

ผลกระทบของค่าผ่านทางต่อการจราจรในบริเวณเขตชั้นในของกรุงเทพมหานคร

เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์^{1*} และ เกริกเกียรติ อังคนาวิตต์²

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

* Corresponding Author: fengmms@ku.ac.th

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² นิสิตระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 25 เมษายน 2561

แก้ไข : 30 พฤษภาคม 2562

ตอบรับ : 24 ตุลาคม 2562

คำสำคัญ :

การเก็บเงินเข้าพื้นที่ที่มี

การจราจรติดขัด /

การจำลองการจราจร /

กรุงเทพมหานคร

บทความนี้เสนอโปรแกรมแบบจำลองจราจรที่สามารถคำนวณได้โดยมีเวลาในการเดินทางระยะทางในการเดินทาง และค่าผ่านทางเป็นปัจจัย โปรแกรมดังกล่าวนี้ได้ปรับปรุงและพัฒนาต่อจากโปรแกรมสร้างแบบจำลองของผู้เขียนให้สามารถศึกษาผลกระทบของค่าผ่านทางในราคาต่างๆ ต่อสภาพจราจรในพื้นที่ได้ งานวิจัยนี้ใช้พื้นที่บริเวณเขตชั้นในของกรุงเทพมหานครเป็นพื้นที่ศึกษา เนื่องจากพื้นที่ในบริเวณนี้เป็นพื้นที่ที่มีรายได้เฉลี่ยและการจ้างงานสูง และเป็นพื้นที่เศรษฐกิจที่สำคัญของกรุงเทพมหานคร มีการเดินทางเข้าออกพื้นที่เป็นจำนวนมาก การวางแผนและบริหารจัดการจราจรจึงเป็นสิ่งจำเป็น ทั้งนี้ ศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองโดยใช้ปริมาณจราจรและความเร็วเฉลี่ย พบว่า การเก็บค่าผ่านทางส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยของรถในพื้นที่มากขึ้น ภายใต้สถานการณ์ที่ทำการศึกษา พบว่า ค่าผ่านทาง 10 บาท ให้ความเร็วเฉลี่ยของรถในพื้นที่ที่ดีที่สุด คือ 45.96 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าความเร็วเฉลี่ยของรถในพื้นที่เมื่อไม่มีการเก็บค่าผ่านทางร้อยละ 19.82

Effect of Congestion Charging on Traffic Condition in the Inner Area of Bangkok

Muanmas Wichiensin^{1*} and Kroekkiat Angkanawisalya²

Kasetsart University, Ladyaow, Chatuchak, Bangkok 10900

* Corresponding Author: fengmms@ku.ac.th

¹ Assistant Professor, Civil and Environmental Engineering Department.

² Graduate Student, Civil and Environmental Engineering Department.

Article Info

Article History:

Received: April 25, 2018

Revised: May 30, 2019

Accepted: October 24, 2019

Keywords:

Congestion Charging /
Traffic Modeling Software /
Bangkok

Abstract

This paper presents traffic simulation software that can simulate the traffic in a network where congestion charge exists. The software was modified from the existing transportation software, which was previously developed by the authors. The software allows the examination of the effect of congestion charge on a traffic network. In the present investigation, a case study of the inner area of Bangkok was assessed due to its high average income, high employment rate and high traffic density. The model was calibrated using the traffic volume and average speed. It was found that under the condition of this study, 10 baht congestion charge would lead to the highest average network speed at 45.96 km./hr. which are higher than average network speed when no congestion charge about 19.82%.

1. บทนำ

ปัจจุบัน มีการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ทำให้มีโปรแกรมแบบจำลองจราจรสำเร็จรูปเกิดขึ้นมาเป็นจำนวนมากและหลายหลาย แต่โปรแกรมสำเร็จรูปเหล่านี้มีราคาสูง และมีความยืดหยุ่นไม่มาก เนื่องจากไม่สามารถประยุกต์ใช้ตามความต้องการของนักศึกษาและนักวิจัยได้หลายหลายเท่าใดนัก

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองจราจรที่มีเวลาในการเดินทาง ระยะทางในการเดินทาง และค่าผ่านทางเป็นปัจจัย โดยโปรแกรมในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาต่อยอดจากโปรแกรมสร้างแบบจำลองของ Angkanawisalya และ Wichiensin [1] ซึ่งเป็นโปรแกรมแบบจำลองที่ใช้ Frank-Wolfe Algorithms ในการแจกแจงการเดินทางและใช้ Dijkstra's algorithm ในการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมในการเดินทาง โดยใช้โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการเขียนโปรแกรม และได้ผ่านเกณฑ์การทดสอบความถูกต้องของผลลัพธ์แล้ว งานวิจัยนี้ได้พัฒนาต่อยอดโปรแกรมแบบจำลองดังกล่าวโดยเพิ่มปัจจัยในตัดสินใจเลือกเส้นทางของคนจากเฉพาะเวลาเป็นค่าใช้จ่าย ทั้งจากเวลา ตัวเงินและระยะทางวิ่ง โดยการแปลงเวลาในการเดินทาง ระยะทางในการเดินทาง และค่าผ่านทางให้เป็นมูลค่าเงิน ซึ่งทำให้โปรแกรมมีประโยชน์และสะดวกต่อผู้วางแผนจราจรได้มากกว่าเดิม เนื่องจากผู้วางแผนสามารถจำลองสภาพจราจรในพื้นที่ที่มีค่าผ่านทางเป็นปัจจัยร่วมได้ ส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้สะท้อนความจริงมากขึ้นทำให้ผู้วางแผนสามารถทำงานได้กว้างขวางขึ้น

งานวิจัยนี้ใช้พื้นที่บริเวณเขตชั้นในของ กรุงเทพมหานคร เป็นพื้นที่ศึกษา เนื่องจากปัจจุบันกรุงเทพมหานครเกิดการพัฒนาย่างรวดเร็วในหลายๆด้าน แต่เมืองหลวงอย่างกรุงเทพมหานครนั้นมีพื้นที่จำกัดติดกับปริมาณจราจรที่เพิ่มขึ้นทุกปี ส่งผลให้ปริมาณจราจรในพื้นที่หนาแน่นโดยเฉพาะบริเวณเขตชั้นในของกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นพื้นที่เศรษฐกิจที่สำคัญ ดังนั้นผู้วางแผนและบริหารจัดการจราจรจึงต้องทราบผลกระทบที่เกิดขึ้นในโครงข่ายจากการเก็บค่าผ่านทาง เพื่อจราจรในพื้นที่เกิดความคล่องตัวสูงที่สุด โดยวิเคราะห์จากระยะเวลารวมทั้งระบบ (Vehicle Hour Travel: VHT) ระยะทางวิ่งรวมทั้งระบบ (Vehicle Mile Travel: VMT) และความเร็วเฉลี่ยของคนในพื้นที่ ใช้กรณีศึกษาราคาค่าผ่านทาง 0, 2, 5, 10, 15 และ

20 บาท โดยมีสมมุติฐานว่ารถทุกคันในโครงข่ายถนนเป็นรถยนต์ส่วนบุคคล (PC) มีค่าทางด่วน 50 บาท งานวิจัยนี้มีการเทียบความถูกต้องด้วยค่าปริมาณจราจร ตามหลักเกณฑ์ของ Department for Transport UK Highways Agency's Design Manual for Roads & Bridges (DMRB) [2] เพื่อให้แบบจำลองใกล้เคียงสภาพความเป็นจริง ก่อนการศึกษาผลกระทบจากการเก็บค่าผ่านทางในราคาต่างๆ

2. จุดประสงค์และขอบเขตของงาน

2.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- เพื่อพัฒนาโปรแกรมแบบจำลองจราจรที่สามารถวิเคราะห์ในรูปแบบเงินได้ ทั้งจากค่าผ่านทาง ค่าเวลา และค่าระยะทางวิ่ง ให้เป็นปัจจัยร่วมได้
- เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าผ่านทางในราคาต่างๆ ต่อสภาพจราจรบริเวณพื้นที่เขตชั้นในของกรุงเทพมหานคร

2.2 ขอบเขตการศึกษา

พื้นที่ศึกษาคือเขตปทุมวัน ในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า มีสมมุติฐานว่ารถทุกคันในโครงข่ายถนนเป็นรถยนต์ส่วนบุคคล (PC) และมีค่าทางด่วน 50 บาท ความต้องการเดินทางไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเก็บค่าผ่านทาง เนื่องจากเป็นข้อจำกัดที่ไม่มีข้อมูลการเดินทางที่อาจจะเปลี่ยนแปลงลดจำนวนลง

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎี

3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยแบบจำลองระดับประเทศในประเทศไทย พบว่า สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร [3] ได้พัฒนาแบบจำลองจราจรระดับประเทศ ตั้งแต่ พ.ศ. 2538 นั่นคือ โครงการพัฒนาแบบจำลองและระบบฐานข้อมูลจราจร (Urban Transport Database and Model Development Project: UTM) โดยโปรแกรม TRIPS ต่อมา พ.ศ. 2540 ได้มีการเปลี่ยนโปรแกรมที่ใช้พัฒนาแบบจำลองเป็น CUBE ในโครงการศูนย์ข้อมูลและแบบจำลองด้านการจราจรและขนส่ง (Transport Data and Model Center: TDMC) หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาแบบจำลองอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ TDMC II-VI และโครงการปรับปรุงและบำรุงรักษาระบบฐานข้อมูล ข้อเสนอเทศ และแบบจำลอง เพื่อบูรณาการพัฒนาการ

ขนส่งและจราจร การขนส่งต่อเนื่องหลายรูปแบบ และระบบโลจิสติกส์ ระยะ 1-2 (Transport Data and Model Integrated with Multimodal Transport and Logistics: TDML I-II) จน พ.ศ. 2558 ได้มีโครงการ (Transport Data and Model Integrated with Multimodal Transport and Logistics: TDL) ซึ่งเป็นโครงการล่าสุด ที่ถูกปรับปรุงให้เพื่อให้แบบจำลองมีความแม่นยำและทันสมัยมากขึ้น

การศึกษาค้นคว้าพบว่า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนมากนิยมใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เช่น โปรแกรม TRIPS พัฒนาโดยบริษัท MVA Systematica ตั้งแต่ปี 1983 โปรแกรมประกอบไปด้วย 4 โปรแกรมย่อย ได้แก่ แบบจำลองความต้องการเดินทาง แบบจำลองวิเคราะห์โครงข่ายถนน แบบจำลองวิเคราะห์โครงข่ายขนส่งมวลชน และแบบจำลองประมาณตารางการเดินทาง ซึ่งโปรแกรมย่อยดังกล่าวมีหน้าที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับรูปแบบของผู้ใช้งาน ต่อมาโปรแกรม TransCAD ซึ่งถูกพัฒนาโดยบริษัท Caliper ตั้งแต่ปี 1985 เป็นโปรแกรมที่ออกแบบเป็นพิเศษให้ใช้ร่วมกับระบบแผนที่ Geographic Information System (GIS) ต่อมาโปรแกรม CUBE ถูกพัฒนาโดยบริษัท CITILABS โปรแกรมถูกออกแบบมาให้แนะนำสมมติฐานได้หลายมิติ ต่อมาโปรแกรม PTV Visum เป็นโปรแกรมแบบจำลองจราจรระดับ Macroscopic สามารถแสดงผลพร้อมระบบ GIS พัฒนาโดยบริษัท PTV (Planung Transport Verkehr AG) ในเยอรมัน ซึ่งโปรแกรมสำเร็จรูปเหล่านี้มีจุดประสงค์หลักคือ จำลองสภาพการจราจรในโครงข่ายถนน เพื่อศึกษาผลกระทบในการปรับปรุงหรือออกแบบทางของโครงการด้านขนส่ง พร้อมทั้งประเมินและวิเคราะห์สภาพจราจรในกรณีต่างๆ

งานวิจัยในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา Wichiensin และคณะ [4] ได้ทำการศึกษา “การบรรเทาปัญหาการจราจรเมื่อปิดแยกราชประสงค์” จำลองสภาพจราจรในพื้นที่โดยโปรแกรมแบบจำลองระดับจุลภาค VISSIM ใช้หลักเกณฑ์เปรียบเทียบของ (DMRB) ซึ่งได้ผลลัพธ์ คือ ลดจราจรขาเข้าถนนวิทยุร้อยละ 25 ทำให้ความเร็วโดยรวมทั้งระบบมากที่สุด และการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากวิศวกรรมจราจรระหว่างในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาพบว่า พ.ศ.2559 Wichiensin และคณะ [5] ได้ทำการศึกษา “ข้อเสนอแนะเพื่อการแก้ไขปัญหาจราจรสำหรับงานเกษตรแห่งชาติ” จำลองสภาพจราจรในพื้นที่โดยโปรแกรม CORSIM พบว่า การห้ามการจอดรถในถนนสายหลักในมหาวิทยาลัยเป็น

ตัวเลือกที่ส่งผลดีที่สุด ซึ่งสามารถเพิ่มความเร็วเฉลี่ยจากเดิมได้ร้อยละ 10 และลดความล่าช้ารวมจากเดิมได้ร้อยละ 6 ต่อมา พ.ศ.2560 Wichiensin และคณะ [6] ได้ทำการศึกษา “แบบจำลองการจราจรในพื้นที่ธุรกิจของกรุงเทพมหานคร” จำลองสภาพจราจรในพื้นที่เศรษฐกิจ ทั้งหมด 12 แยก โดยโปรแกรม VISSIM และเปรียบเทียบโดยใช้ปริมาณจราจร ความยาวแถวคอย และระยะเวลาในการเดินทาง ตามหลักเกณฑ์ (DMRB) พบว่าแบบจำลองมีความแม่นยำสูง เพราะดัชนีจากการเปรียบเทียบแบบจำลองมีค่า ผ่านมาตรฐาน และใกล้เคียงความเป็นจริงมาก ต่อมา พ.ศ.2560 Yamuang และ Kietkomol [7] ได้ทำการศึกษา “การปรับปรุงระบบช่องเดินรถสี่ทาง ถนนเพชรบุรี” จำลองสภาพการจราจรโดยโปรแกรม VISSIM งานวิจัยนี้ทำการในการเลือกทิศทางจราจรที่มีสิทธิในการใช้งานช่องเดินรถสี่ทาง โดยวิธีช่วงเวลาตายตัว ได้ผลลัพธ์คือ ปริมาณจราจรของทิศทางที่มีสิทธิในการใช้งานช่องเดินรถสี่ทางเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า 7:15 - 8:15 น. ร้อยละ 12.91 จากเดิมและเพิ่มขึ้นในเวลา 8:15 - 9:15 น. ร้อยละ 3.26 จากเดิม ต่อมา พ.ศ.2561 เกริกเกียรติ อังคนาวีศัลย์ และ เหมือนมาศ วิเชียรสินธุ์ ได้ทำการศึกษา “โปรแกรมเพื่อพยากรณ์ปริมาณจราจรบนโครงข่ายถนน” งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมแจกแจงการเดินทางในโครงข่ายถนน โดยทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับโปรแกรม TAPAS และ Julia พบว่า ผลลัพธ์จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถเชื่อถือได้ เนื่องจากค่าการเปรียบเทียบไม่เกินร้อยละ 15 ตามหลักเกณฑ์ [8]

3.2 ทฤษฎี

3.2.1 Frank-Wolfe Algorithm

เป็นอัลกอริทึมสำหรับแจกแจงการเดินทางในโครงข่ายถนนให้ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในระบบเหลือน้อยที่สุด ถูกคิดขึ้นในปี 1956 โดย Marguerite Frank และ Philip Wolfe [9] อัลกอริทึมนี้มีสมมุติฐานว่าเวลาในการเดินทางเป็นไปตามสมการ BPR ผู้เดินทางรู้จักเส้นทางในพื้นที่เป็นอย่างดีและมีความต้องการเดินทางในระบบคงที่ การทำให้โครงข่ายถนนเกิด Equilibrium หรือสมดุลได้นั้นสามารถทำได้โดยแก้สมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear programming) ดังนี้

$$\sum_a \int_0^{x_a} [(t_a(w) \times VOT) + (Distance_a \times VOC) + Charging_a] dw$$

และ

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs} ; f_k^{rs} \geq 0$$

โดยที่

- x_a = ปริมาณจราจร (Flow) บน link a
 - t_a = เวลาที่ใช้เดินทาง (Travel Time) บน link a
 - VOT = มูลค่าเวลาในการเดินทาง (Value of Time)
 - $Distance_a$ = ระยะทางของ link a
 - VOC = ค่าใช้จ่ายในการใช้รถ (Vehicle Operating Cost)
 - $Charging_a$ = ค่าผ่านทางของ link a
 - f_k^{rs} = ปริมาณจราจรบนเส้นทาง k จากจุดเริ่มต้น r ไปปลายทาง s
 - q_{rs} = อัตราปริมาณจราจรระหว่างจุดเริ่มต้น r และปลายทาง s
- ขั้นตอนในการคำนวณ Frank-Wolfe Algorithm สามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : การเตรียมพร้อม

