเสื่อมสมรรถนะของมาตรวัดเนื่องจากการสึกหรอของชิ้นส่วน

- **ค่าความหนืดของเหลว (product viscosity)** ความหนืดของเหลวเป็นคุณสมบัติของเหลวที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ จะอธิบายถึงผลกระทบต่อสมรรถนะของมาตรวัดเนื่องจากอิทธิพลของความหนืดในหัวข้อถัดไป

จากผลกระทบและการเปลี่ยนแปลงที่ได้กล่าวมาอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเหลวไหลผ่านมาตรวัดเมื่อเกิดรวมจะก่อให้เกิดมาตรวัดมีค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) และ meter error เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิดังเช่นในรูป 123 ซึ่งเป็นเพียงตัวอย่างหนึ่งเท่านั้นแต่ถ้าจะให้รู้แน่ชัดว่ามาตรวัดแต่ละรุ่นต้องทำการทดลองแยกออกไปหรือสามารถหาข้อมูลได้จากบริษัทผู้ผลิต ด้วยเหตุนี้จึงเห็นได้ชัดเจนว่าการเปลี่ยนแปลงช่วงอุณหภูมิของแต่ละฤดูกาลจึงมีผลค่อนข้างมากต่อการเปลี่ยนแปลงมิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) ตลอดช่วง 12 เดือน เพื่อที่จะแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลงค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) จำเป็นต้องทำการสอบเทียบมาตรวัดเป็นระยะทุก 6 เดือนหรือทุก 3 เดือนเพื่อลดอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้เหลือเฉพาะอิทธิพลของการสึกหรอของชิ้นส่วนมาตรวัดเท่านั้นที่จะมีผลกระทบต่อสมรรถนะของมาตรวัด

TYPICAL METER ERROR VARIATION WITH TEMPERATURE



รูป 123 การเปลี่ยนแปลงของ Meter error เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน

2. **ความดันภายในระบบท่อ (line pressure)** สำหรับมาตรวัดชนิด rotating sliding vane meter การเพิ่มความดันภายในมาตรวัดจะทำให้ตัวเรือนมาตรวัดขยายตัว ส่งผลให้ห้องวัดปริมาตรเพิ่มสูงขึ้นในขณะเดียวกันก็จะทำให้เพิ่มช่องว่าง (clearances) ระหว่างปลายแผ่นเวนกับตัวเรือนมาตรวัด

อย่างไรก็ตาม โดยปกติแล้วเมื่อทำการวัดการไหลน้ำมันดิบหรือผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมเพื่อการขายหรือเก็บภาษีพบว่าความผิดพลาดของมาตรวัดอันเนื่องจากการขยายตัวของตัวเรือนมาตรวัดมีน้อยมาก ถึงแม้ว่าในสภาวะการณที่มีความดันสูงๆและใช้มาตรวัดแบบตัวเรือน 2 ชั้น (double-case meters) ความดันก็มีผลต่อการเสีรูปและขนาดต่างๆภายในตัวมาตรวัด แต่การเสีรูปทรงดังกล่าวมีน้อยมาก แทบถือได้ว่าไม่ได้รับผลกระทบแต่อย่างใดจากการเปลี่ยนแปลงความดันตกภายในระบบท่อ ถึงแม้ว่าความเสีรูปดังกล่าวของมาตรวัดแบบตัวเรือน 2 ชั้นจะเป็นฟังก์ชันของความดันตกคร่อมตัวมาตรวัดก็ตาม ซึ่งปกติแล้วความดันตกคร่อมมาตรวัดจะมีค่าน้อยมาก

3. ความเสียหายเนื่องจากการสึกหรอและบกพร่องทางกล (wear and mechanical damage)
ปัญหาส่วนใหญ่ที่เป็นผลของการสึกหรอหรือความเสียหายของกลไก พองจะแบ่งออกได้ 2 หัวข้อใหญ่ๆ คือ

- **เพิ่มช่องว่างภายในมาตรวัด (increased internal clearances)** ได้แก่ แผ่นเวนหัก , โรเตอร์หรือส่วนวัดปริมาตรเคลื่อนที่ในแนวแกนเพลลา อิทธิพลและผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับ P.D. Meter เมื่อมีการสึกหรอของชิ้นส่วนภายในมาตรวัดจะมีผลกระทบต่อสมรรถนะของมาตรวัดตลอดช่วงอัตราการไหลทั้งหมดถึงแม้ว่าบริเวณอัตราการไหลต่ำสุดและสูงสุดคือบริเวณปลายเส้นกราฟสมรรถนะของมาตรวัดทั้ง 2 จะค่อนข้างเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและมากกว่าช่วงอัตราการไหลบริเวณอื่นๆ นั้นแสดงให้เห็นเป็นนัยๆว่ามาตรวัดจะมีการจ่ายมากกว่าเป็นจริง (over-delivery) หรือจ่ายน้อยกว่าเป็นจริง (under-read) และจะรุนแรงมากขึ้นเมื่อช่องว่าง (clearances) เพิ่มมากขึ้น นั่นคือการสึกหรอมีมากขึ้น และปรากฏการณ์ดังกล่าวจะมีผลกระทบต่อสมรรถนะของมาตรวัดยิ่งมากขึ้นหากทำการวัดของเหลวซึ่งมีความหนืดน้อยลงไปอีก ด้วยเหตุนี้จึงเป็นการดีหากจะทำการตรวจสอบเป็นระยะเพื่อตรวจสอบสมรรถนะมาตรวัดเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเพียงใดหากมีการเปลี่ยนแปลงมากไปก็จะได้ทำการซ่อมแซมมาตรวัดแล้วทำการสอบเทียบใหม่อีกครั้ง