ทำ all-or-nothing assignment โดยมี $Z_a(0) = [(t_a(0) \times VOT) + (Distance_a \times VOC) + Charging_a]$
ให้ผลลัพธ์เป็น $\{x_a^1\}$ และกำหนดให้รอบ $n = 1$

ขั้นตอนที่ 2 : อัปเดต

กำหนดให้ $Z_a^n = [(t_a(x_a^n) \times VOT) + (Distance_a \times VOC) + Charging_a]$

ขั้นตอนที่ 3 : หาทิศทาง

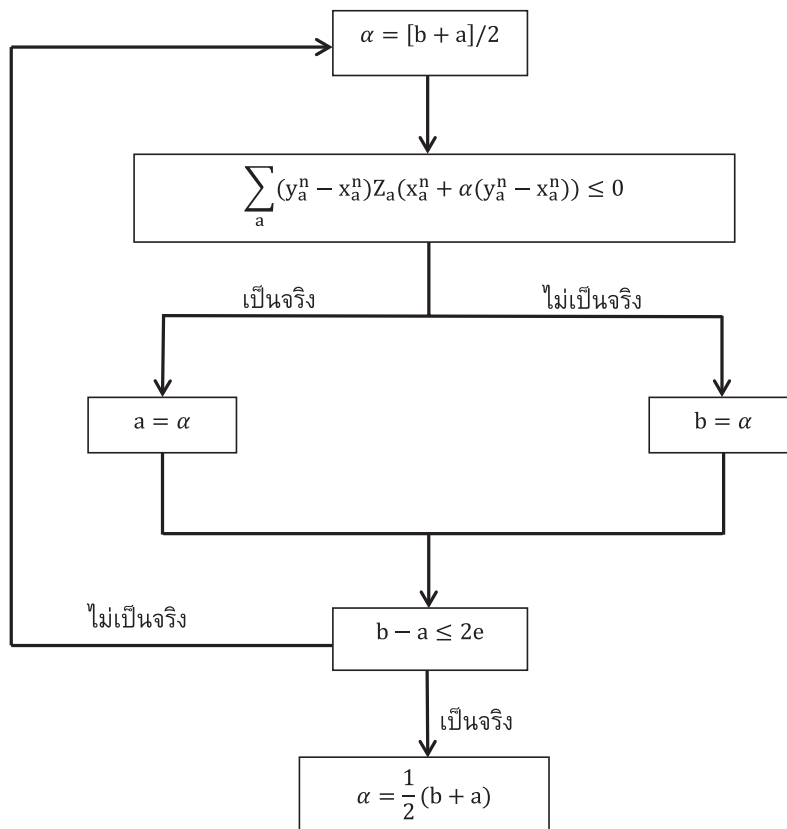
ทำ all-or-nothing assignment จาก $\{Z_a^n\}$ และให้ผลลัพธ์เป็น เซตของปริมาณจราจรชุดเสริม $\{y_a^n\}$

ขั้นตอนที่ 4 : หาเส้นทาง

หา α ที่สามารถแก้สมการ

$$\min_{0 \leq \alpha \leq 1} \sum_a \int_0^{x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n)} Z_a(w) dw$$

สามารถแก้สมการดังกล่าวได้โดยใช้ Bisection Algorithm ซึ่งมีกระบวนการดังนี้
กำหนดให้ $b = 1$, $a = 0$ และ $e = \text{error}$ ที่ยอมรับได้



ขั้นตอนที่ 5 : เคลื่อนที่

กำหนดให้ $x_a^{n+1} = x_a^n + \alpha(y_a^n - x_a^n), \forall a$

ขั้นตอนที่ 6 : ตรวจสอบคลาดเคลื่อน

เมื่อความต่างของ GAP อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ให้หยุด และให้ x_a^{n+1} เป็นเซตของปริมาณจราจรโครงข่ายถนน หากความต่างของค่า GAP อยู่ไม่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ให้กำหนด $n = n + 1$ และทำขั้นตอนที่ 2 ใหม่

3.2.2 The Bureau of Public Roads

The Bureau of Public Roads [10] หรือเรียกสั้นๆ ว่า BPR เป็นสมการมาตรฐานของความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเดินทางและปริมาณจราจรบนถนน มีสมการดังนี้

$$t(x_a) = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x_a}{c} \right)^\beta \right]$$

โดยที่

$t(x_a)$ = เวลาในการเดินทางบนถนน a

t_0 = เวลาในการเดินทางเมื่อไม่มีรถบนถนน (Free Flow Time)

x_a = ปริมาณจราจรบนถนน a (Flow)

c = ความจุถนน (Capacity) เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการรองรับปริมาณจราจรของถนน โดยงานวิจัยนี้กำหนดให้ความจุถนนเป็นไปตามฐานข้อมูลของสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร

α, β = เป็นค่าคงที่ โดยงานวิจัยนี้กำหนดให้

$$\alpha = 0.15, \beta = 4$$

3.2.3 ค่าใช้จ่าย (Cost)

ในกระบวนการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดของ Frank-Wolfe Algorithm จะใช้ค่าใช้จ่าย (Cost) เป็นปัจจัยในการเลือกเส้นทาง ซึ่งในงานวิจัยนี้ค่าใช้จ่ายประกอบด้วย

เวลาในการเดินทาง ระยะทางในการเดินทาง และค่าผ่านทาง โดยแปลงมูลค่าของปัจจัยเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของเงินบาท สูตรคำนวณค่า Cost เป็นดังนี้

$$\text{Cost} = [\text{Travel Time} \times \text{VOT}] + [\text{Distance} \times \text{VOC}] + \text{ค่าผ่านทาง}$$

โดยที่

Travel Time = ระยะเวลาเดินทางจากการแจกแจงการเดินทางในโครงข่าย

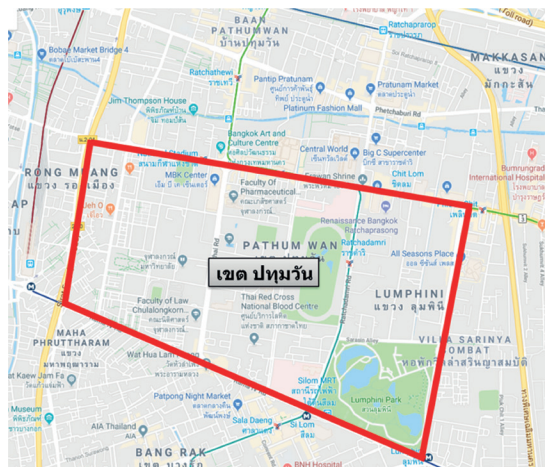
ขนส่งและจราจร การขนส่งต่อเนื่องหลายรูปแบบและระบบโลจิสติกส์ (TDL)” สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร กระทรวงคมนาคม พ.ศ. 2558 [3]

Value of Time (VOT) คือ มูลค่าเวลาในการเดินทาง มีหน่วยเป็น (บาท/นาทีก) ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ใช้ VOT เท่ากับ 1.28 บาท/นาทีก ส่วน Vehicle Operating Cost (VOC) คือ ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยในการใช้ยานพาหนะ มีหน่วยเป็น (บาท/กิโลเมตร) ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ใช้ (VOC) เท่ากับ 2.977 บาท/กิโลเมตร โดยอ้างอิงจาก “โครงการศึกษาพัฒนาปรับปรุง บำรุงรักษาระบบฐานข้อมูล ข้อเสนอแนะและแบบจำลอง เพื่อบูรณาการพัฒนาระบบ

4. วิธีการดำเนินงาน

4.1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

งานวิจัยนี้ใช้พื้นที่ของเขตปทุมวันในปี 2556 เป็นพื้นที่ในการศึกษาความเหมาะสมของราคาค่าผ่านทางเข้า-ออกพื้นที่ ดังรูปที่ 1 ซึ่งโครงข่ายนี้มี 152 Nodes, 54 Zones, 347 Links โดยคิดค่าผ่านทางเมื่อเดินทางผ่านเข้าเขตพื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยเส้นทึบ



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษา

งานวิจัยนี้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 6 กรณี ได้แก่ ราคาค่าผ่านทาง 0, 2, 5, 10, 15 และ 20 บาท โดยคิดค่าผ่านทางราคาเต็มหากเดินทางผ่านเข้าเขตพื้นที่ที่ล้อมด้วยเส้นทึบ และคิดค่าผ่านทางร้อยละ 10 ของราคาเต็ม เมื่อเริ่มต้นเดินทางจาก Zone ในพื้นที่ ตามหลักเกณฑ์ของ Transport for London (TfL)

[11] นอกจากนี้ในพื้นที่ศึกษายังมีเส้นทางด่วนขาลง 2 แห่ง ซึ่งกำหนดให้คิดค่าผ่านทาง 50 บาท ในทุกกรณีศึกษา

งานวิจัยนี้มีดัชนีที่ชี้วัดประสิทธิภาพของราคาค่าผ่านทางต่อสภาพจราจรในพื้นที่ 3 ค่า ได้แก่ VHT, VMT และความเร็วเฉลี่ยของรถในระบบ มีสูตรดังนี้

$$VHT = \sum_a \sum_i t_i^a$$

$$VMT = \sum_a \sum_i d_i^a$$

$$AveSpd = \frac{VMT}{VHT}$$

โดยที่

VHT = ระยะเวลารวมทั้งระบบ

t_i^a = เวลาในการเดินทางของรถ i ใน Link a

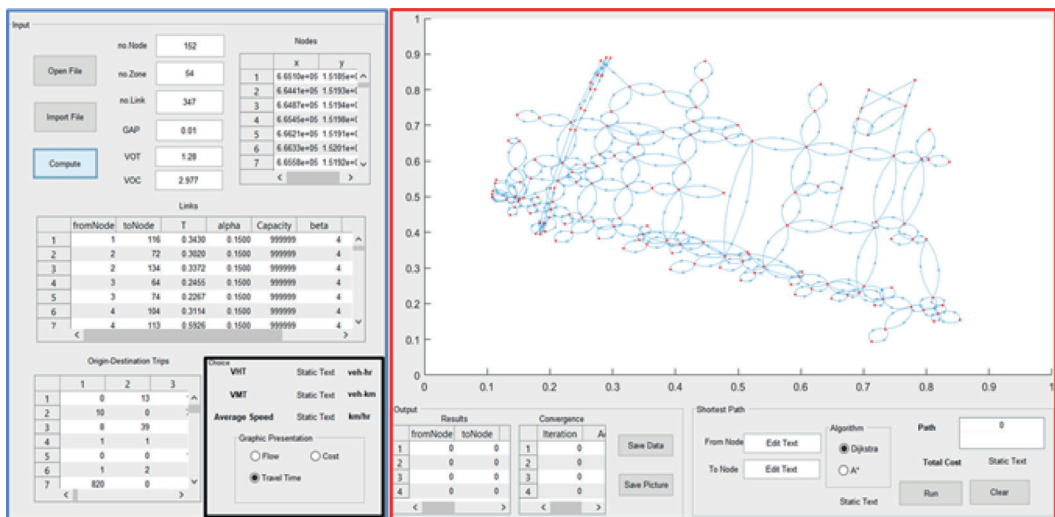
VMT = ระยะทางรวมทั้งระบบ

d_i^a = ระยะทางวิ่งของรถ i ใน Link a

AveSpd = ความเร็วเฉลี่ยของรถในระบบ

4.2 โปรแกรมที่ใช้

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยฉบับนี้ต้องการ Input ข้อมูลโครงข่ายถนนในรูปแบบ Excel File และโปรแกรมสามารถแสดงผลลัพธ์เป็นรูปโครงข่าย เพื่อให้สะดวกต่อการเข้าใจของผู้ใช้ หน้าต่างโปรแกรมสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ Input, Choice และ Output ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 หน้าต่างโปรแกรม

ในส่วนแรกซึ่งเป็นส่วนของ Input นั่นคือ ส่วนที่โปรแกรมรับข้อมูลโครงข่ายถนนเข้ามาเก็บไว้ ซึ่งข้อมูลที่โปรแกรมต้องการได้แก่ จำนวนของ Node, Zone, Link, GAP, VOT และ VOC ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดเองได้ ต่อมาคือ ตำแหน่งพิกัด (X,Y) ของ Node ลำดับถัดมาคือ ข้อมูลของโครงข่ายถนน ซึ่งประกอบด้วย (T, Capacity, α , β , Baht, Distance) โดย T คือเวลาที่ใช้เดินทางเมื่อไม่มีรถบนถนน (Free Flow Travel Time), Capacity คือ ความจุของถนน, (α , β) คือค่าคงที่ นอกจากนี้โปรแกรม

ยังต้องการข้อมูลความต้องการเดินทางในโครงข่ายถนนในรูปแบบของ Excel File โดยงานวิจัยฉบับนี้ใช้ปริมาณการเดินทางในปี 2556 และมี OD Trip matrix ขนาด 54x54 การใส่ข้อมูลนั้นเริ่มแรกผู้ใช้ต้องกดปุ่ม Open File และ Import File ก่อน เพื่อทำการนำข้อมูลโครงข่ายมาเก็บไว้ในโปรแกรม หากข้อมูลครบถ้วนโปรแกรมจะแสดงข้อมูลโครงข่ายขึ้นมาในด้านซ้ายของหน้าต่างโปรแกรม หลังจากนั้นจึง Compute เพื่อให้โปรแกรมเริ่มจำลองสภาพจราจร ซึ่งโปรแกรมจะใช้วิธี Frank-

Wolfe Algorithms ในการแจกแจงการเดินทาง และใช้ Dijkstra's Algorithm ในการค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุด โดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อความเร็วในการจำลองสภาพจราจรคือ ขนาดของโครงข่ายถนน ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ใช้เวลาในการจำลองสภาพจราจรทั้งสิ้น 12 นาที ต่อมาในส่วนของการทางเลือกในการแสดงผล Choice นั้นเป็นการเลือกเพื่อให้โปรแกรมแสดงรูปโครงข่ายถนน ในแบบที่ผู้ใช้ต้องการ หลังจากโปรแกรมแสดง VHT, VMT และ Average Speed แล้ว ผู้ใช้สามารถกำหนดให้โปรแกรมแสดงข้อมูลบนรูปโครงข่ายถนนได้ 3 แบบได้แก่ ปริมาณจราจร (Flow), เวลาที่ใช้ในการเดินทาง (Travel Time) และ ค่าใช้จ่ายที่ใช้เดินทาง (Cost) โดยส่วนของ Choice นี้จะอยู่ด้านล่างซ้ายของโปรแกรม

ในส่วนสุดท้ายซึ่งเป็นส่วนของ Output นั้นเป็นส่วนที่แสดงผลลัพธ์จากการคำนวณของโปรแกรมซึ่งได้แก่ ตาราง Result,

ตาราง Convergence และ รูปโครงข่ายถนน โปรแกรมจะแสดงผลลัพธ์ต่างๆในด้านขวาของหน้าต่างโปรแกรม นอกจากนี้โปรแกรมสามารถบันทึกผลลัพธ์และรูปโครงข่ายถนนได้ โดยกรกดปุ่ม Save Data และ Save Picture ตามลำดับ

5. การเปรียบเทียบ

การศึกษานี้ได้ใช้หลักเกณฑ์ของ Department for Transport UK Highways Agency's Design Manual for Roads & Bridges (DMRB) [2] ในการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากโปรแกรมและผลลัพธ์จริง ซึ่ง DMRB เป็นหลักเกณฑ์ของประเทศอังกฤษ ที่ได้รับความนิยมและความน่าเชื่อถือสูง ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบต้องผ่านตามเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้ จึงสามารถสรุปได้ว่าโปรแกรมนั้นมีความน่าเชื่อถือ โดยมีดัชนีการเปรียบเทียบความถูกต้องดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์การเปรียบเทียบของ DMRB

ค่าการเปรียบเทียบ	เกณฑ์การเปรียบเทียบ	เป้าหมายการเปรียบเทียบ
ปริมาณจราจร	GEH < 5	เปรียบเทียบแล้วได้ค่า GEH < 5 เป็นจำนวน > 85% ของ Link ทั้งหมด

ที่มา: Highways Agency, Design Manual for Roads and Bridges (DMRB) Vol. 12 Department for Transport UK. 2018.