ถึงแม้เป็นความจริงที่ว่าช่องว่างภายในมาตรวัดยังน้อยและคับแน่น การไหลเล็ดลอดก็ยังน้อยมากแต่ถ้าหากช่องว่างดังกล่าวแน่นจนเกินไปก็จะทำให้เกิดแรงเสียดทานเพิ่มมากขึ้นกับตัวเบริงของโรเตอร์และยังลดระยะเวลาการใช้งานมาตรวัด เพราะฉะนั้นจำเป็นต้องประนีประนอมปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสมรรถนะของมาตรวัดด้วยเช่นกัน

- **เพิ่มภาระแรงบิดให้กับโรเตอร์ (increased torque loading)** ได้แก่ แบริงของโรเตอร์สึกหรอ , ภาระในการขับอุปกรณ์เสริมซึ่งพ่วงต่ออยู่กับเพลลาทางออกโรเตอร์ พบว่าอิทธิพลของการเพิ่มภาระแรงบิดให้กับโรเตอร์หรือส่วนวัดปริมาตรจะมีผลกระทบไปเพิ่ม meter error ให้กับมาตรวัดโดยเฉพาะที่อัตราการไหลต่ำๆ การบำรุงรักษาต้องคอยมันตรวจระดับน้ำมันหล่อลื่นหรืออัดจารบีในส่วนอุปกรณ์เสริมที่ต่อจากเพลลาทางออกโรเตอร์ (stack-up components) จะช่วยลดปัญหาในเรื่องนี้ได้มากทีเดียว อย่างไรก็ตามการเพิ่มแรงบิดให้กับโรเตอร์ก็อาจมาจากสาเหตุชิ้นส่วนภายในตัวมาตรวัดเองอีกด้วย สามารถตรวจสอบได้โดยทำการสอบเทียบมาตรวัดที่อัตราการไหล 20 % ของอัตราการไหลปกติ (normal operational flowrate) จากนั้นทำการเปรียบเทียบ meter error และ

มิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) ซึ่งหากพบว่า ณ.ที่อัตราการไหลปกติสำหรับ P.D. Meter ถ้าหากสถานะกลไกการทำงานปกติไม่มีการสึกหรอพบว่า ผลการเปรียบเทียบควรได้ค่า linearity เท่ากับ 0.1 % ตลอดช่วง 10 : 1 อัตราการหลิวาล์ว (turndown ratio) แต่ถ้าหากผลการเปรียบเทียบระหว่างมิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) ที่อัตราการไหลต่ำกับที่อัตราการไหลปกติ นั้นแสดงให้เห็นว่าภาระแรงบิดที่กระทำต่อเพลารอเตอร์สูงมากเกินไปให้รีบดำเนินการซ่อมแซมแก้ไขและทำการสอบเทียบมาตรวัดใหม่

พอสรุปได้ว่าหากมาตรวัดมีความเสียดทานของกลไกค่านั้นหมายถึงการต่อพ่วงของชุดเฟืองทด , เครื่องบันทึกค่า หรืออุปกรณ์ร่วมอื่นๆซึ่งต้องการแรงบิดจากเพลาทงออกโรเตอร์ต้องการแรงบิดยิ่งน้อย ยิ่งจะทำให้มาตรวัดมีสมรรถนะดีขึ้น มีค่าความเป็นเชิงเส้นตรง (linearity) ดีขึ้นที่อัตราการไหลต่ำๆ

4. อิทธิพลของความหนืดของเหลว (liquid viscosity effects) โดยทั่วไปพบว่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความหนืดของเหลวลดลง

$$Meter.Factor \propto \frac{1}{\mu}$$

อีกทั้งช่วงลักษณะเชิงเส้นตรง (linear range) ของมาตรวัดจะลดลงถ้าหากความหนืดของเหลวลดลง

$$linear.range \propto \frac{1}{\mu}$$

แต่ถ้าหากว่าความหนืดมากกว่า 16 centipoise มิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) ระหว่าง 10 % ถึง 100 % ของอัตราการไหลสูงสุดแทบจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้

5. อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิกับความหนืดต่อมิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) เนื่องจากความหนืดของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิโดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันดิบ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องยากมากที่จะหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างมิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) กับความหนืดให้ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิต่างๆ สำหรับ P.D. Meter ดังจะเห็นได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) กับความหนืดที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งเส้นกราฟจะได้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งมากในบริเวณค่าความหนืดต่ำๆ แต่ในขณะที่เดียวกันกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) กับอุณหภูมิจะได้เส้นกราฟเป็นเส้นตรงมากกว่า

รูปที่ 123 นี้แสดงให้เห็นถึงการทดสอบ P.D. Meter ถึงผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงมิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

สรุปได้ว่าเมื่อทราบค่ามิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) ค่าหนึ่งที่อยู่ค่าอุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งโดยไม่คำนึงถึงค่าความหนืดเป็นไปได้ที่จะทำนายมิเตอร์แฟคเตอร์ (meter factor) ที่อีกอุณหภูมิใดๆได้ด้วย ความถูกต้องภายใต้แน่นอน $\pm 0.04\%$ ด้วยระดับความมั่นใจ 95 %

6. สภาพการไหลไม่อุดมคติ (Non-ideal flow conditions) P.D. Meter จะไม่ไวต่อสภาพการไหลที่ไม่สมบูรณ์อย่างเช่นเทอร์ไบน์มิเตอร์ ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นให้สภาพการไหลก่อนทางเข้า P.D. Meter มีรูปแบบการไหลเป็น turbulent flow อย่างสมบูรณ์เหมือนกับเทอร์ไบน์มิเตอร์ พุทธิกานัยหนึ่งก็คือ ระบบท่อนก่อนทางเข้า P.D. Meter สามารถมีข้ออ , ติดตั้งวาล์ว , ตัวกรอง หรืออุปกรณ์อื่นๆที่จำเป็นโดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งที่ระยะบังคับค่าหนึ่งห่างจากมาตรวัดเหมือนเช่นอย่างเทอร์ไบน์มิเตอร์ P.D. Meter ก็ยังคงสามารถทำงานได้ยอมให้ของเหลวไหลเข้ามาตรวัดและแบ่งของเหลวออกเป็นส่วนๆเป็นค่าที่แน่นอน ทำการนับจำนวนการแบ่งดังกล่าวก่อนปล่อยของเหลวออกไปทางด้านจ่ายของมาตรวัด

อย่างไรก็ตามต้องไม่ให้อากาศหรือไอผสมปนเข้าระบบท่อนอย่างเด็ดขาด เพราะหากฟองอากาศหรือไอหลุดเข้ามาตรวัดจะทำให้มีการบันทึกค่ามากกว่าความเป็นจริง (under-delivery) ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องสิ่งสำคัญที่จะต้องทำการติดตั้งตัวแยกอากาศ (air separator) สำหรับมาตรวัดชนิด P.D. Meter

7. การไหลเล็ดลอดผ่านช่องว่าง (slippage through clearances) ความดันแตกต่างรวมทั้งหมด (total pressure differential) คร่อมช่องว่างส่วนวัดปริมาตร (the measuring element clearance) สามารถกำหนดด้วยสมการ

$$P = P_{HB} + P_{HF} + P_{MF} + P_{VS}$$

เมื่อ

P_{HB} (hydraulic bending) เป็นพลังงานเฉื่อยของเหลวหรือความดันตกที่ต้องเสียไปในการเปลี่ยนทิศทางการไหลเนื่องจากการขยายตัว (expansion) และการหดตัว (contraction) หรือ การโค้งงอของแนวทางการไหลส่วนวัดปริมาตร

P_{HF} (hydraulic friction) พลังงานสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานระหว่างชั้นของเหลวกับผนังห้องวัดปริมาตร และ ของเหลวกับผิวตัวโรเตอร์

P_{MF} (mechanical friction) พลังงานที่สูญเสียไปให้กับแรงบิดขับเคลื่อนกลไกเพื่อเอาชนะความเสียดทานเชิงกลในแบร์ริงมาตรวัด , ชุดเฟืองเกียร์ , เครื่องนับและอุปกรณ์ร่วมอื่นๆที่ต้องการการขับเคลื่อนแรงบิด

P_{VS} (viscous shear) พลังงานสูญเสียไปให้แรงบิดขับเคลื่อนกลไกเพื่อเอาชนะแรงบิดหนืดเนื่องจากความหนืด (viscous drag torque) ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าส่วนเคลื่อนที่เนื่องจากความเค้นหนืด (viscous shear stress) ที่เกิดขึ้นช่องว่างระหว่างผิวหน้าเคลื่อนที่และผิวหน้าอยู่กับที่

เมื่ออัตราการไหลสูงสำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำ P_{HB} , P_{HF} จะเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญและเด่น เป็นตัวปัจจัยหลักที่จะก่อให้เกิดความดันแตกต่างรวมทั้งหมด (P)