GEH นั้นเป็นดัชนีสำหรับการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณจราจรจากโปรแกรมและปริมาณจราจรจากการสำรวจ ถูกคิดขึ้นในปี 1970 โดย Geoffrey E. Havers และมีสมการดังนี้

$$EH = \sqrt{\frac{2(M - C)^2}{M + C}}$$

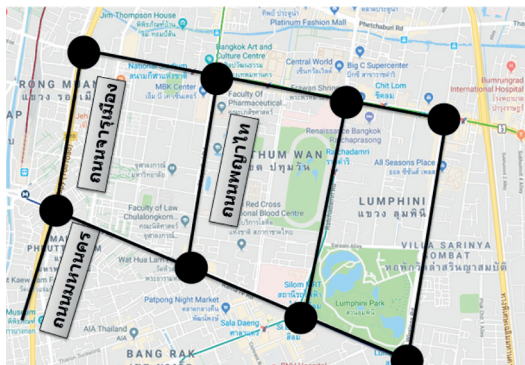
โดยที่

M = ปริมาณจราจรในแต่ละ Link จากโปรแกรม

C = ปริมาณจราจรในแต่ละ Link จากการสำรวจ

เนื่องจากโปรแกรมในงานวิจัยฉบับนี้เป็นโปรแกรมแบบจำลองระดับ Macroscopic ดังนั้นจึงทำการเฉลี่ยปริมาณจราจรบนถนนเปรียบเทียบกับปริมาณจราจรบนถนนจริงจากการ

สำรวจโดย สถิติปริมาณจราจร ปี 2556 ของสำนักงานการจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร [12] ซึ่งได้มีการจัดเก็บข้อมูลปริมาณจราจรของถนนจำนวน 3 สาย ได้แก่ ถนนจรัญเมือง ถนนมหาราช และถนนพญาไท ดังรูปที่ 3 สาเหตุที่ใช้ข้อมูลสถิติจราจรปี 2556 เนื่องจากให้เป็นข้อมูลความต้องการเดินทางในปีเดียวกับข้อมูลของงานวิจัยฉบับนี้



รูปที่ 3 ถนนในเขตปทุมวัน

6. ผลการเปรียบเทียบ

จากการเปรียบเทียบในด้านปริมาณจราจรบนถนนจำนวน 3 สาย ได้แก่ ถนนจตุรเมือง ถนนมหาราช และถนนพญาไท ได้ผลว่า GEH น้อยกว่า 5 ในทุกถนน ผ่านเกณฑ์การเปรียบเทียบ

ของ DMRB ดังตารางที่ 2 ทำให้สรุปได้ว่า ผลลัพธ์การคำนวณของโปรแกรมใกล้เคียงสภาพจราจรในพื้นที่จริงและสามารถเชื่อถือได้

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบปริมาณจราจรบนถนน

ถนน (Link)	ปริมาณจราจร (คัน)		GEH
	จำลอง	จริง	
จตุรเมือง	3,203	3,096	1.90
มหาราช	1,897	1,825	1.66
พญาไท	3,325	3,115	3.70

ในการเปรียบเทียบระยะเวลาในการเดินทางได้เปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองกับผลลัพธ์จากการสำรวจในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าตามช่วงเวลาเดียวกันกับข้อมูลการเดินทางที่ใช้ใน

แบบจำลอง ผลจากการเปรียบเทียบพบว่า เวลาในการเดินทางของแบบจำลองและเวลาในการเดินทางของแบบจำลองจริงมีความแตกต่างกันไม่เกินร้อยละ 15 ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบเวลาในการเดินทางในพื้นที่ศึกษา

จุดเริ่มต้น	จุดสิ้นสุด	เวลาในการเดินทาง (วินาที)		%ความแตกต่าง
		แบบจำลอง	จริง	
แยกพงษ์พระราม	แยกมหาราช	162	184	11.95
แยกปทุมวัน	แยกสามย่าน	108	117	7.69
แยกราชประสงค์	แยกปทุมวัน	81	95	14.73
แยกสามย่าน	แยกศาลาแดง	83	92	9.78

ผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบในด้านปริมาณจราจรและเวลาในการเดินทางทั้ง 2 ด้านผ่านหลักเกณฑ์ของ DMRB ทำให้สรุปได้ว่า ผลลัพธ์การคำนวณของโปรแกรมใกล้เคียงสภาพจราจรในพื้นที่จริงและสามารถเชื่อถือได้

ตารางที่ 4 ผลกระทบของราคาค่าผ่านทาง

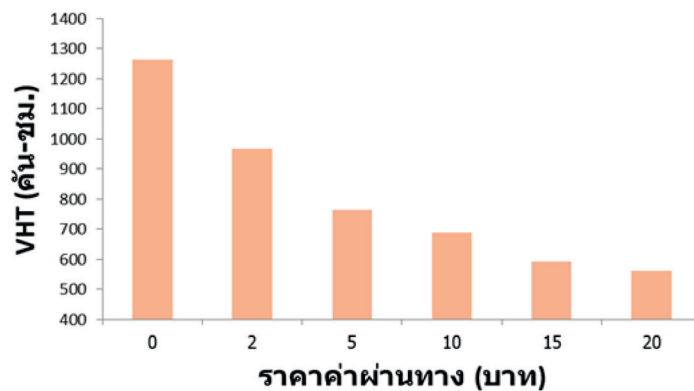
ค่าผ่านทาง (บาท)	VHT (คัน-ชั่วโมง)	VMT (คัน-กิโลเมตร)	ความเร็วเฉลี่ยของ คนในระบบ (กิโลเมตร/ชั่วโมง)
0	1,263.43	48,459.67	38.35
2	965.57	39,989.36	41.41
5	763.94	34,541.28	45.21
10	688.34	31,636.54	45.96
15	592.36	27,001.75	45.58
20	560.01	25502.70	45.53

เวลาในการเดินทาง VHT รวมทั้งระบบนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ว่า การเก็บค่าผ่านทางส่งผลให้เวลาในการเดินทางรวมทั้งระบบมากขึ้น ดังรูปที่ 4 โดยการเก็บค่าผ่านทาง 2, 5, 10, 15

7. ผลกระทบของค่าผ่านทาง

ผลกระทบของค่าผ่านทางต่อ VHT, VMT และความเร็วเฉลี่ยจากโปรแกรมสามารถแสดงได้ ดังตารางที่ 4

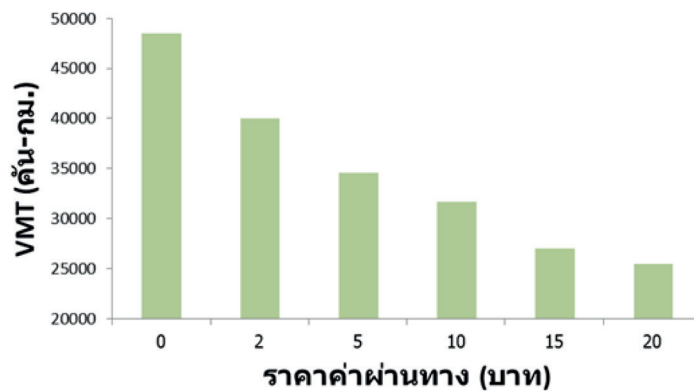
และ 20 บาท ส่งผลให้เวลาในการเดินทางรวมทั้งระบบน้อยลง ร้อยละ 23.57, 39.53, 45.51, 53.11 และ 55.67 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการไม่เก็บค่าผ่านทาง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผ่านทางและ VHT

ต่อมาในด้านระยะเดินทาง VMT รวมทั้งระบบ สามารถวิเคราะห์ได้ว่า การเก็บค่าผ่านทางส่งผลให้ระยะเดินทางรวมทั้งระบบน้อยลง ดังรูปที่ 5 โดยการเก็บค่าผ่านทาง 2, 5, 10, 15

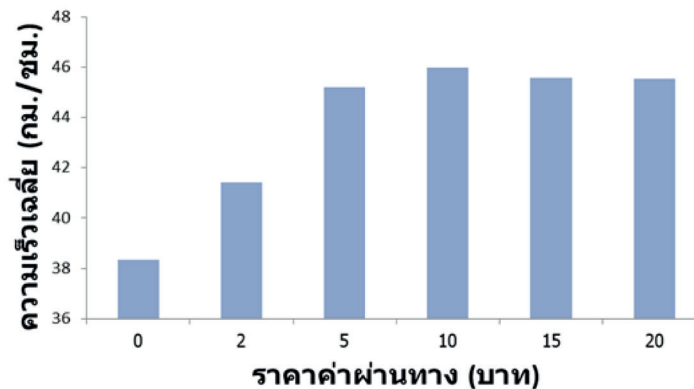
และ 20 บาทส่งผลให้เวลาในการเดินทางรวมทั้งระบบมากขึ้น ร้อยละ 17.47, 28.72, 34.71, 44.27 และ 47.37 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการไม่เก็บค่าผ่านทาง



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผ่านทางและ VMT

ในด้านของความเร็วเฉลี่ยของทั้งระบบ สามารถวิเคราะห์ได้ว่า การเก็บค่าผ่านทางส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยของทั้งระบบมากขึ้น ดังรูปที่ 6 โดยการเก็บค่าผ่านทาง 2, 5, 10, 15, และ

20 บาท ส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยของทั้งระบบน้อยลงร้อยละ 7.97, 17.88, 19.82, 18.84 และ 18.72 ตามลำดับเมื่อเทียบกับการไม่เก็บค่าผ่านทาง



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผ่านทางและความเร็วเฉลี่ยของคนในระบบ

จากรูปที่ 4, 5 และ 6 ทำให้ทราบว่า ค่าผ่านทางในช่วง 0 ถึง 5 ซึ่งเป็นช่วงแรกที่เริ่มเก็บ มีความอ่อนไหวต่อผลลัพธ์มากกว่าช่วงหลังจาก 5 บาท อย่างไรก็ตาม หากราคาค่าผ่านทางมีผลต่อความต้องการเดินทางส่งผลให้จำนวนรถในพื้นที่ศึกษาลดลงกว่ากรณีที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยฉบับที่แล้ว VHT และ VMT, จะแปรผกผันกับราคาค่าผ่านทางมากขึ้นกว่าในรูปที่ 4 และ 5 ความเร็วเฉลี่ยของการเดินทางในพื้นที่แปรผันกับราคาค่าผ่านทางมากขึ้นกว่าในรูปที่ 6 ดังนั้นกราฟจะมีความชันเพิ่มขึ้น

8. สรุปผล

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอโปรแกรมแบบจำลองจราจร ที่สามารถคำนวณโดยมี เวลาในการเดินทาง ระยะทางในการเดินทาง และค่าผ่านทางเป็นปัจจัย โดยปรับปรุงและพัฒนาต่อยอดจากโปรแกรมสร้างแบบจำลองของ Angkanawisalya และ Wichiensin [1] ซึ่งโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำมาวิเคราะห์ผลกระทบของค่าผ่านทางต่อจราจรในพื้นที่ได้ โดยงานวิจัยนี้ใช้เขตปทุมวันเป็นพื้นที่ศึกษาพบว่า โปรแกรมที่พัฒนา

ขึ้นสามารถเชื่อถือได้ เนื่องจากมีผลลัพธ์การเปรียบเทียบผ่านตามหลักเกณฑ์ DMRB และในการศึกษาผลกระทบของราคาค่าผ่านทางต่อสภาพจราจรในพื้นที่พบว่า การเก็บค่าผ่านทางส่งผลให้มีความเร็วเฉลี่ยของรถในระบบมากขึ้น โดยค่าผ่านทาง 10 บาท ทำให้มีความเร็วเฉลี่ยของรถในระบบสูงที่สุดคือ 45.96 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งมากกว่าความเร็วเฉลี่ยของรถในระบบเมื่อไม่มีการเก็บค่าผ่านทางร้อยละ 19.82 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การเก็บค่าผ่านทาง 10 บาท ส่งผลให้สภาพจราจรในพื้นที่เกิดความคล่องตัวสูงสุด ข้อดีของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยฉบับนี้คือ โปรแกรมมีความยืดหยุ่นสูง สะดวกต่อการปรับปรุงแก้ไขข้อมูลให้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้ และโปรแกรมสามารถคำนวณโดยมี เวลาในการเดินทาง ระยะทางในการเดินทาง และค่าผ่านทางเป็นปัจจัย ส่งผลให้แบบจำลองใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้มากกว่าเดิม อย่างไรก็ตามโปรแกรมในงานวิจัยใช้ Frank-Wolfe Algorithm ซึ่งเป็นอัลกอริทึมพื้นฐานในการแจกแจงจราจรในพื้นที่ สามารถต่อยอดได้โดยเปลี่ยนเป็นอัลกอริทึมอื่นๆ ที่มีประสิทธิภาพมากกว่า เช่น Origin-Based Algorithm อย่างไรก็ตามในภาพรวมโปรแกรมในงานวิจัยฉบับนี้มีความถูกต้องเนื่องจากแบบจำลองมีผลลัพธ์จากการปรับเทียบกับแบบจำลองอื่นได้ผ่านตามาตรฐาน ดังนั้นจึงนับว่าเป็นการพัฒนาเครื่องมือที่เป็นประโยชน์แก่วงการการจำลองการจราจร

9. เอกสารอ้างอิง

1. Angkanawisalya, K. and Wichien sin, M., 2018, "A Software for Travel Forecasting," *KMUTT Research and Development Journal*, 41 (3), pp. 311-322. (In Thai)
2. Department for Transport, UK, 2018, Highways Agency, Design Manual for Roads and Bridges (DMRB), Vol. 12.
3. Office of Transport and Traffic Policy and Planning, Ministry of Transport, 2015, Transport Data and Model integrated with Multimodal Transport and Logistics (TDL), pp. 67-68. (In Thai)
4. Wichien sin, M., Kanjanavaikoon, K. and Sangkhawut, K., 2017, "Traffic Congestion Alleviation for Ratchaprasong Road Closure," *KMUTT Research and Development Journal*, 10 (2), pp. 315-331. (In Thai)
5. Wichien sin, M., Hongsa, P. and Simongkol, S., 2016, "Recommendation for Improvement of Traffic Circulation During "Kaset Fair,"" *Ladkrabang Engineering Journal*, 33 (1), pp. 72-77. (In Thai)
6. Wichien sin, M., Kittivichnan, N. and Pichayakorn, V., 2017, "Traffic Simulation Model for Bangkok Business Area," *Ladkrabang Engineering Journal*, 34 (1), pp. 72-77. (In Thai)
7. Yamuang, C. and Kietkomol, W., 2017, "Improvement of Reversible Lane on Pechaburi Rd.," *Ladkrabang Engineering Journal*, 34 (1), pp. 58-64. (In Thai)
8. Dowling, R., Skabardonis, A. and Alexiadis, V., 2004, Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Software, Federal Highway Administration, pp. 1-132.
9. Frank, M. and Wolfe, P.H., 1956, "An Algorithm for Quadratic Programming," *Naval Research Logistics*, 3 (1-2), pp. 95-110.
10. Department of Transportation. Federal Highway Administration, United States [Online], Available: <http://www.fhwa.dot.gov/>. [27 February 2018]
11. Transport for London, Driving, Congestion Charge [Online], Available: <https://tfl.gov.uk/modes/driving/congestion-charge>. [27 February 2018]
12. Traffic and Transportation Department, Bangkok Metropolitan Authority, 2013, Traffic Statistic 2013, p. 16. (In Thai)

การประเมินประสิทธิผลของเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ Transverse Bar ที่มีต่อการลดความเสี่ยงการเกิดอุบัติเหตุชนท้าย

อำพล การณสุนทวงษ์^{1*} สรวรรค์ จันทรทัต² พรรณทิพา พันธุ์ยัม³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

วันจักร ฉายากุล⁴ และ ปิยพงษ์ จิวัฒน์กุลไพศาล⁵

กรมทางหลวง ทุ่งพญาไท ราชเทวี กรุงเทพฯ 10400

* Corresponding Author: ampol.kar@kmutt.ac.th

¹ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

³ นักศึกษาระดับปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

⁴ วิศวกรใหญ่ด้านอำนวยความปลอดภัย กรมทางหลวง

⁵ รักษาการ วิศวกรโยธาเชี่ยวชาญ สำนักแผนงาน กรมทางหลวง

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 17 มิถุนายน 2562

แก้ไข : 19 ธันวาคม 2562

ตอบรับ : 21 มกราคม 2563

คำสำคัญ :

อุบัติเหตุชนท้าย / การขับรถตามกัน /
เครื่องหมายบนผิวจราจร

การลดความเสี่ยงของอุบัติเหตุจากการชนท้ายสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของผู้ขับขี่ที่ขับรถตามหลังให้เว้นระยะห่างระหว่างรถตนเองกับรถคันหน้าอย่างเพียงพอเพื่อให้ผู้ขับขี่ควบคุมรถได้อย่างปลอดภัยและลดอุบัติเหตุจากการชนท้าย จึงมีโครงการนำร่องติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” บนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 35 สายธนบุรี-ปากท่อหรือถนนพระรามที่ 2 โดยกำหนดระยะห่างที่ปลอดภัยระหว่างรถของตนเองกับรถคันหน้าคือ 47 เมตร ติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” จำนวน 3 ชุดต่อเลน บริเวณเลนกลางและเลนขวาสุดพร้อมติดตั้งป้ายเตือนในช่วงระยะทางประมาณ 5 กิโลเมตร พบว่าเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” มีส่วนช่วยให้ผู้ขับขี่เว้นระยะห่างระหว่างรถตนเองกับรถคันหน้าเพิ่มมากขึ้น แต่ประสิทธิภาพจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป นอกจากนี้ พบว่า การติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” มีส่วนช่วยลดจำนวนอุบัติเหตุจากการชนท้ายอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 99.39%

Effectiveness Evaluation of "Transverse Bar" Pavement Marking Pattern on the Reduction of Rear-End Collision Risk

Ampol Karoonsoontawong^{1*}, Sorrawat Juntub², Puntipa Punyim³,

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140

Vanchak Chayakul⁴ and Piyapong Jiwattanakulpaisarn⁵

Department of Highways, Thung Phaya Thai, Ratchathewi, Bangkok 10400

* Corresponding Author: ampol.kar@kmutt.ac.th

¹ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Master Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

³ Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

⁴ Chief Engineer for Highway Safety, Department of Highways.