แต่ถ้าหากอัตราการไหลต่ำ P_{MF} (mechanical friction) จะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าความดันแตกต่างรวมทั้งหมด (P) ของมาตรวัด ในขณะที่เดียวกันหากของเหลวมีความหนืดสูง P_{VS} (viscous shear) จะเป็นปัจจัยเด่นที่มีผลต่อค่าความดันแตกต่างรวมทั้งหมด (P)

กราฟแสดงความแม่นยำ ของมาตรวัดจึงเป็นผลรวมของอิทธิพลผลกระทบทั้งหมดจากปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวมาข้างบน โดยผลรูปร่างของกราฟของผลรวมสะสมที่ประมาณ 40 % ของอัตราการไหล ส่วนใหญ่เป็นผลมาจาก P_{HB} (hydraulic bending) และ P_{HF} (hydraulic friction)

แต่ที่อัตราการไหลต่ำๆ (น้อยกว่า 40 %) รูปร่างของกราฟส่วนใหญ่เป็นผลมาจาก P_{MF} (mechanical friction) แต่ในขณะเดียวกัน P_{VS} (viscous shear) แทบจะไม่มีผลกระทบต่อรูปร่างของเส้นกราฟแม่นยำนี้เลย

การเลือกและการติดตั้ง Positive Displacement Meter

เพื่อให้ได้มาตรวัดสามารถทำการวัดปริมาตรของเหลวได้เหมาะสมที่สุดและมีอายุการใช้งานยาวนานที่สุด ข้อควรพิจารณาในการเลือกมาตรวัดเพื่อใช้งานการวัดปริมาตรดังกล่าวจึงเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสนใจให้มากเป็นพิเศษ ทั้งนี้เพราะเราจะไม่ได้รับคุณภาพของการวัดที่ดีหากขาดการใส่ใจให้ความสำคัญในการพิจารณาปัจจัยต่างๆซึ่งมีผลกระทบต่อความแม่นยำของการวัด ตั้งแต่ขั้นตอนแรกสุดในการเลือกใช้ชนิด รุ่นมาตรวัดหนึ่ง โดยบางปัจจัยจะเป็นปัจจัยหลักและมีน้ำหนักกว่าปัจจัยอื่นๆขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานแต่ละรูปแบบอีกทั้งระดับความแม่นยำและสมรรถนะที่ต้องการ แต่เพื่อให้แน่ใจมากยิ่งขึ้นอาจปรึกษาขอคำแนะนำจากบริษัทผู้ผลิตหรือตัวแทนบริษัทผู้ผลิตในชั้นตอนสุดท้ายก่อนตัดสินใจเลือกมาตรวัด สิ่งต่อไปนี้จะปัจจัยและหัวข้อพื้นฐานในการพิจารณาเลือกใช้มาตรวัด

1. ขนาดมาตรวัด (meter size) ส่วนใหญ่แล้วขนาดมาตรวัดจะรู้ได้หลังจากทราบอัตราการไหล ดังนั้นเมื่อกำหนดอัตราการไหลที่ต้องการวัดปริมาตร , อัตราการไหลต่ำสุดและสูงสุด (minimum and maximum flow rates) ขนาดมาตรวัดซึ่งมีขีดความสามารถวัดการไหล (flow capacity) ที่เหมาะสมได้จากข้อกำหนดรายละเอียด วัสดุที่ใช้ทำจากเหล็กหล่อผู้ผลิต สิ่งที่ต้องระมัดระวังในการเลือกมาตรวัด ก็คือเมื่อทำการเลือกอุปกรณ์หลักๆของระบบมาตรวัด (meter run) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับมาตรวัดเช่นกัน อาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายที่จะมีเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับมาตรวัด อย่างในกรณีแทนที่จะเลือกอุปกรณ์หลักดังกล่าวซึ่งประกอบอยู่ในระบบมาตรวัดให้มีอัตราการไหลเท่ากับหรือมากกว่าความสามารถวัดการไหล (flow capacity) ของมาตรวัด ขนาดใหญ่ที่สุดภายในระบบมาตรวัด สามารถเลือกใช้มาตรวัดให้มีขนาดเล็กลงแต่จำนวนเพิ่มมากขึ้น โดยต่อรวมกันโดยใช้ท่อรวม (header) ต่อถึงกัน เพราะว่าเมื่อมาตรวัดมีขนาดเล็กลง อัตราการไหลผ่านมาตรวัดก็จะน้อยลง แต่ประสิทธิภาพพบว่าส่วนใหญ่จะเพิ่มขึ้น อีกทั้งลดค่าใช้จ่ายที่ต้องเสียไปกับระบบมาตรวัด สิ่งที่ยังสามารถลดปัญหาในการสอบเทียบมาตรวัดเพราะในการสอบเทียบต้องการแบบมาตรา (prover) ที่ไม่ใหญ่และอัตราการไหลไม่สูงมากนัก นับว่าเป็นผลดีทางอ้อม

นอกจากนี้ควรพิจารณาชนิดรูปแบบและความสามารถทนต่อแรงดันของหน้าแปลนข้อต่อทางเข้า - ออกมาตรวัดอีกด้วย

2. ความดัน (pressure) มาตรวัดต้องสามารถทนต่อความดันทำงาน (operating pressure) และความดันสูงสุดทำงาน (maximum operating pressure) ภายในระบบ ตลอดจนอิทธิพลของการขยายตัว (thermal expansion) และความไม่ปกติของระบบ เช่น การเพิ่มขึ้นและลดลงของความดันทันทีทันใด นอกจากนี้ควรรู้ความดันสูญเสีย (pressure loss) คร่อมตัวมาตรวัดว่าไม่มากจนเกินไปจนทำให้ประสิทธิภาพของระบบมาตรวัดและระบบการขนถ่ายผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป อีกปัจจัยหนึ่งที่

ต้องคำนึงนั่นคือ ต้องมั่นใจว่าเมื่อมาตรวัดทำงานที่อัตราการไหลสูงสุดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นมาตรวัดก็ยังคงมีความดันภายในมาตรวัดเพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้ของเหลวกลายเป็นไอเกิด cavitation

3. คุณสมบัติการเข้ากันได้ของเหลวกับวัสดุที่ใช้ทำมาตรวัด (product compatibility)
ถ้าหากมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นระหว่างของเหลวที่วัดกับวัสดุที่ใช้ทำมาตรวัด ผลกระทบจะมีต่อมาตรวัดทันที ไม่ว่าจะเป็นเรื่องความแม่นยำการวัด , การรั่วไหลของเหลวออกจากมาตรวัดเป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงชนิดของเหลวที่ใช้อยู่และจะมีการใช้ภายในอนาคตด้วย แต่อย่างไรก็ตามผู้ผลิต P.D. Meter ได้ผลิตมาตรวัดซึ่งทำด้วยวัสดุหลากหลายสามารถใช้กับของเหลวได้หลายประเภทด้วยกัน นอกจากนี้หากมาตรวัดจำเป็นต้องใช้กับน้ำมันดิบก็ต้องมั่นใจว่าวัสดุที่ใช้ทำมาตรวัดสามารถทนต่อแนวโน้มที่อาจจะเกิดรอยร้าวเนื่องจากความเค้นที่มีกำมะถันผสมอยู่ (sulfide stress cracking) ได้

4. อุณหภูมิ (temperature) ทั้งอุณหภูมิของเหลวและอุณหภูมิบรรยากาศนับว่าเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำงานมาตรวัดมาก เพราะภายในมาตรวัดตัวหนึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนซึ่งทำด้วยวัสดุแตกต่างกันหลายชนิด โดยวัสดุแต่ละชนิดก็มีสัมประสิทธิ์การขยายตัว (coefficient of expansion) ที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงเป็นเรื่องยากที่จะรักษาช่องว่างวิกฤต (critical clearance) ระหว่างชิ้นส่วนให้คงที่ตลอดช่วงอุณหภูมิแตกต่างๆกว้างๆ ด้วยเหตุนี้บริษัทผู้ผลิตจึงได้ผลิต P.D. Meter ซึ่งมีช่องว่างพิเศษ (special clearance) สำหรับมาตรวัดที่ต้องใช้งานกับของเหลวที่มีอุณหภูมิสูง

ปกติแล้วชิ้นส่วนประกอบภายในมาตรวัด P.D. Meter จะผลิตภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ด้วยค่าเบี่ยงเบนสัมประสิทธิ์การขยายตัว (coefficient of expansion) ค่าหนึ่ง โดยค่าช่องว่างขยายตัว (expanded clearances) ทั้งหมดจะได้รับการคำนวณบนพื้นฐานที่สัมประสิทธิ์ของอัตราการขยายตัว (coefficient of expansion rate) แตกต่างกันแล้วแต่ชนิดของวัสดุและชิ้นส่วนที่ใช้ทำมาตรวัดตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เมื่อประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดเข้าภายในมาตรวัดและนำไปติดตั้งพร้อมใช้งานที่อุณหภูมิสูง ชิ้นส่วนทำงานของมาตรวัดจะเริ่มขยายตัวจนถึงขนาดที่ได้กำหนดคำนวณหาไว้ซึ่งขนาดดังกล่าวจะทำให้สมรรถนะที่ดีเหมาะสม ณ. อุณหภูมิใช้งานซึ่งมีอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ช่องว่างวิกฤต (critical clearance) ก็จะอยู่ตัวคงที่ ณ. อุณหภูมิดังกล่าว

ในขณะเดียวกันอุณหภูมิแวดล้อมก็ยังมีผลต่อสมรรถนะของมาตรวัดเช่นกัน เพราะหากชิ้นส่วนซึ่งต่อออกจากเพลาทงออกโรเตอร์ (stack-up) แดกหักได้ง่ายจะมีการหดตัวและยึดตัวและแตกในที่สุดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแวดล้อม นอกจากนี้อาจจะมีผลต่อความแม่นยำในการวัดของมาตรวัดได้เมื่อมีส่วนประกอบที่ต้องการสารหล่อลื่นช่วยในขณะทำงาน ซึ่งสารหล่อลื่นอาจจะแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมลดลงจนไม่สามารถทำหน้าที่ของสารหล่อลื่นของมันได้และจะส่งผลไปเพิ่มแรงบิดให้กับมาตรวัด