⁵ Acting Expert-Level Civil Engineer, Bureau of Planning, Department of Highways.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: June 17, 2019

Revised: December 19, 2019

Accepted: January 21, 2020

Keywords:

Rear-end collisions /

Car-following /

Pavement Marking

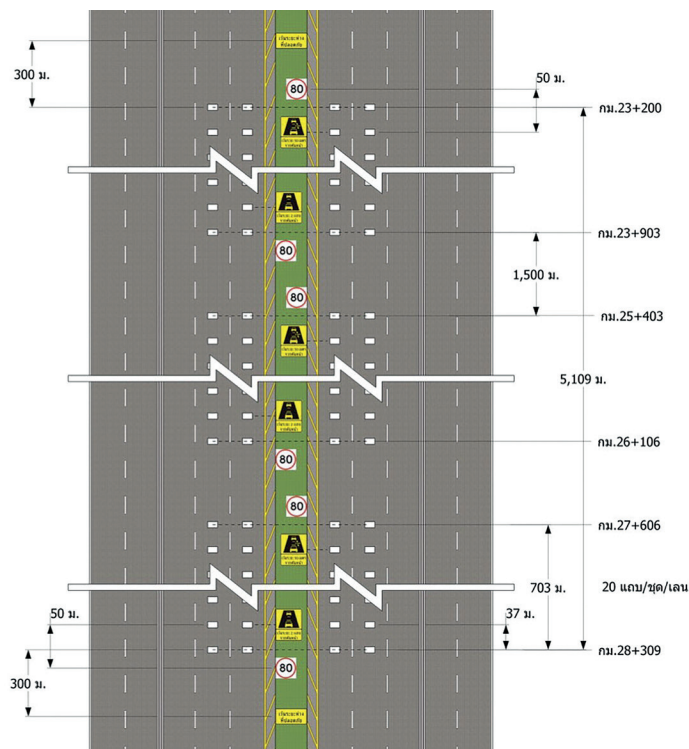
A possible approach to reduce the risk of rear-end collisions is to change the behaviour of road users such that one allows sufficient spacing between his/her vehicle and the leading vehicle. In this pilot project, which implemented the "Transverse Bar" pavement marking pattern on Highway No. 35 (Rama II Road), the appropriate spacing between two cars was determined to be 47 meters. Three sets of transverse bars were painted on the pavement surface on the middle and median lanes of a five-kilometre segment along; appropriate warning signs were also installed. It was found that the "Transverse Bar" pavement marking pattern contributed to larger average spacing of vehicles. The effectiveness of such an approach nevertheless decreased over time. Furthermore, the "Transverse Bar" contributed to less rear-end collisions when analysis was performed at 99.39% confidence level.

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

การเดินทางโดยรถยนต์เป็นการเดินทางหลักอย่างหนึ่งในการคมนาคมปัจจุบัน ความปลอดภัยและประสิทธิภาพในการเดินทางจึงถือเป็นเรื่องที่สำคัญที่ควรคำนึงถึง ซึ่งในแต่ละปีมีอุบัติเหตุเกิดขึ้นสูงขึ้นเรื่อยๆ องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอุบัติเหตุจำแนกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ ผู้ขับขี่ยานพาหนะ ถนน และสิ่งแวดล้อม ซึ่งพบว่าโดยรวมแล้วผู้ขับขี่เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอุบัติเหตุทางถนนมากที่สุด [1] จากข้อมูลทางสถิติจำแนกตามสาเหตุการเกิดอุบัติเหตุพบว่า การขับรถตามกันอย่างกระชั้นชิดซึ่งก่อให้เกิดอุบัติเหตุการชนท้ายถือเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักๆ ที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุ โดยเกิดจากพฤติกรรมการขับขีของผู้ขับขี่ที่ขับรถตามหลังวันระยะห่างระหว่างรถของตนเองกับรถคันหน้าไม่เพียงพอ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและประสิทธิภาพของการคมนาคมทางถนนจึงมีโครงการนำร่องติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ

“Transverse Bar” บนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 35 สายธนบุรี-ปากท่อหรือถนนพระรามที่ 2 กม.23+200 ถึง กม.28+309 โดยกำหนดระยะห่างที่ปลอดภัยระหว่างรถของตนเองกับรถคันหน้าคือ 47 เมตร ทำการติดตั้งจำนวน 3 ชุดต่อเลนแสดงดังรูปที่ 1 และ 2 เพื่อปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของผู้ขับขี่ที่ขับรถตามหลังให้วันระยะห่างระหว่างรถตนเองกับรถคันหน้าอย่างเพียงพอ การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” สำหรับการเว้นระยะห่างระหว่างรถที่ปลอดภัยของรถที่ขับตามกัน เพื่อลดปัญหาอุบัติเหตุชนท้าย โดยการประเมินประสิทธิภาพทั้งในระยะสั้น คือ ผู้ขับขี่ที่ทราบถึงระยะห่างที่ปลอดภัยในการขับรถตามกันช่วยให้ระยะห่างการขับขีและความเร็วเฉลี่ยของผู้ขับขี่เกิดความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น และในระยะยาว คือ ช่วยลดจำนวนสถิติอุบัติเหตุจากการชนท้ายซึ่งถือเป็นสาเหตุหลักของการเกิดอุบัติเหตุจากผู้ขับขี่ที่มีพฤติกรรมขับรถตามแบบกระชั้นชิด



รูปที่ 1 แบบการติดตั้งป้ายและจัดตำแหน่งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar”



รูปที่ 2 Transverse Bar ที่ติดตั้งบนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 35 สายธนบุรี-ปากท่อ หรือถนนพระรามที่ 2

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อประเมินประสิทธิผลของเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar”

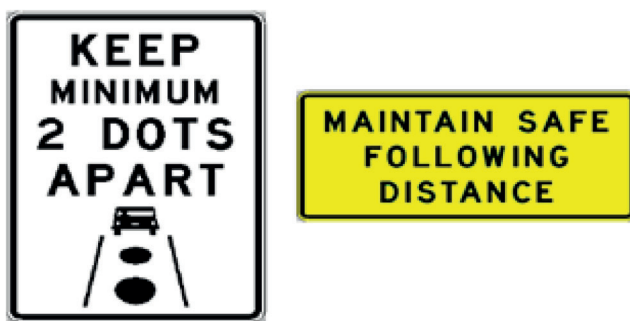
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ประเมินประสิทธิผลในด้านระยะห่างระหว่างรถ และจำนวนสถิติอุบัติเหตุจากการชนท้าย ก่อนและหลังติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar”

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในต่างประเทศได้มีการศึกษาเทคนิคการปรับปรุงทางวิศวกรรมจราจรแบบราคาประหยัดเพื่อปรับปรุงการจัดการจราจรให้มีประสิทธิภาพภายใต้งบประมาณที่จำกัดเพื่อช่วยลดอุบัติเหตุ โดย Department of Public Safety [2] ทำการทดลองใช้เครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Dot” เพื่อช่วยลดอุบัติเหตุของการชนท้าย โดยทำการติดตั้ง “Dot” จำนวน 94 จุด โดยแบ่งเป็น 47 จุดในแต่ละทิศทาง ซึ่งแต่ละจุดห่างกัน 225 ฟุต ติดตั้งในพื้นที่ศึกษาซึ่งเป็นถนน 2 เลน มีระยะทาง 2 ไมล์ และใช้ป้ายแนะนำผู้ขับขี่ ให้รักษาระยะห่างระหว่างรถอย่างน้อย 2 จุด หรือเทียบเท่ากับกฎ 3 วินาทีของรถที่วิ่งตามกัน

แสดงดังรูปที่ 3 เมื่อทำการติดตั้งเรียบร้อยแล้วได้เก็บข้อมูลระหว่างก่อนและหลังการติดตั้ง “Dot” พบว่าระยะห่างของรถที่วิ่งตามกันมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเห็นผลอย่างชัดเจนในช่วงกลางของพื้นที่การทดลอง นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วที่ใช้ลดลงเล็กน้อยในพื้นที่ศึกษา แต่เมื่อผ่านพื้นที่ศึกษาไปแล้วกลับพบว่าความเร็วมีค่าสูงขึ้นมากกว่าช่วงก่อนการติดตั้ง ต่อมา Greibe [3] ได้ทดลองติดตั้งเครื่องหมายจราจรในลักษณะ Chevron Marking บนถนน Danish Freeway ประเทศเดนมาร์ก ซึ่งมีการเกิดอุบัติเหตุการชนท้ายบ่อยครั้ง เพื่อทดสอบว่าสามารถช่วยลดความเร็วของ ผู้ขับขี่และช่วยให้ผู้ขับขี่เพิ่มระยะห่างในการขับรถตามคันหน้าหรือไม่ โดยมีการติดตั้งป้ายเตือน “ข้างหน้าทดลองใช้เครื่องหมายบนผิวจราจร” และในช่วงถนนที่ทำการศึกษาได้ติดตั้งป้ายเตือนข้างทางอีก 2 ป้าย ให้ผู้ขับขี่รักษาระยะห่างอย่างน้อย 2 Chevron ระหว่างรถตนเองกับรถคันหน้า แสดงดังรูปที่ 4 พบว่าการติดตั้ง Chevron marking ช่วยทำให้ผู้ขับขี่ใช้ความเร็วลดลง 1 ถึง 3 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและพฤติกรรมการเว้นระยะห่าง (Gap) จากคันหน้าที่น้อยกว่า 1 วินาที ลดลงประมาณร้อยละ 7 ถึง 11 ทั้งนี้ พบว่าประสิทธิภาพที่ได้รับจะค่อยๆ ลดลงเมื่อผ่านช่วงถนนที่ศึกษาไปแล้ว



รูปที่ 3 ป้ายเตือนให้รักษาระยะห่างอย่างน้อย 2 “Dot”



รูปที่ 4 Chevron marking และป้ายเตือนให้รักษาระยะห่างอย่างน้อย 2 Chevron

สำหรับในประเทศไทย Lertworawanich [4] ได้ทำการศึกษาระยะห่างในการขับรถตามกันที่ปลอดภัยในการขับขึ้นสำหรับช่วงความเร็ว 80-120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 หรือมอเตอร์เวย์ชลบุรีด้วยวิธีการที่พัฒนาขึ้นโดยใช้หลักการของ Maximum Likelihood Estimation (MLE) และ Perturbation Technique โดยนำข้อมูลความเร็วและปริมาณการไหลมาใช้ในการกระบวนการปรับแก้แบบจำลองการไหลการจราจรกับแบบจำลองการขับรถตามกันของ GM5th จากนั้นทำการคำนวณหาระยะห่างที่ปลอดภัยในการขับขึ้นตามกันและพัฒนาเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Dot” เพื่อช่วยผู้ขับขี่ให้ทราบว่าจะเว้นระยะห่างที่ปลอดภัยในการขับรถตามกันอย่างไร ต่อมาในปี 2009 [5] ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยศึกษาการลดความเสี่ยงอุบัติเหตุจากการชนท้ายบนทางหลวงหมายเลข 1141 สำหรับช่วงความเร็ว 70 – 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดย

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและระยะห่างระหว่างรถยนต์ แล้วนำมาใช้ในการคำนวณหาโอกาสของการเกิดอุบัติเหตุชนท้ายที่แปรเปลี่ยนไปตามปริมาณจราจร รวมทั้งการพิจารณาระยะห่างในการขับขึ้นตามกันอย่างปลอดภัยตามสภาพความเร็วที่ใช้บนทางหลวงหมายเลข 1141 แสดงดังรูปที่ 5 เพื่อนำไปใช้ในการแก้ไขปัญหาอุบัติเหตุที่เกิดจากการชนท้ายและจัดทำเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Dot” เพื่อช่วยผู้ขับขี่ให้ทราบว่าจะเว้นระยะห่างที่ปลอดภัยในการขับรถตามกันพบว่าระยะห่างในการขับขึ้นตามกันบริเวณสถานที่ทำการทดลองมากขึ้น ณ อัตราการไหลค่าต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลงานวิจัยดังกล่าวมีส่วนช่วยลดโอกาสของการเกิดอุบัติเหตุจากการชนท้าย การศึกษาที่ผ่านมาทั้งต่างประเทศและในประเทศไทยทำให้ทราบว่าการติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรสามารถช่วยลดความเร็วของผู้ขับขี่และช่วยให้ผู้ขับขี่เพิ่มระยะห่างในการขับรถ

ตามคันหน้าได้ โดยการใช้เทคนิคคำนวณระยะห่างระหว่างเครื่องหมายบนผิวจราจร พร้อมทั้งข้อมูลอัตราการไหลที่แตกต่างกันไปตามพื้นที่ศึกษา ทำให้การนำมาประยุกต์ใช้จำเป็นต้องคำนวณระยะห่างระหว่างเครื่องหมายบนผิวจราจรให้สอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและระยะห่างระหว่างรถยนต์ของพื้นที่ที่ติดตั้งนั้นๆ จึงมีโครงการนำร่องติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” บนทางหลวง

แผ่นดินหมายเลข 35 สายธนบุรี-ปากท่อหรือถนนพระรามที่ 2 โดยศึกษาและกำหนดระยะห่างที่ปลอดภัยระหว่างรถของตนเองกับรถคันหน้าคือ 47 เมตร การศึกษานี้จึงทำการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” สำหรับการเว้นระยะห่างระหว่างรถที่ปลอดภัยของรถที่ขับตามกันของโครงการนำร่องที่ได้ติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแล้ว



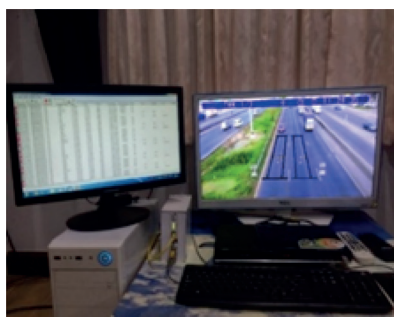
รูปที่ 5 การติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Dot” บนทางหลวงหมายเลข 1141

3. วิธีการวิจัย

3.1 การเก็บข้อมูลภาคสนามและวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนาม

ขั้นตอนการเก็บข้อมูลภาคสนามจะทำการเก็บข้อมูลโดยใช้กล้องถ่ายวิดีโอบันทึกภาพการจราจร โดยติดตั้งไว้บนสะพานลอยเพื่อไม่ให้เป็นการรบกวนการจราจร ทำการเก็บข้อมูลในช่องจราจรที่อยู่ติดกับเกาะกลาง (Median Lane) และช่องจราจรช่องกลาง (Middle Lane) โดยเก็บข้อมูลทั้ง 2 ทิศทาง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

การวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนาม หมายถึง การวิเคราะห์ข้อมูลกระแสจราจร จากอุปกรณ์แปลงภาพเคลื่อนไหวเป็นข้อมูลจราจร (Autoscope) ที่รวบรวมมาจากการเก็บข้อมูลทั้งหมดทั้งก่อนและหลังติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” ทำการวิเคราะห์ ความเร็ว ปริมาณการไหล ความหนาแน่น ระยะห่างระหว่างรถ และความล่าช้า โดยวิเคราะห์ข้อมูลเป็นราย 5 นาที จนครบ 24 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 6 [6]