5. ความหนืด (viscosity) ความหนืดเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแม่นยำของมาตรวัดมาก ปัจจัยหนึ่ง เพราะเมื่อความหนืดเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ capillary seal ระหว่างช่องว่าง (clearances) สามารถซีลป้องกันการไหลเล็ดลอดผ่านมาตรวัดน้อยลง ซึ่งจะทำให้ช่วงการวัดได้ (rangibility) ของ

มาตรวัดกว้างมากขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะว่าเมื่อการไหลเคลื่อนผ่านช่องว่างลดลง อัตราการไหลต่ำสุดที่ยังคงทำให้มาตรวัดสามารถวัดของเหลวได้ด้วยความแม่นยำอยู่จะมีค่าต่ำลงไปด้วย ดังในตารางที่ 3

Viscosity Chart (Turn Down)

TYPICAL MINIMUM FLOW RATES

VISCOSITY	MAXIMUM FLOW RATE LINEARITY	METER SIZE						
		3 in.	4 in.	6 in.	8 in.	10 in.	12 in.	16 in.
		250 gpm	600 gpm	1000 gpm	1500 gpm	2500 gpm	3500 gpm	8750 gpm
1.0 cP	+/- 0.15%	25	60	100	150	250	350	875
	+/- 0.25%	16	39	65	98	163	228	569
	+/- 0.50%	11	27	45	68	113	158	394
5.0 cP	+/- 0.15%	10	24	40	60	100	140	350
	+/- 0.25%	7	17	29	44	73	102	254
	+/- 0.50%	5	11	19	29	48	67	166
20.0 cP	+/- 0.15%	2	4.80	8	12	20	28	705
	+/- 0.25%	1.45	3.48	5.80	8.70	14.50	20.30	50.75
	+/- 0.50%	0.93	2.22	3.70	5.55	9.25	12.95	32.58
100.0 cP	+/- 0.15%	0.40	0.96	1.60	2.40	4.00	5.60	14
	+/- 0.25%	0.25	0.60	1.00	1.50	2.50	3.50	8.75
	+/- 0.50%	0.19	0.45	0.75	1.13	1.88	2.63	6.57

ตาราง 3 อิทธิพลของความหนืดต่ออัตราการไหลต่ำสุดของมาตรวัด P.D.

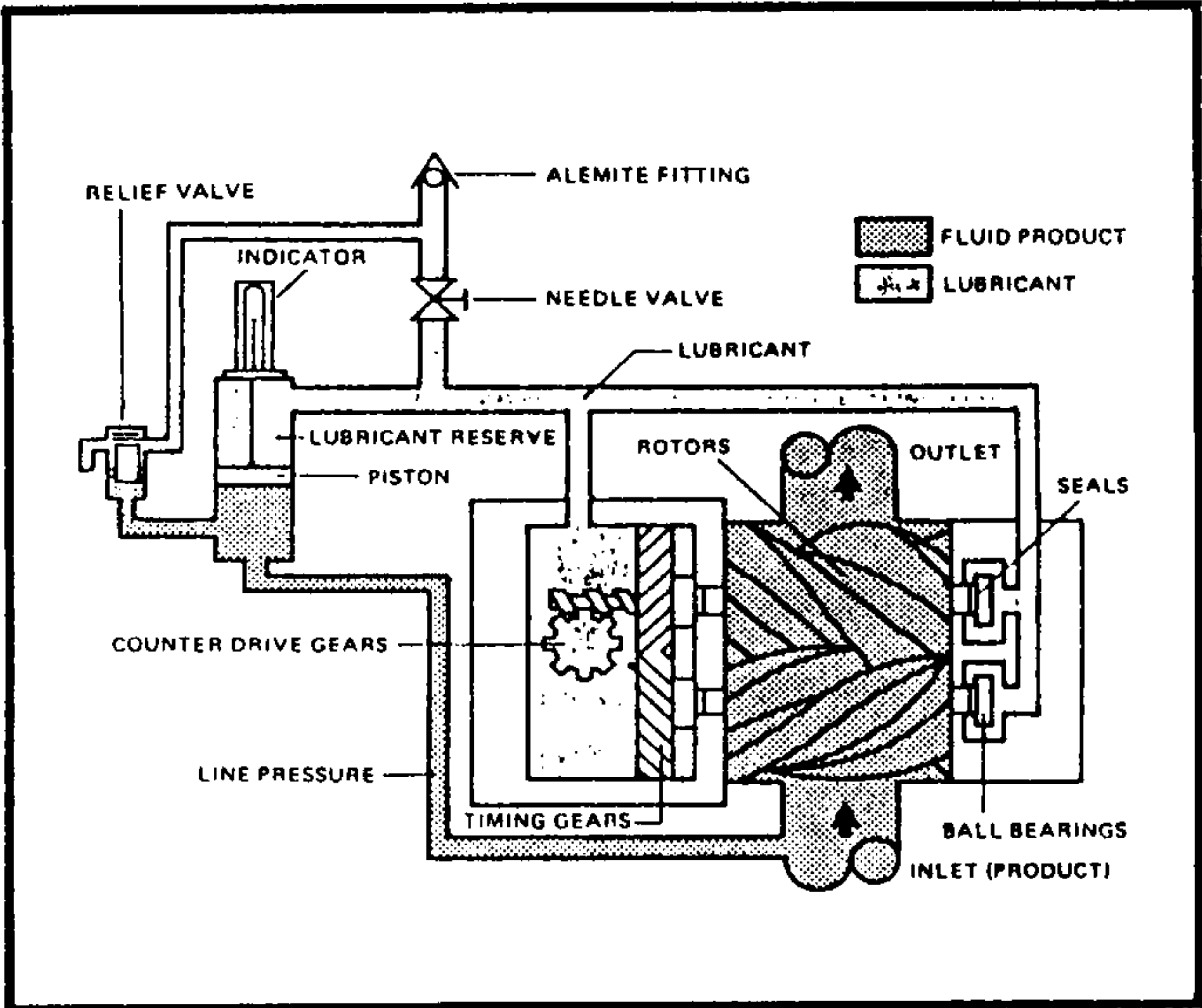


Figure 6 Automatic Pressure Lubricated System

รูป 124 ระบบหล่อลื่นอัตโนมัติของมาตรวัด P.D. (Automatic Pressure Lubricated System)

ยกตัวอย่างเช่น มาตรวัดขนาด 3 นิ้วมีอัตราไหลสูงสุด 250 gpm เมื่อใช้วัดของเหลวมีค่าความหนืดเท่ากับ 1 centipois จะได้ค่าความเป็นเชิงเส้นตรง (linearity) เท่ากับ $\pm 0.15\%$ และมีอัตราการไหลต่ำสุดเท่ากับ 25 gpm แต่เมื่อของเหลวมีความหนืดสูงขึ้นเป็น 20 centipois ที่ค่าความเป็นเชิงเส้นตรง (linearity) เท่ากับ $\pm 0.15\%$ เท่าเดิมพบว่าอัตราการไหลต่ำสุดลดลงเหลือ 2 gpm เป็นต้น

ในทางกลับกันอาจทำการลดอัตราการไหลผ่านมาตรวัดให้น้อยลงเมื่อต้องใช้กับของเหลวซึ่งมีความหนืดสูงเพื่อยืดอายุการใช้งานของมาตรวัดเมื่อจำเป็นต้องใช้กับของเหลวที่มีความหนืดสูง

6. ความโน้มถ่วง (gravity) พบว่า P.D. Meter จะได้รับผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) , API gravity รวมทั้งสัมประสิทธิ์การขยายตัว (coefficient of expansion) ของเหลว แต่ก็ยังเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องรู้หากมาตรวัดประกอบด้วยตัวชดเชยอุณหภูมิซึ่งต้องใส่ค่าความถ่วงจำเพาะหรือความหนาแน่นเมื่อต้องการให้ตัวชดเชยค่าอุณหภูมิทำงาน

7. คุณภาพการหล่อลื่นของเหลว (product lubricating qualities) ปกติแล้วมาตรวัดส่วนใหญ่ออกแบบให้ใช้ของเหลวที่ทำการวัดอยู่เป็นสารหล่อลื่นชิ้นส่วนเคลื่อนที่ภายในมาตรวัด แต่ถ้าหากใช้มาตรวัดกับของเหลวซึ่งไม่มีคุณสมบัติหรือความสามารถหล่อลื่น เช่น แก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) ก็จะมีปัญหาทันที วิธีแก้ปัญหามือพบว่ามาตรวัดไม่ได้รับการหล่อลื่นเพียงพอกระทำโดยแยกส่วนเคลื่อนที่วิกฤตออกจากเส้นทางการไหลของเหลวที่วัดไปไว้ในส่วนที่มีระบบหล่อลื่นแยกอิสระออกไป ยกตัวอย่างดังรูปที่ 124 เป็นการแยกส่วนเคลื่อนที่วิกฤตออกเป็นอิสระด้วยใช้ระบบการหล่อลื่นความดันอัตโนมัติ (automatic pressure lubricating system) ซึ่งแยกชุดเฟืองเกียร์ , แบริง , และกลไกที่อาจสึกหลอได้ง่ายหากขาดการหล่อลื่น ให้อยู่ภายในอ่างน้ำมันหล่อลื่น