รูปที่ 6 การแปลงภาพเคลื่อนไหวจากกล้องวิดีโอเป็นข้อมูลจราจร โดยเครื่องมือ Autoscope

3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและระยะห่างระหว่างรถยนต์

เมื่อได้ข้อมูลจราจรจากการแปลงข้อมูลโดยเครื่องมือ Autoscope แล้วจะนำข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (flow rate) และระยะห่างระหว่างรถยนต์ (distance headway) โดยกำหนดความสัมพันธ์มีลักษณะดังนี้ [6]

$$DH_i = \frac{A}{(Flow_i)^B} + \varepsilon_i \quad (1)$$

โดยที่ DH_i คือ ระยะห่างระหว่างรถยนต์จากข้อมูลช่วงที่ i
 $Flow_i$ คือ อัตราการไหลของปริมาณจราจรจากข้อมูลช่วงที่ i

ε_i คือ ตัวคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ย

A คือ พารามิเตอร์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างรถยนต์ เมื่อ อัตราการไหลของปริมาณจราจรเท่ากับ 1 คันต่อ ชั่วโมงต่อเลน

B คือ พารามิเตอร์เลขชี้กำลังของ อัตราการไหล ไม่มีหน่วย

ทั้งนี้ตั้งสมมติฐานว่าตัวคลาดเคลื่อนมีการกระจายแบบปกติ (Normally Distributed) และมีความเป็นอิสระต่อกันในแต่ละช่วงของข้อมูล ดังนี้

$$\varepsilon_i \sim N[0, \sigma^2]$$

$$f(\varepsilon_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma^2}\varepsilon_i^2}$$

$$\text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = \begin{cases} \sigma^2 & \text{if } i = j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

โดยที่ $f_{\varepsilon}(\varepsilon_i)$ คือ Probability density function (pdf) ของตัวคลาดเคลื่อน สมมติฐานการกระจายตัวของตัวคลาดเคลื่อนที่เป็นแบบปกติ มีความเหมาะสม เนื่องจากตัวคลาดเคลื่อนมีค่าต่อเนื่อง สามารถมีค่า บวก ลบ หรือ ศูนย์ได้ และค่าเฉลี่ยของตัวคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับศูนย์

ดังนั้นสามารถนำวิธีการทางสถิติที่เรียกว่า Maximum Likelihood Estimation มาใช้ในการคำนวณ หาค่าทางสถิติ

ของพารามิเตอร์ A , B และ σ^2 ที่ต้องการทราบจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและระยะห่างระหว่างรถยนต์ได้ สำหรับวิธีการดังกล่าวนี้จะต้องหาค่า log-likelihood function จากข้อมูลทั้งหมดดังนี้

$$\begin{aligned} LL(A, B, \sigma^2) &= \ln\left[\prod_{i=1}^N f(\varepsilon_i)\right] \\ &= \ln\left[\prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \text{EXP}\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_i^2}{\sigma^2}\right)\right] \\ &= -\frac{N}{2} \cdot \ln(2\pi\sigma^2) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^N \left\{ DH_i - \frac{A}{(Flow_i)^B} \right\}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

ในการคำนวณหาพารามิเตอร์ A , B และ σ^2 จะต้องเป็นค่าที่ทำให้ log-likelihood function ในสมการ (3) มีค่ามากที่สุด จากนั้นประมาณค่าความแปรปรวนของพารามิเตอร์แต่ละตัวจาก Information Matrix ของ log-likelihood function

3.3 การวิเคราะห์สถิติการเกิดอุบัติเหตุจาก

การชนท้าย

ทำการรวบรวมข้อมูลอุบัติเหตุบนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 35 สายชลบุรี-ปากท่อหรือถนนพระรามที่ 2 จากระบบสารสนเทศอุบัติเหตุบนทางหลวง (HAIMS) คัดเลือกใช้เฉพาะข้อมูลอุบัติเหตุลักษณะการชนแบบถูกชนท้ายในช่วงปี พ.ศ. 2554 – 2561 จำแนกรายปีบริเวณ กม.23+200 ถึง กม.28+309 โดยจะทำการทดสอบสถิติการเกิดอุบัติเหตุจากการชนท้ายในช่วงปีก่อนการติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” และหลังติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” แล้ว 1 ปี ว่าช่วยลดจำนวนสถิติอุบัติเหตุจากการชนท้ายอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ด้วยการทดสอบแบบปัวส์ซอง (Poisson Test) โดยให้ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปัวส์ซอง คือ

$$f(x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} \quad ; x = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

โดยที่ x คือ ตัวแปรสุ่มจำนวนอุบัติเหตุจากการชนท้าย

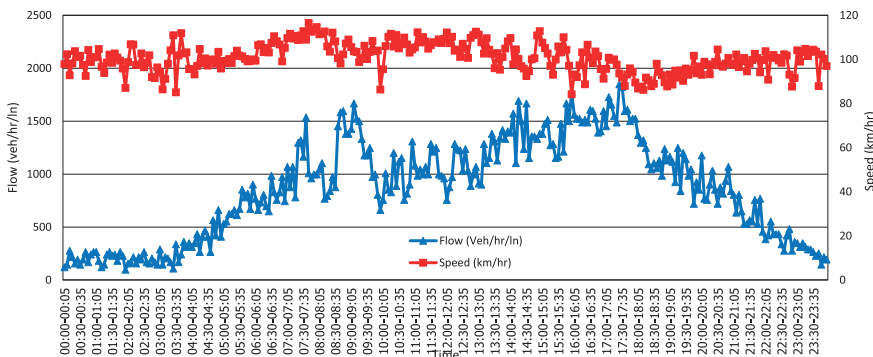
λ คือค่าเฉลี่ยของจำนวนอุบัติเหตุจากการชนท้ายที่เกิดขึ้นในช่วงเวลานั้น

4. ผลการศึกษา

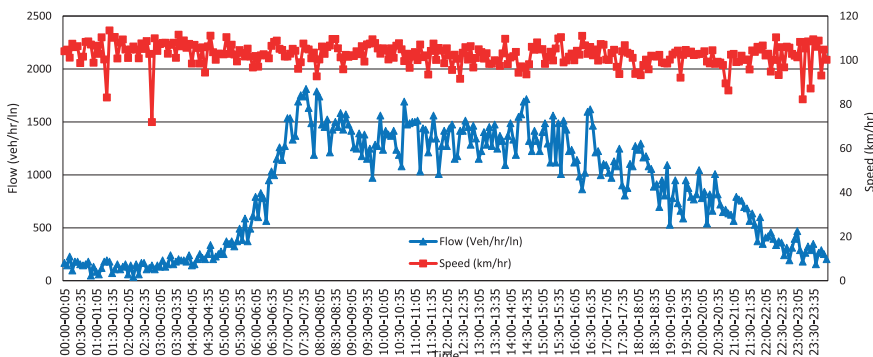
4.1 ความเร็วและการไหลของการจราจรหลังติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar”

ความเร็วและการไหลของการจราจรในช่วงเวลาต่างๆ หลังจากติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” โดยวิเคราะห์ทุกๆ ช่วง 5 นาทีตลอด 24 ชั่วโมง พบว่าความเร็วส่วนมากอยู่ในช่วงประมาณ 70 – 110 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของจราจรในช่วงเวลากลางวันจะสูงกว่าช่วง

กลางคืน โดยอัตราการไหลของทิศทางขาเข้า กทม. จะสูงในช่วงบ่ายตั้งแต่เวลาประมาณ 14.00 น. และค่อยๆ ลดลงตั้งแต่ 18.00 น. โดยจะมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงวันทำงาน ส่วนอัตราการไหลของทิศทางขาออก กทม. จะมีค่าสูงในช่วงเวลาเช้าตั้งแต่เวลาประมาณ 7.30 โดยจะมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงวันหยุดสุดสัปดาห์ ซึ่งจากข้อมูลที่ทำการสำรวจตลอด 24 ชั่วโมง ช่วงอัตราการไหลที่มีมาก มีค่าประมาณ 1,000 – 1,700 คัน/ชั่วโมง/เลน แสดงดังรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 7 ความเร็วและการไหลของการจราจรทิศทางขาเข้า กทม. ในช่วงวันทำงาน



รูปที่ 8 ความเร็วและการไหลของการจราจรทิศทางขาออก กทม. ในช่วงวันหยุดสุดสัปดาห์

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและระยะห่างระหว่างรถยนต์

4.2.1 ค่าพารามิเตอร์ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและระยะห่างระหว่างรถยนต์

เพื่อเป็นการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” จึงหาค่าทางสถิติของพารามิเตอร์ A, B และ σ^2 ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและระยะห่างระหว่างรถยนต์หลังติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” ใน 4 ช่วงเวลา คือ ระยะก่อนติดตั้ง

ระยะหลังติดตั้ง 1 สัปดาห์ ระยะหลังติดตั้ง 1 เดือน ระยะหลังติดตั้ง 2 เดือน และระยะหลังติดตั้ง 3 เดือน ในช่วงถนนที่ทำการติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar”

สำหรับเลนกลาง และเลนขวาสุด ของทิศทางขาเข้า กทม. ในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ สำหรับเลนกลาง และเลนขวาสุดของทิศทางขาออก กทม. ในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ เลนกลาง ทิศทางขาเข้า กทม.

ตัวแปร	ระยะก่อนติดตั้ง	ระยะหลังติดตั้ง			
		1 สัปดาห์	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน
σ^2	65.67	169.65	127.62	291.46	76.55
A	69,226.85	71,837.91	58,210.94	62,456.03	71,844.94
B	0.9773	0.9638	0.9405	0.9564	0.9896

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ เลนขวาสุด ทิศทางขาเข้า กทม.

ตัวแปร	ระยะก่อนติดตั้ง	ระยะหลังติดตั้ง			
		1 สัปดาห์	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน
σ^2	179.22	262.29	2,149.98	683.66	158.12
A	84,471.07	90,497.54	78,712.72	77,510.52	89,388.72
B	0.9917	0.9829	0.9883	0.9736	1.0100

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ เลนกลาง ทิศทางขาออก กทม.

ตัวแปร	ระยะก่อนติดตั้ง	ระยะหลังติดตั้ง			
		1 สัปดาห์	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน
σ^2	397.65	113.75	380.20	99.78	310.96
A	87,333.64	97,557.19	93,241.22	93,058.51	86,900.10
B	1.0175	1.0096	1.0076	1.0055	0.9998

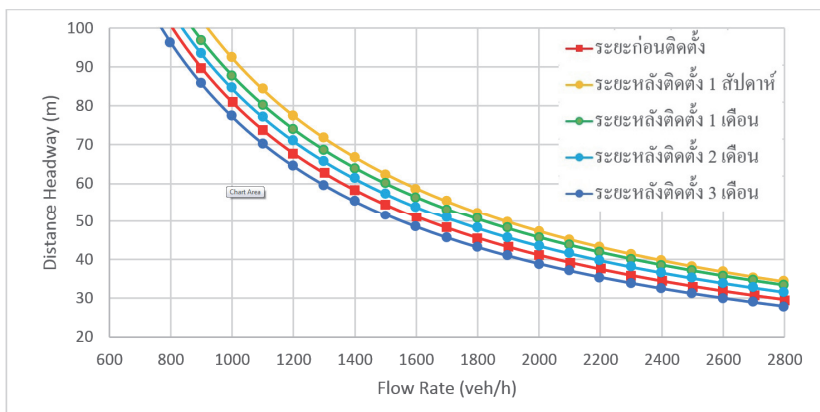
ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ เลนขวาสุด ทิศทางขาออก กทม.

ตัวแปร	ระยะก่อนติดตั้ง	ระยะหลังติดตั้ง			
		1 สัปดาห์	1 เดือน	2 เดือน	3 เดือน
σ^2	798.27	489.97	897.12	357.68	1,779.75
A	113,437.69	110,561.90	126,982.72	112,022.36	123,803.85
B	1.0468	1.0121	1.0394	1.0195	1.0451

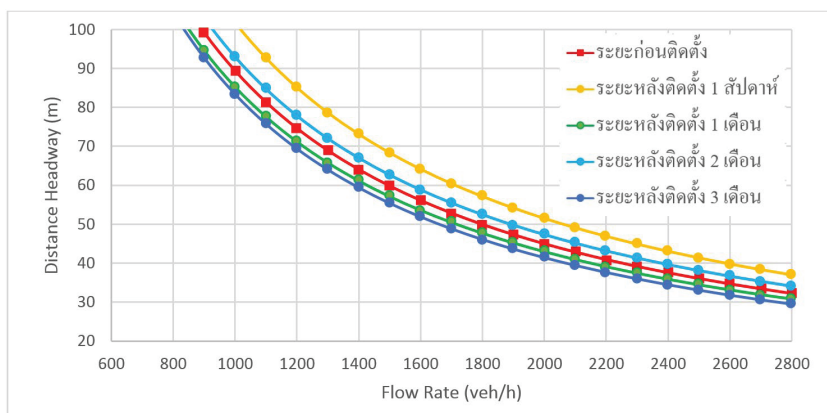
4.2.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตรา การไหลและระยะห่างระหว่างรถยนต์

ทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและระยะห่างระหว่างรถยนต์ในระยะก่อนและหลังติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” ทั้ง 4 ช่วงเวลาแยกตามทิศทางการจราจรและช่องจราจร แสดงดังรูปที่ 9 – 12 พบว่า ระยะห่างระหว่างรถยนต์มีความแตกต่างกัน โดยระยะห่างระหว่างรถยนต์ในระยะหลังติดตั้งเครื่องหมายบนผิว

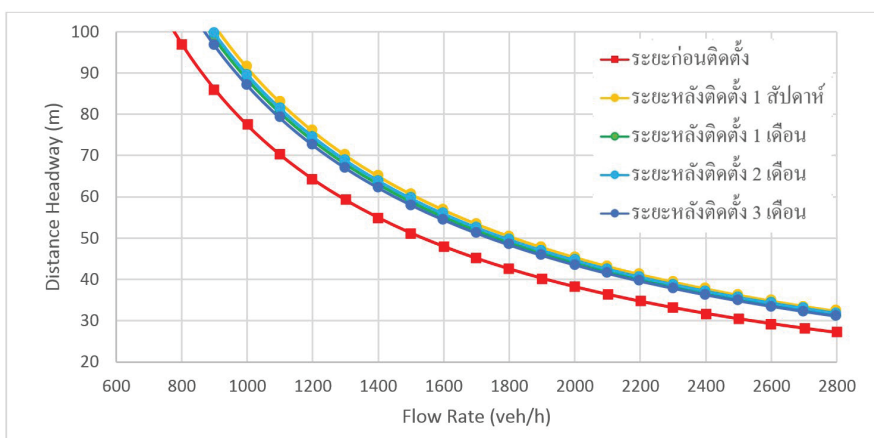
จราจรแบบ “Transverse Bar” โดยรวมเพิ่มสูงขึ้นกว่าระยะก่อนติดตั้งอย่างเห็นได้ชัดเจน และพบว่าเมื่อระยะเวลาผ่านไป ระยะหลังติดตั้ง 1 สัปดาห์ ระยะหลังติดตั้ง 1 เดือน ระยะหลังติดตั้ง 2 เดือน และระยะหลังติดตั้ง 3 เดือนประสิทธิภาพของเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” จะค่อยๆ ลดลงตามลำดับ ระยะห่างระหว่างรถยนต์จะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป



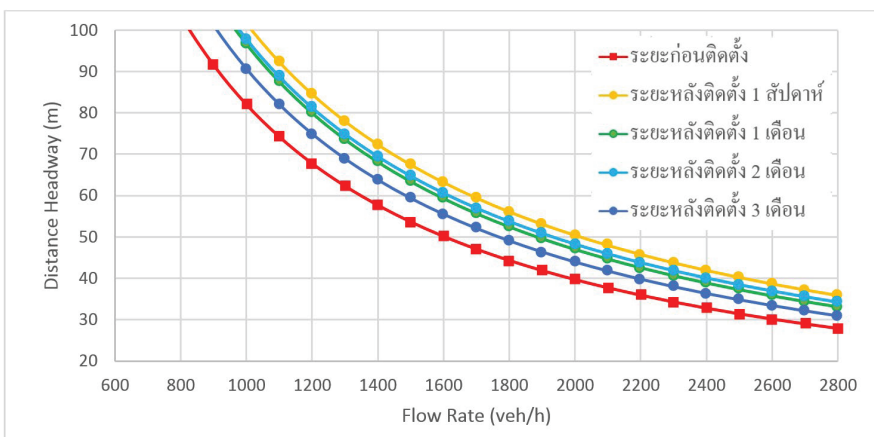
รูปที่ 9 อัตราการไหลและระยะห่างระหว่างรถยนต์ทิศทางขาเข้า กทม. เลนกลาง