8. สิ่งแปลกปลอมปนในของเหลว (product contamination) หากมีวัสดุสิ่งแปลกปลอมปน เช่น ทรายหลงเข้ามามาตรวัด ซึ่งภายในประกอบด้วยชิ้นส่วนเคลื่อนที่มากมายต่อการเสียหายเนื่องจากการขัดเสียดสีระหว่างวัสดุแปลกปลอมกับชิ้นส่วนเคลื่อนที่และเป็นสาเหตุทำให้ช่องว่างวิกฤตเกิดความเสียหาย โดยเฉพาะผิวหน้าแบริงซึ่งสัมผัสอยู่กับของเหลวที่วัดอยู่ตลอดเวลา ในกรณีที่ของเหลวเป็นน้ำมันดิบ หากกัมมะถัน (sulphur) ซึ่งผสมอยู่ในน้ำมันดิบเกิดรวมตัวกับจะเกิดเป็นกรดซัลฟูริก (sulfuric acid) ไปกัดผิวหน้าแบริงได้ วิธีแก้ปัญหาคือแยกแบริงและส่วนเคลื่อนที่วิกฤตออกอิสระจากของเหลวที่วัดแล้วจัดให้มีระบบหล่อลื่นอัตโนมัติ

9. ทิศทางการหมุนของมาตรวัด (orientation) เนื่องจาก P.D. Meter ที่มีอยู่ในท้องตลาดจะมีรูปแบบมากมาย ต้องคำนึงว่าต้องการ P.D. Meter มาติดตั้งในระบบมาตรวัดให้อยู่ในแนวราบขนานกับพื้นหรือในแนวตั้งฉากกับพื้น เพราะฉะนั้นในการเลือกก็จำเป็นต้องปรึกษาบริษัทผู้ผลิตหากต้องมีการปรับใช้มาตรวัดผิดปกติจากทั่วๆ ไป

10. ลักษณะการติดตั้ง (installation) ควรคำนึงถึงการติดตั้ง การระบายของเหลวจากตัวมาตรวัด วิธีการสอบเทียบ ก็ควรพิจารณาลักษณะและพื้นที่การทำงานและการใช้งานมาตรวัดด้วยเช่นกัน

หนังสืออ้างอิง (Bibliography)

1. ***Hydraulic and Pneumatic Power and Control Design , Performance ,Application*** ; Edited by FRANKLIN D. YEAPLE , McGRAW-HILL BOOK COMPANY ,1966
2. ***Measurement and Control of Crude oil & Petroleum Products , Document No A-443, A-444 , A-442 , A-5*** , SGS Far East Limited ; 1987
3. ***Liquid Turbine Meter ; CATALOG 3400*** ;DANIEL INDUSTRIES,Inc .,
4. ***Manual of Petroleum Measurement Standards ,Chapter 5 Metering ,Section 3 Measurement of Liquid Hydrocarbons by Turbine Meters*** , 2 nd edition ,Nov 1987 ;American Petroleum Institute.
5. ***Manual of Petroleum Measurement Standards ,Chapter 5 Metering ,Section 2 Measurement of Liquid Hydrocarbons by Displacement Meter Systems*** , 1 st edition Jan 1977 ;American Petroleum Institute
6. ***Manual of Petroleum Measurement Standards ,Chapter 12 Calculation of Liquid Quantities ,Section 2 Calculation of Liquid Petroleum Quantities Measured by Turbine or Displacement Meters*** , 1 st edition ,Sep 1981 ;American Petroleum Institute.
7. ***Turbine Meter , Cat.NO.cbt002-3-E*** ; OVAL ENGINEERING CO.,LTD.
8. ***PUMP HANDBOOK*** ,second edition; Edited by IGOR J. KILLIAM C.KRUTZSCH , WARREN H. FRASER and JOSEPH P.MESSINA ;McGRAW-HILL BOOK COMPANY ,1986
9. ***SGS-REDWOOD MEASUREMENT COURSES 1985*** ,Document No. A-20 , A-357 , A-358 , A-163 ;1985
10. **หลักการ และการใช้งาน เครื่องมือวัดอุตสาหกรรม** , สมศักดิ์ กิริตวิเศษสรุฐ์ , สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น) ,พ.ศ. 2535
11. ***Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers***, Ninth Edition, Edited by BUGENE A. AVALLONE and THEODORE BAUMEISTER III ; McGRAW-HILL BOOK COMPANY ,1987
12. ***PUMPS AND PUMPING with particular reference to variable-duty pumps*** ; ION I. IONEL ;Elsevier , Amsterdam·Oxford-New York-Tokyo ; 1986
13. ***FLUID MECHANICS with Engineering Applications*** ; Robert L. Daugherty , Joseph B. Franzini and E. John Finnemore ; McGRAW-HILL BOOK COMPANY ,1985

14. ***The National Conference on Weights and Measures (NCWM)*** , Module No 19 “Loading-Rack Meters Inspector’s Manual” , 1990
15. ***Engineering Data Book ,Volume I*** , Tenth Edition , Gas Processors Association , 1987