รูปที่ 10 อัตราการไหลและระยะห่างระหว่างรถยนต์ทิศทางขาเข้า กทม. เลนขวาสุด



รูปที่ 11 อัตราการไหลและระยะห่างระหว่างรถยนต์ที่ศทางขาออก กทม. เลนกลาง



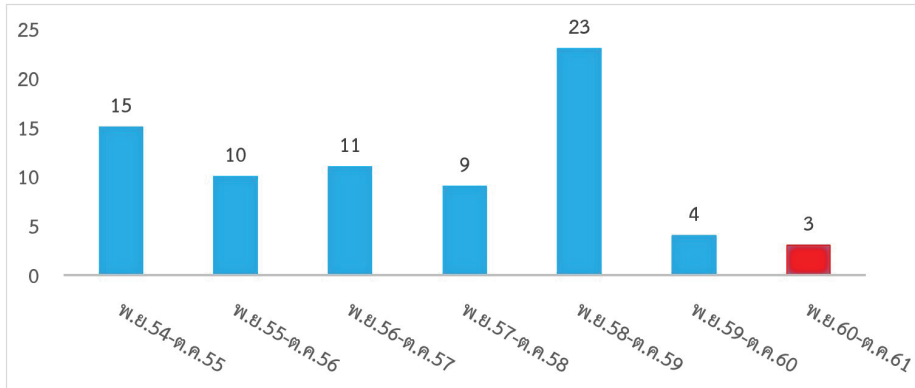
รูปที่ 12 อัตราการไหลและระยะห่างระหว่างรถยนต์ที่ศทางขาออก กทม. เลนขวาสุด

4.3 การวิเคราะห์สถิติการเกิดอุบัติเหตุจากการชนท้ายหลังติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar”

รวบรวมข้อมูลอุบัติเหตุบนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 35 สายธนบุรี-ปากท่อหรือถนนพระรามที่ 2 คัดเลือกใช้เฉพาะข้อมูลอุบัติเหตุลักษณะการชนแบบถูกชนท้ายในช่วงปี พ.ศ. 2554 – 2561 จำแนกรายปีบริเวณ กม.23+200 ถึง กม.28+309 แบ่งเป็นช่วงก่อนติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2554 ถึง ตุลาคม 2560 และหลังติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ

“Transverse Bar” แล้วเสร็จเริ่มตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2560 ถึง ตุลาคม 2561 เป็นระยะเวลา 1 ปี พบว่า จำนวนอุบัติเหตุลักษณะการชนแบบถูกชนท้ายบริเวณพื้นที่ศึกษาเกิดขึ้นเพียง 3 ครั้ง ซึ่งน้อยกว่าในช่วงก่อนติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” ตลอด 6 ปีก่อนหน้านั้น แสดงดังรูปที่ 13 งานวิจัยในด้านการวิเคราะห์สถิติอุบัติเหตุ มักจะพิจารณาจำนวนการเกิดอุบัติเหตุในช่วงเวลา 1 ปี ว่ามีการกระจายตัวแบบปัวส์ซอง (Poisson Distribution) ซึ่งเป็นการกระจายตัวประเภท ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Probability Distribution)

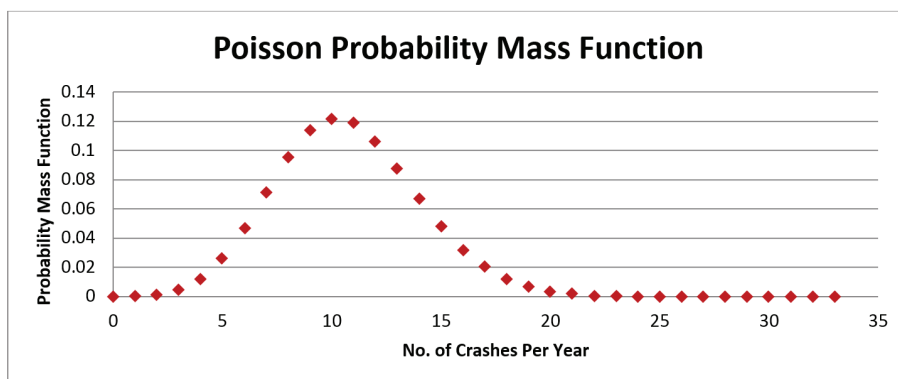
จำนวนครั้ง



รูปที่ 13 สถิติอุบัติเหตุจากการชนท้ายบริเวณพื้นที่ศึกษา

ทำการทดสอบแบบปัวส์ซอง (Poisson Test) ว่าเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” ช่วยลดจำนวนสถิติอุบัติเหตุจากการชนท้ายอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ เมื่อ λ คือค่าเฉลี่ยของจำนวนอุบัติเหตุจากการชนท้ายที่เกิดขึ้นในช่วงเวลานั้นมีค่าเท่ากับ 10.714 ครั้งต่อปี และความน่าจะเป็นของจำนวนอุบัติเหตุจากการชนท้ายโดยการแจกแจงแบบปัวส์ซองแสดงดังรูปที่ 14 และตารางที่ 5 พบว่า ค่าความน่าจะเป็น

โดยการแจกแจงแบบปัวส์ซองของจำนวนอุบัติเหตุจากการชนท้ายน้อยกว่าเท่ากับ 3 ครั้งต่อปี มีค่าเท่ากับ 0.00609 นั่นหมายความว่ามีความน่าจะเป็นเพียง 0.609% ที่มีโอกาสเกิดอุบัติเหตุจากการชนท้ายจำนวนน้อยกว่าเท่ากับ 3 ครั้งต่อปี ดังนั้น การติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” มีส่วนช่วยลดจำนวนอุบัติเหตุจากการชนท้ายอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 99.39%



รูปที่ 14 สถิติอุบัติเหตุจากการชนท้ายบริเวณพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 5 Poisson Probability

No. of Rear-End Crashes x	Prob(X=x)	Prob(X≤x)	Prob(X>x)
0	2.22252E-05	2.22252E-05	0.999978
1	0.000238127	0.000260352	0.99974
2	0.001275679	0.00153603	0.998464
3	0.004555995	0.006092026	0.993908
4	0.012203559	0.018295584	0.981704
5	0.026150483	0.044446067	0.955554
6	0.04669729	0.091143357	0.908857

5. สรุปผลงานวิจัย

การประเมินประสิทธิผลของเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” มีส่วนช่วยให้ผู้ขับขี่เว้นระยะห่างระหว่างรถตนเองกับรถคันหน้าเพิ่มมากขึ้น แต่ประสิทธิผลจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป และในด้านระยะยาวการติดตั้งเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” บนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 35 สายชนบุรี-ปากท่อหรือถนนพระรามที่ 2 มีส่วนช่วยลดจำนวนอุบัติเหตุจากการชนท้ายอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 99.39%

6. ข้อเสนอแนะ

แม้ว่าเครื่องหมายบนผิวจราจรแบบ “Transverse Bar” จะช่วยให้ผู้ขับขี่รักษาระยะห่างเพิ่มมากขึ้น แต่ผลกลับค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้นหากต้องการลดความเสี่ยงอุบัติเหตุจากการชนท้าย ผู้ขับขี่ควรปรับเปลี่ยนพฤติกรรมในการขับขี่ด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และกรมทางหลวง โดยได้รับสนับสนุนทุนวิจัยจาก มูลนิธิไทยโรดส์ สำนักงานกองทุน สนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส.)

8. เอกสารอ้างอิง

1. Pongpullponsak, A., Laosirihongthong, T. and

Kuakasemboon, K., 2004, “The Study of Factors Component Relating to Road Accidents,” *KMUTT Research and Development Journal*, 27 (3), pp. 333 - 355. (In Thai)

2. Department of Public Safety, 2006, Minnesota Tailgating Pilot Project, USA.

3. Greibe, P., 2009, Chevron Markings on Freeways: Effect on Speed, Gap and Safety, Research Park, Scion-DTU, Denmark.

4. Lertworawanich, P., 2006, “Safe-Following Distances based on The Car-Following Model,” *PIARC International Seminar on Intelligent Transport System (ITS) in Road Network Operations*, Kuala Lumpur, Malaysia.

5. Lertworawanich, P., 2009, “Implementation of DOT Following-distance Pavement Markings in Thailand,” *Proceedings of the Eastern Asia Society of Transportation Studies*, Vol. 7.

6. Karoonsoontawong, A., Punyim, P. and Juntub, S., 2018, A Study of Rear-End Traffic Collision Risk Reduction: A Case Study of National Highway Route 35, Final Report, Thairoads Foundation, Bangkok, Thailand. (In Thai)

การประยุกต์ใช้การบำรุงรักษาเชิงรุกสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

มธุรส มิ่งมงคล¹ และ จิตรา รู้กิจการพานิช²*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

* Corresponding Author: mr_chukiat@yahoo.com

¹ นิสิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 6 มิถุนายน 2562

แก้ไข : 23 ธันวาคม 2562

ตอบรับ : 23 มกราคม 2563

คำสำคัญ :

โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ /

ค่าความพร้อมใช้งาน /

การบำรุงรักษาเชิงรุก / FMEA

โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เป็นกรณีศึกษานี้มีการบำรุงรักษาเชิงป้องกันอยู่แล้ว อย่างไรก็ตาม ในเวลาต่อมา ได้เกิดการขัดข้องของเครื่องจักรเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความพร้อมใช้งานเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่าการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่มีอยู่นั้นอาจไม่เพียงพอที่จะป้องกันการเกิดการขัดข้องของเครื่องจักรได้ งานวิจัยนี้จึงได้นำการบำรุงรักษาเชิงรุกมาเป็นกลยุทธ์ของโรงไฟฟ้า การดำเนินงานเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบด้วย FMEA โดยสร้างเกณฑ์ของความรุนแรง (S) โอกาสเกิด (O) และการตรวจจับได้ (D) แล้วทำการประเมินค่าความเสี่ยงขั้นนำ (RPN) ขั้นตอนต่อไปเป็นการจัดเรียงลำดับความสำคัญของปัญหาเพื่อวิเคราะห์หาแนวทางแก้ไขเชิงรุก เมื่อได้แนวทางแก้ไขแล้วจึงนำมากำหนดเป็นแผนงานเชิงรุก ซึ่งประกอบด้วยปรับปรุงแผนการบำรุงรักษา รวมทั้งปรับปรุงเครื่องจักรเพื่อลดโอกาสเกิดการขัดข้อง หลังจากที่ได้ดำเนินการตามแผนงาน พบว่า สามารถทำให้ค่าความพร้อมใช้งานเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 99.43% เป็น 99.69% ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงจาก 1.20% เป็น 0.41% จำนวนครั้งที่เกิดการขัดข้องลดลง 40.28% และกำลังการผลิตที่สูญเสียลดลง 28.44%

Using of Proactive Maintenance for Solar Power Plant

Mathurot Mingmongkol¹ and Jittra Rukijkanpanich^{2*}

Chulalongkorn University, Wangmai, Pathumwan, Bangkok 10330

* Corresponding Author: mr_chukiat@yahoo.com

¹ Graduate Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.

² Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering.

Article Info

Article History:

Received: June 6, 2019

Revised: December 23, 2019

Accepted: January 23, 2020

Keywords:

Solar Power Plant /

Availability /

Proactive Maintenance /

FMEA

Abstract

A solar power plant under the study is the one, which has already had a preventive maintenance program. However, as the plant operation proceeded, more machine failures were noted. This implies that the implemented preventive maintenance might not be adequate to prevent the failure of the machines. The present study therefore aimed to integrate proactive maintenance program into the strategy of the plant. The study was conducted by first analyzing the failure mode and its effect by failure modes and effect analysis. Criteria on severity (S), occurrence (O) and detection (D) were established; risk priority number was then evaluated. Priority of the problems to analyze and to find the solutions was then assigned. The solutions were finally put into the proactive maintenance program. Such a program consisted of improving the maintenance program itself as well as improving the machines to reduce the occurrence of failures. After implementing the program, the average availability value increased from 99.43% to 99.69%, while the standard deviation decreased from 1.20% to 0.41%. The number of failures decreased by 40.28% and the power loss of production capacity could be reduced by 28.44%

1. บทนำ

ตั้งแต่ปี 2012 เป็นต้นมา กำลังการผลิตของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องประมาณ 5% ต่อปี [4] โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เหล่านี้จำเป็นต้องมีการพัฒนาให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบต่อประชาชน

การบำรุงรักษาเครื่องจักรเป็นกลยุทธ์ที่สำคัญของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพราะการบำรุงรักษาที่ดีย่อมป้องกันการเกิดการขัดข้องของเครื่องจักรได้ อย่างไรก็ตาม โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ยังเป็นเรื่องใหม่สำหรับประเทศไทย แม้จะมีการจัดทำแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันแต่ยังเป็นแบบเน้นการเปลี่ยนอุปกรณ์ตามเวลาที่ผู้จัดหาภายนอก (External provider) ได้กำหนดไว้ตามสัญญาการรับประกัน ทำให้เป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงแผนการบำรุงรักษาโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ส่งผลให้เมื่อมีการขัดข้องของเครื่องจักรจึงค่อนข้างวิธิตำเนินการแก้ไข ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่ารูปแบบการบำรุงรักษาของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นี้ เป็นการบำรุงรักษาเชิงรับ (Reactive Maintenance) เมื่อพิจารณาจากสถิติการขัดข้องของเครื่องจักรและค่าความพร้อมของเครื่องจักร ดังรูปที่ 1 และ 2 พบว่า มีแนวโน้มของการขัดข้องสูงเพิ่มขึ้นและมีค่าความพร้อมการใช้งานที่ไม่สม่ำเสมอ โดยค่าความพร้อมใช้งานเฉลี่ยเป็น 99.43% และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 1.20% ก่อนหน้านั้นทางโรงงานได้กำหนดเป้าหมายของค่าความพร้อมใช้งานไว้ที่ 99.25% ซึ่งเคยทำได้ตามเป้าหมาย จึงมีข้อสงสัยว่าการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่มีอยู่แบบเดิมนั้นอาจไม่เพียงพอที่จะแก้ไขปัญหานี้ได้ จึงทำการสำรวจกลยุทธ์ด้านการบำรุงรักษาที่ใช้ในโรงไฟฟ้าประเภทอื่นๆ และได้ข้อสรุปว่าควรมีการนำการบำรุงรักษาเชิงรุก (Proactive Maintenance) มาเป็นกลยุทธ์ของโรงไฟฟ้าเพื่อป้องกันการเกิดขัดข้องของเครื่องจักรของโรงไฟฟ้า

การบำรุงรักษาเชิงรุกประกอบด้วยการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน Preventive Maintenance, PM) และการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance, PdM) [5] มีงานวิจัยที่ระบุว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การบำรุงรักษาเชิงรับแล้วพบว่าองค์กรที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการบำรุงรักษามาเป็นการบำรุงรักษาเชิงรุกจะสามารถลดต้นทุนการบำรุงรักษาโดยรวมลงได้

ลักษณะสำคัญประการที่หนึ่งของการขัดข้องของเครื่องจักรของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์คือเมื่อเกิดการขัดข้องและหยุดทำงานของอุปกรณ์หนึ่งของระบบการทำงานของเครื่องจักรแล้วจะสามารถทำให้ส่วนอื่นๆ หยุดทำงานไปด้วย ดังนั้น จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องจักรเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของการทำงานส่วนต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้แสดงการวิเคราะห์ทำไม-ทำไม (why-why analysis) [8] การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาโดยการวิเคราะห์ทำไม ทำไม เป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาและหาสาเหตุที่แท้จริง และป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาเกิดซ้ำอีก [10]

ลักษณะสำคัญประการที่สองของวิธีการซ่อมบำรุงเพื่อแก้ไขให้เครื่องจักรกลับมาทำงานได้ดังเดิมนั้นต้องรอให้ทั้งโรงไฟฟ้าหยุดการผลิต ซึ่งหมายถึงว่าการซ่อมบำรุงและแก้ไขทำได้เฉพาะเวลากลางคืน หากทำการซ่อมในเวลากลางวันจะไม่ปลอดภัย เพราะมีกระแสไฟไหลในการผลิตอยู่ ดังนั้น จะเห็นได้ว่าหากเครื่องจักรเกิดเหตุขัดข้องในเวลาเช้าจำเป็นต้องรอถึงเวลาเย็นจึงเข้าไปจัดการแก้ไขได้ ทำให้เครื่องจักรสูญเสียกำลังการผลิตและประสิทธิภาพการผลิตลดลงไปด้วย

ในการบำรุงรักษาเชิงรุกนั้นได้มีการวิเคราะห์ความล้มเหลวหรือข้อบกพร่องและผลกระทบที่เกิดขึ้นที่เรียกกันว่า FMEA (Failure modes and effect analysis) มาประยุกต์ใช้ [1] ซึ่งจากการสำรวจงานวิจัยต่างๆ พบว่า มีงานวิจัยที่ใช้ผลการวิเคราะห์โดยพิจารณาจากโอกาส (Occurrence, O) และความรุนแรง (Severity, S) [2] และยังมีงานวิจัยอื่นๆ ที่ผลการวิเคราะห์พิจารณาจากโอกาส ความรุนแรง และการตรวจจับได้ (Detection, D) [3] การวิเคราะห์จะต้องทำการประเมินเพื่อกำหนดระดับสำหรับปัจจัยทั้งสาม ผลคูณของปัจจัยทั้งสาม (SxOxD) เรียกว่า “Risk Priority Number (RPN)” เมื่อค่า RPN มีค่าสูงแสดงว่าเกิดความเสียหายจากอุปกรณ์นั้นขัดข้องมาก ด้วยเหตุนี้ทำให้อุปกรณ์นั้นต้องได้รับการเอาใจใส่ดูแลมากขึ้น หากอุปกรณ์นั้นเกิดความขัดข้องย่อมสร้างความเสียหายรุนแรงในวงกว้างมาก [11]

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เห็นความสำคัญของการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาแบบเชิงรุก จึงกำหนดวัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อที่จะนำการบำรุงรักษาเชิงรุกมาประยุกต์กับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ผลที่คาดว่าจะได้คือการขัดข้องของเครื่องจักรลดลง ค่าความพร้อมใช้งานสูงขึ้นและมีความสม่ำเสมอ

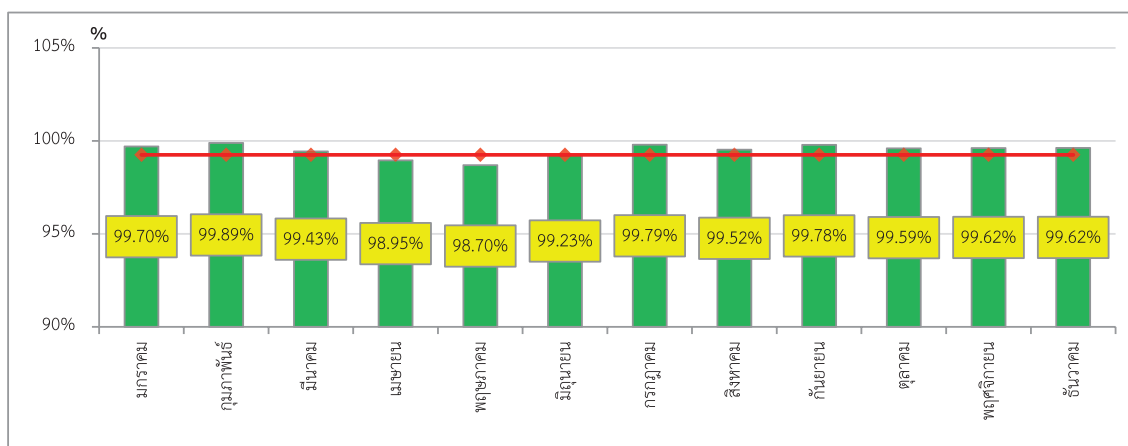
ทั้งนี้ในการนำการบำรุงรักษาเชิงรุกมาใช้ต้องทำการวิเคราะห์ความล้มเหลวหรือข้อบกพร่องและผลกระทบที่เกิดขึ้นของเครื่องจักรของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ รวมทั้งการจัดลำดับความสำคัญ การวิเคราะห์ทำไม-ทำไมเพื่อหารากของสาเหตุ

การวิเคราะห์หาวิธีการตรวจจับความผิดปกติของการทำงานของเครื่องจักรและการปรับปรุงเครื่องจักร มาเป็นส่วนสำคัญของการปรับปรุงให้เป็นแผนการบำรุงรักษาเชิงรุกด้วย

อุปกรณ์ความเสียหาย ปี พ.ศ. 2559

	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รวมเฉลี่ย	กำลังสูญเสีย (kWh)
(เวลา)														
22kV Switchgear breaker												1	1	9,591.84
Coil AC contactor			1		1		1						3	5,210.31
Power module										1	1	1	3	2,756.37
SM-Control Master PV	3				3	7	5	1			1	2	22	15,963.97
PV System controller											1	1	2	1,706.99
DC main contactor	2						2		1		1	1	7	12,529.18
Communication error								1	1				2	512.16
Startup function Inverter								1					1	585.51
Earth leakage faults		1			3	2	1		1		1	1	10	6,647.23
DC Overvoltage	1			5	2	4	4		2	3		1	22	11,215.49
รวม	6	1	1	5	9	13	13	3	5	4	4	8	72	66,699.05

รูปที่ 1 การขัดข้องของเครื่องจักร



รูปที่ 2 ความพร้อมใช้งานของเครื่องจักร พ.ศ. 2559 (ก่อนการปรับปรุง)

2. ทฤษฎีการวิจัย

2.1 โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เป็นกรณีศึกษานี้ตั้งอยู่ภาคกลางของประเทศไทย ผลิตไฟฟ้าที่ 8 MW (AC) กำลังการผลิตติดตั้ง 10.29 MW (DC) มีปริมาณการผลิตไฟฟ้าปีละ 16,274,400 kWh และเป็นโรงไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีแผงโซลาร์

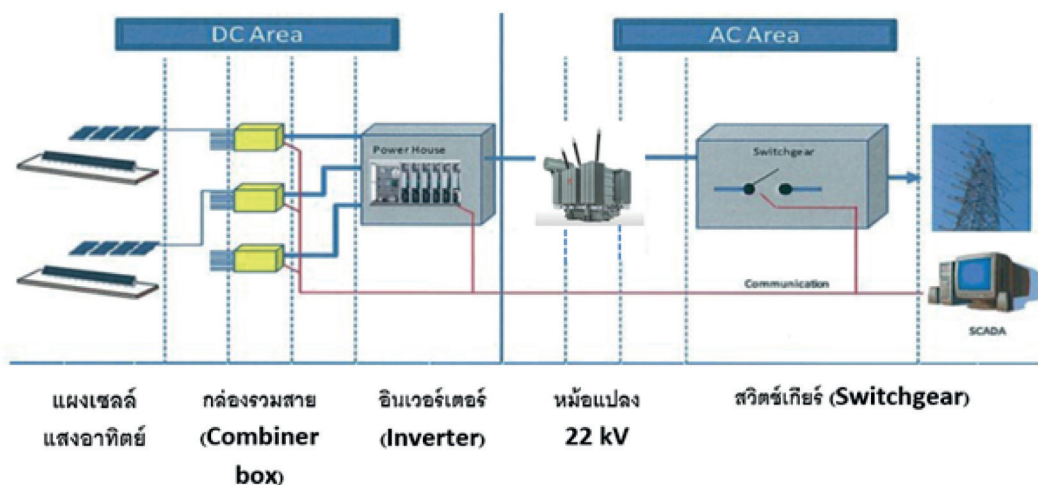
แบบฟิล์มบาง (thin film) ที่มีขนาดใหญ่ โดยติดตั้งมากกว่า 80,889 แผง มีกำลังการผลิตต่อแผง 135 W (Peak) จำหน่ายไฟฟ้าที่ผลิตได้เกือบทั้งหมดให้แก่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ภายใต้สัญญาซื้อขายไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กมาก ประเภทสัญญา Non-Firm โดยคาดว่าโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แห่งนี้จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตลอดอายุโครงการ 25 ปี

และแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานอย่างน้อย 25 ปี เช่นกัน

เครื่องจักรในการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญต่างๆ (ดังรูปที่ 3) ประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV module) กล่องรวมสาย (Combiner box) สวิตช์เกียร์ (Switchgear) และอินเวอร์เตอร์ (Inverter) กล่องรวมสายเป็นกล่องรวมไฟฟ้าที่มาจากสตริง (String) โดยแต่ละหนึ่งกล่องรวมสายจะรวมไฟฟ้าจากการผลิตของสตริง 20 สตริง ซึ่งจะรับแรงดันอยู่ที่ 681 โวลต์และรับกระแสที่ 56.4 แอมป์ อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เป็นกระแสสลับ (AC) และสามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้

โดยอินเวอร์เตอร์จะรับพลังงานไฟฟ้าจากกล่องรวมสาย 24 กล่องรวมสายที่ได้ติดตั้งอยู่ในบ้านของอินเวอร์เตอร์ (Inverter house) ในแต่ละบ้านของอินเวอร์เตอร์จะมีอุปกรณ์ย่อยของอินเวอร์เตอร์ (Power Module) และส่วนของอินเวอร์เตอร์ที่ต่อเข้ากับหม้อแปลงขนาด 22 กิโลโวลต์/400 โวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทางด้านกระแสสลับ (AC) เพื่อแปลงแรงดันเป็น 22 กิโลโวลต์ก่อนขายให้การไฟฟ้า

สำหรับสวิตช์เกียร์นั้นเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันกับตัวตัดวงจรไฟฟ้า (Circuit breaker) เพื่อใช้ในการควบคุม ป้องกัน และแยกอุปกรณ์ไฟฟ้าออกจากระบบ จะนำมาใช้ตัดไฟออกจากอุปกรณ์เพื่อความสะดวกในระหว่างทำงาน



รูปที่ 3 อุปกรณ์หลักของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

2.2 การบำรุงรักษาเชิงรุก ประกอบด้วย การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (PM) และการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (PdM) Dhillion (1989) [6] ได้เปรียบเทียบภาระงานของการบำรุงรักษาเชิงรุกกับการบำรุงรักษาเชิงรับ และสรุปว่าองค์กรต่างๆ จะได้รับประโยชน์จากการบำรุงรักษาเชิงรุก โดยช่วยทำให้ลดภาระงานบำรุงรักษาทั้งหมดลงในขณะเดียวกันประสิทธิภาพการบำรุงรักษาและการผลิตเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ปริมาณงานบำรุงรักษาทั้งหมดสามารถลดลง 20 ถึง 25% ภายในสองปี นอกจากนี้ การบำรุงรักษาเชิงรุกยังสามารถลดผลกระทบที่เกิดจากความล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในระยะยาวได้ด้วย [9]

ข้อแตกต่างระหว่างแผนการบำรุงรักษาแบบ PM กับแผนการบำรุงรักษาแบบ PdM คือ แผนการบำรุงรักษาแบบ PM จะมีการกำหนดกิจกรรมไว้ล่วงหน้าซึ่งมักได้จากการคาดคะเนกิจกรรมในแผนการบำรุงรักษามักประกอบไปด้วย การตรวจสอบสภาพเครื่องจักร อุปกรณ์ การทำความสะอาด การหล่อลื่น การปรับแต่งเครื่องจักร รวมถึงการเปลี่ยนชิ้นส่วนอะไหล่ตามกำหนดเวลา ส่วนแผนการบำรุงรักษาแบบ PdM จะใช้การคาดคะเนหรือการพยากรณ์ความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยใช้เทคนิคต่างๆ ในการติดตามความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักร เช่น การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร

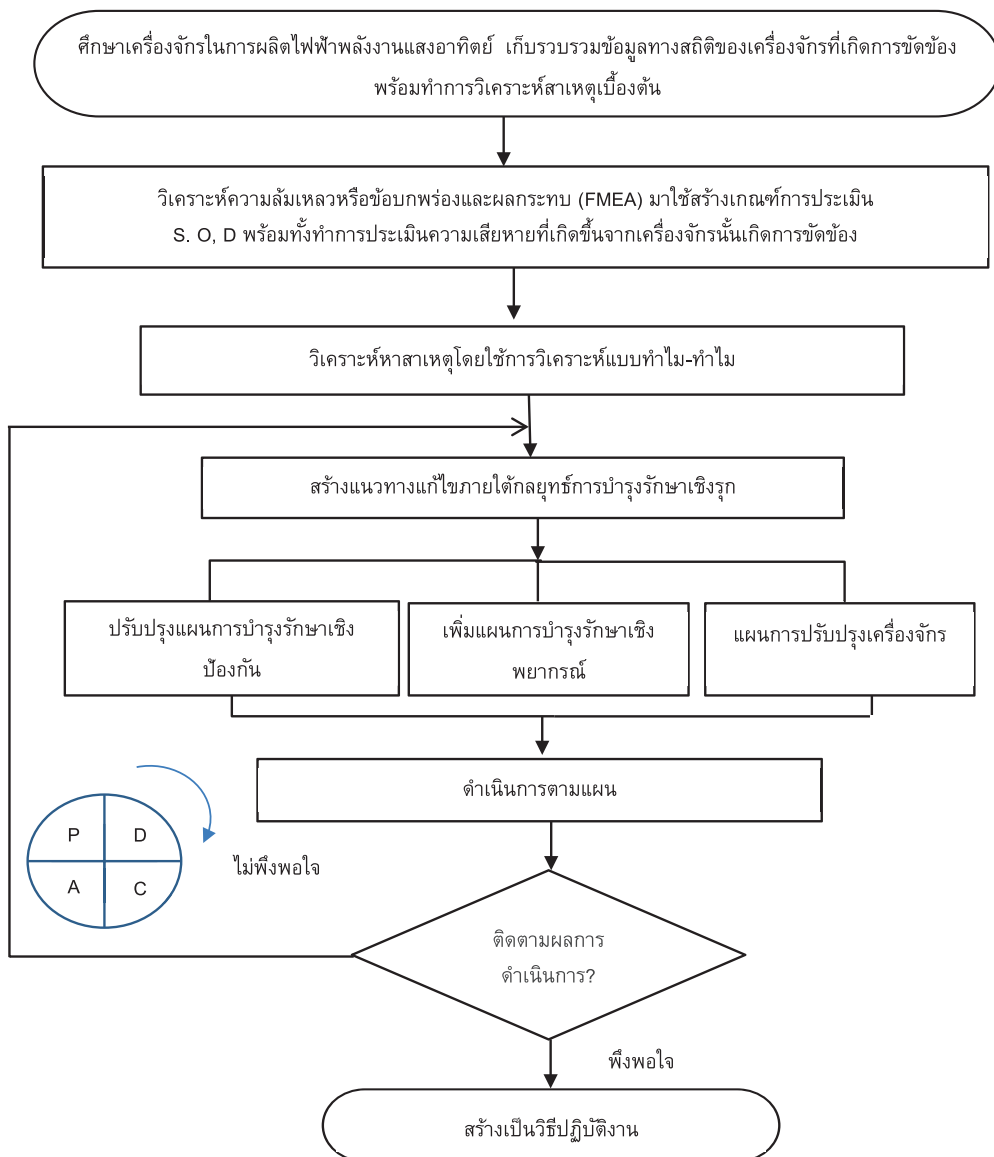
2.3 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA)

เป็นเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์หน้าที่ (function) ของกระบวนการในทุกขั้นตอนแล้วจึงคาดการณ์ถึงปัญหาหรือลักษณะความเสียหาย (failure mode) ที่เกิดจากความไม่สอดคล้องกับหน้าที่ของกระบวนการที่กำหนดไว้ [5] ซึ่งพบว่ามีผู้นำ FMEA ไปใช้อย่างแพร่หลายในงานบำรุงรักษา สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำ FMEA มาใช้วิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบที่จะมีโอกาสเกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของการผลิตกระแสไฟฟ้า

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษากระบวนการทำงานของเครื่องจักรในการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และเก็บรวบรวมข้อมูลทางสถิติของเครื่องจักรที่เกิดการขัดข้องพร้อมทำการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นเบื้องต้น รูปที่ 4 ได้แสดงถึงขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัย

3.2 การวิเคราะห์ความล้มเหลวหรือข้อบกพร่องและผลกระทบ พร้อมทั้งทำการประเมินค่าความเสี่ยงขึ้น (RPN)



รูปที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ผลการประเมินทำให้สามารถจัดลำดับความสำคัญของปัญหา และนำปัญหาสำคัญนั้นมาทำการวิเคราะห์แบบทำไม-ทำไม (why-why analysis) เพื่อหาแนวทางแก้ไขต่อไป

ในขั้นตอนนี้ได้มีจัดตั้งทีมงาน ได้แก่ ผู้จัดการของโรงไฟฟ้า วิศวกรฝ่ายบำรุงรักษา หัวหน้างานฝ่ายซ่อมบำรุง ช่างซ่อมบำรุง

และพนักงานเดินเครื่อง (operator) เพื่อร่วมกันคิดและวิเคราะห์ ตารางที่ 1, 2, และ 3 ได้แสดงเกณฑ์ที่ทีมงานร่วมกันพิจารณา โดยนำข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั่วโมงที่เครื่องจักร ชดช้องกับจำนวนครั้งที่เกิด (ดังรูปที่ 5) มาใช้ในการพิจารณา เกณฑ์ด้วย

ตารางที่ 1 เกณฑ์การให้คะแนนความรุนแรง (S)

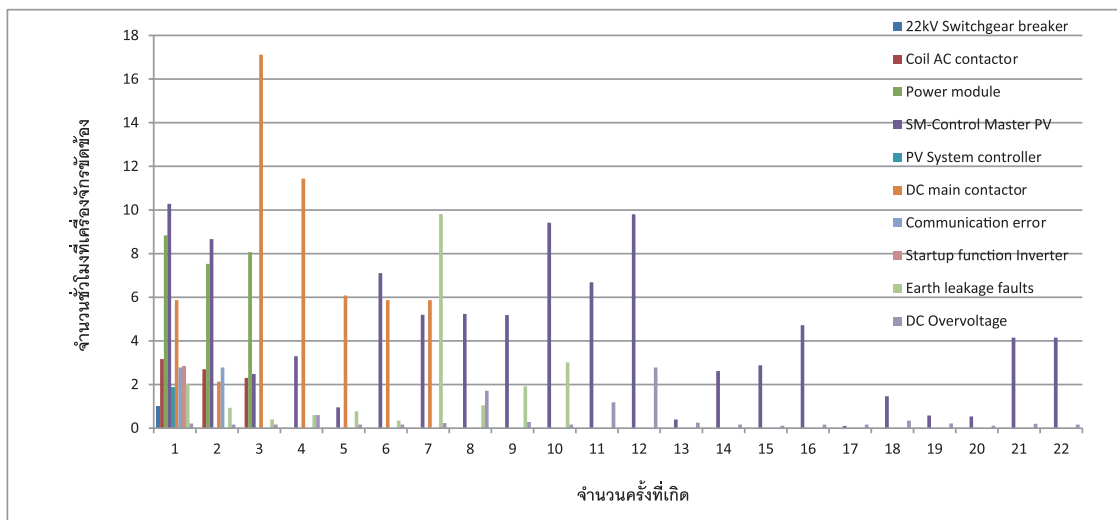
ผลกระทบ	เกณฑ์ของความรุนแรง	คะแนน
ผลกระทบ สูง	ความรุนแรงการเสียหายที่เกิดขึ้นส่งผลให้เครื่องจักรหยุดมากกว่า 18 ชั่วโมง	10
	ความรุนแรงการเสียหายที่เกิดขึ้นส่งผลให้เครื่องจักรหยุดมากกว่า 16 ชั่วโมง แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 18 ชั่วโมง	9
ผลกระทบ ปานกลาง	ความรุนแรงการเสียหายที่เกิดขึ้นส่งผลให้เครื่องจักรหยุดมากกว่า 14 ชั่วโมง แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 16 ชั่วโมง	8
	ความรุนแรงการเสียหายที่เกิดขึ้นส่งผลให้เครื่องจักรหยุดมากกว่า 12 ชั่วโมง แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 14 ชั่วโมง	7
ผลกระทบ ต่ำ	ความรุนแรงการเสียหายที่เกิดขึ้นส่งผลให้เครื่องจักรหยุดมากกว่า 10 ชั่วโมง แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 12 ชั่วโมง	6
	ความรุนแรงการเสียหายที่เกิดขึ้นส่งผลให้เครื่องจักรหยุดมากกว่า 8 ชั่วโมง แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 ชั่วโมง	5
ผลกระทบ ต่ำมาก	ความรุนแรงการเสียหายที่เกิดขึ้นส่งผลให้เครื่องจักรหยุดมากกว่า 6 ชั่วโมง แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 8 ชั่วโมง	4
	ความรุนแรงการเสียหายที่เกิดขึ้นส่งผลให้เครื่องจักรหยุดมากกว่า 4 ชั่วโมง แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 6 ชั่วโมง	3
เกือบไม่มี ผลกระทบ	ความรุนแรงการเสียหายที่เกิดขึ้นส่งผลให้เครื่องจักรหยุดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 4 ชั่วโมง	2
	ไม่มีผลกระทบต่อสายการผลิต	1

ตารางที่ 2 เกณฑ์การให้คะแนนโอกาสในการเกิดความเสียหาย (O)

โอกาสในการเกิด	เกณฑ์ของโอกาสในการเกิดความเสียหาย	คะแนน
สูงมาก	เครื่องจักรขัดข้องเฉลี่ย 1 ครั้งในชั่วโมงการผลิตกระแสไฟฟ้า <450 ชั่วโมง	10
	เครื่องจักรขัดข้องเฉลี่ย 1 ครั้งในชั่วโมงการผลิตกระแสไฟฟ้า >450 ชั่วโมง แต่ < 900 ชั่วโมง	9
สูง	เครื่องจักรขัดข้องเฉลี่ย 1 ครั้งในชั่วโมงการผลิตกระแสไฟฟ้า >900 ชั่วโมง แต่ < 1,350 ชั่วโมง	8
	เครื่องจักรขัดข้องเฉลี่ย 1 ครั้งในชั่วโมงการผลิตกระแสไฟฟ้า >1,350 ชั่วโมง แต่ < 1,800 ชั่วโมง	7
ปานกลาง	เครื่องจักรขัดข้องเฉลี่ย 1 ครั้งในชั่วโมงการผลิตกระแสไฟฟ้า >1,800 ชั่วโมง แต่ < 2,250 ชั่วโมง	6
	เครื่องจักรขัดข้องเฉลี่ย 1 ครั้งในชั่วโมงการผลิตกระแสไฟฟ้า >2,250 ชั่วโมง แต่ < 2,700 ชั่วโมง	5
	เครื่องจักรขัดข้องเฉลี่ย 1 ครั้งในชั่วโมงการผลิตกระแสไฟฟ้า >2,700 ชั่วโมง แต่ < 3,150 ชั่วโมง	4
ต่ำ	เครื่องจักรขัดข้องเฉลี่ย 1 ครั้งในชั่วโมงการผลิตกระแสไฟฟ้า >3,150 ชั่วโมง แต่ < 3,600 ชั่วโมง	3
	เครื่องจักรขัดข้องเฉลี่ย 1 ครั้งในชั่วโมงการผลิตกระแสไฟฟ้า >3,600 ชั่วโมง แต่ < 4,050 ชั่วโมง	2
ต่ำมาก	เครื่องจักรขัดข้องเฉลี่ย < 1 ครั้งในชั่วโมงการทำงาน > 4,050 ชั่วโมง	1

ตารางที่ 3 เกณฑ์การให้คะแนนความสามารถในการตรวจจับ (D)

การตรวจจับได้	เกณฑ์การให้คะแนนความสามารถในการตรวจจับ	คะแนน
เกือบจะเป็นไปไม่ได้	ไม่สามารถตรวจจับหรือควบคุมความเสียหายได้	10
น้อยมาก	ยากที่จะตรวจจับ	9
น้อย	ตรวจจับความเสียหายได้เมื่ออยู่ในแผนกซ่อมบำรุง	8
ต่ำมาก	ตรวจจับความเสียหายได้ด้วยการมองเห็นหรือรับรู้ได้โดยช่างซ่อม	7
ต่ำ	ตรวจจับความเสียหายได้ด้วยผู้ปฏิบัติงาน ประกอบกับการใช้เครื่องมือในการตรวจสอบ	6
พอสมควร	ตรวจจับความเสียหายได้ด้วยโดยผู้ปฏิบัติงานทุกวัน	5
สูงพอสมควร	ตรวจจับความเสียหายได้ภายในกระบวนการด้วยการมองเห็นหรือรับรู้โดยผู้ปฏิบัติงานทุก 3 ชั่วโมง	4
สูง	ตรวจจับความเสียหายได้ภายในกระบวนการด้วยอุปกรณ์ตรวจจับอัตโนมัติ (SCADA System)	3
สูงมาก	ตรวจจับความเสียหายได้อัตโนมัติภายหลังกระบวนการและกระบวนการถูกหยุดเพื่อป้องกันการขัดข้องเพิ่มเติม (SCADA Display on Inverter)	2
สมบูรณ์	ตรวจจับความเสียหายได้อัตโนมัติภายในกระบวนการและกระบวนการถูกหยุดเพื่อป้องกันการขัดข้องลุกลาม	1



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชั่วโมงที่เครื่องจักรขัดข้องกับจำนวนครั้งที่เกิด

3.3 ในการหาแนวทางแก้ไขนั้น ให้นำปัญหาที่มีค่า RPN สูงมาวิเคราะห์หารากของสาเหตุด้วยการวิเคราะห์แบบห้าทำไม แล้วจึงนำไปพิจารณาแนวทางแก้ไข หลังจากนั้นจึงกำหนดเป็นแผนงานของการบำรุงรักษาเชิงรุก อันประกอบด้วย การปรับปรุงเครื่องจักร การเปลี่ยนแปลงวิธีการปฏิบัติงาน การปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันและแผนการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์

3.4 การดำเนินการปรับปรุงตามแผนงานการบำรุงรักษาเชิงรุก ให้ประสบความสำเร็จนั้นได้มีการใช้วงจรเดมมิง (หรือวงจร PDCA) มาประยุกต์ใช้แล้วประเมินงานผลการดำเนินงานรวมถึงประเมินค่า RPN อีกครั้ง ในการประเมินผลความสำเร็จของงานคิดจากค่าเฉลี่ยของความพร้อมใช้งานของเครื่องจักร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จำนวนครั้งที่เกิดการขัดข้อง และกำลังการผลิตที่สูญเสีย เมื่อเป็นพึงพอใจแล้วนำไปกำหนดเป็นวิธีการปฏิบัติงานต่อไป

4. ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการประเมินค่าความเสี่ยงชั้นนำ (RPN) ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าค่า RPN น้อยที่สุดคือ 2 คะแนน และมากที่สุดคือ 480 คะแนน งานวิจัยนี้ได้แบ่งกลุ่มความเสี่ยงชั้นนำออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ค่าความเสี่ยงชั้นนำสูง มีค่า RPN มากกว่า 400

คะแนน ความเสี่ยงชั้นนำปานกลางซึ่งมีค่า RPN มากกว่า 100 คะแนน แต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 400 คะแนน และความเสี่ยงชั้นนำต่ำซึ่งมีค่า RPN มากกว่า 0 คะแนนแต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 100 คะแนน ดังนี้

- กลุ่มความเสี่ยงชั้นนำสูงประกอบด้วย SM-Control Master PV และ DC Main Contractor
- กลุ่มความเสี่ยงชั้นนำปานกลางประกอบด้วย Earth Leakage
- กลุ่มความเสี่ยงชั้นนำต่ำประกอบด้วย DC Overvoltage, อุปกรณ์สื่อสารผิดพลาด, Power Module, Coil AC Contractor, 22kV Switchgear Breaker, Startup Function Inverter, PV System Controller

การดำเนินการปรับปรุงแก้ไขเรียงตามลำดับค่าความเสี่ยงชั้นนำ โดยกลุ่มความเสี่ยงชั้นนำสูงจะได้รับการจัดการก่อน เครื่องจักรที่มีความเสี่ยงชั้นนำสูงที่สุดคือ SM-Control Master PV ซึ่งมีค่า RPN สูงที่สุด (480) จึงได้รับความสำคัญในการปรับปรุงการวางแผนการบำรุงรักษาเป็นอันดับแรก รองลงมาคือ DC Main Contractor, Earth Leakage และ DC Overvoltage ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5

ต่อมาจึงดำเนินการปรับปรุงกลุ่มความเสี่ยงชั้นนำปานกลาง และตามด้วยกลุ่มความเสี่ยงชั้นนำต่ำ

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความเสียหายและผลกระทบ และความเสี่ยงขึ้น (ก่อนการปรับปรุง)

อุปกรณ์ที่เกิดความเสียหาย	ความเสียหาย	ผลกระทบ	S	O	D	RPN
22kV Switchgear breaker	ระบบสายไฟฟ้ากระแสสลับมีไฟฟ้ารั่วลงดิน	เครื่องจักรขัดข้อง เวลาตอบสนองคือ 58 นาทีต่อครั้ง ไม่มีการขัดข้องใน 4,050 ชั่วโมงทำงานและมีการตรวจจับได้อัตโนมัติ	2	1	1	2
Coil AC contactor	เสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน	เครื่องจักรขัดข้อง เวลาตอบสนองคือ 104 นาทีต่อครั้ง มีการขัดข้องใน 1,800 ชั่วโมงทำงานและมีการตรวจจับได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจจับอัตโนมัติ	2	7	3	42
Power module	ระบบสื่อสารเกิดความขัดข้อง	เครื่องจักรขัดข้อง เวลาตอบสนองคือ 65 นาทีต่อครั้ง มีการขัดข้องใน 1,800 ชั่วโมงทำงานและมีการตรวจจับได้ด้วยการมองเห็นหรือรับรู้โดยผู้ปฏิบัติงานทุก 3 ชั่วโมง	2	7	4	56
SM-Control Master PV	ฝุ่นแทรกตัวอยู่ระหว่างจุดเชื่อมต่อของอุปกรณ์	เครื่องจักรขัดข้อง เวลาตอบสนองคือ 974 นาทีต่อครั้ง มีการขัดข้องใน 4,050 ชั่วโมงทำงานและมีการตรวจจับได้โดยผู้ปฏิบัติงาน ประกอบกับการใช้เครื่องมือในการตรวจสอบ	8	10	6	480
PV System controller	พารามิเตอร์เกิดความผิดพลาดไม่ถูกต้อง	เครื่องจักรขัดข้อง เวลาตอบสนองคือ 52 นาทีต่อครั้ง ไม่มีการขัดข้องใน 4,050 ชั่วโมงทำงานและมีการตรวจจับได้อัตโนมัติภายหลังกระบวนการและกระบวนการถูกหยุดเพื่อป้องกันการขัดข้องเพิ่มเติม	2	1	2	4
DC main contactor	ความเข้มของแสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงกะทันหัน	เครื่องจักรขัดข้อง เวลาตอบสนองคือ 1,128 นาทีต่อครั้ง มีการขัดข้องใน 3,600 ชั่วโมงทำงานและมีการตรวจจับได้ภายในกระบวนการด้วยอุปกรณ์ตรวจจับอัตโนมัติ	10	9	5	450

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความเสียหายและผลกระทบ และความเสี่ยงขึ้นน้ำ (ก่อนการปรับปรุง) (ต่อ)

อุปกรณ์ที่เกิด ความเสียหาย	ความเสียหาย	ผลกระทบ	S	O	D	RPN
Communication error	ระบบการสื่อสาร ระหว่างอุปกรณ์เกิด ความขัดข้อง	เครื่องจักรขัดข้อง เวลาตอบสนองคือ 56 นาที่ต่อครั้ง มีการขัดข้องใน 2,250 ชั่วโมงทำงานและมีการตรวจจับได้ ภายหลังกระบวนการด้วยอุปกรณ์ ตรวจจับด้วยตนเองในทุกวัน	2	6	5	60
Startup function Inverter	Startup Function Inverter ทำงาน ผิดพลาด	เครื่องจักรขัดข้อง เวลาตอบสนองคือ 85 นาที่ต่อครั้ง ไม่มีการขัดข้องใน 4,050 ชั่วโมงทำงานและมีการตรวจจับได้ อัตโนมัติภายหลังกระบวนการและ กระบวนการถูกหยุดเพื่อป้องกันการ ขัดข้องเพิ่มเติม	2	1	2	4
Earth leakage faults	เซลล์แสงอาทิตย์แตก และรั่วลงดิน	เครื่องจักรขัดข้อง เวลาตอบสนองคือ 210 นาที่ต่อครั้ง มีการขัดข้องใน 3,600 ชั่วโมงทำงานและมีการตรวจจับได้ ภายหลังด้วยการมองเห็นหรือรับรู้ได้โดย ผู้ปฏิบัติงาน	2	9	8	144
DC Overvoltage	ความเข้มของ แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น กะทันหัน	สัญญาณเตือนแสดงความผิดปกติ เครื่องจักรล้มเหลว เวลาตอบสนองคือ 20 นาที่ต่อครั้ง มีการขัดข้องใน 4,050 ชั่วโมงทำงานและมีการตรวจจับได้ ภายในกระบวนการด้วยการมองเห็นหรือ รับรู้โดยผู้ปฏิบัติงานทุก 3 ชั่วโมง	2	10	4	80

ตารางที่ 5 การปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงรุก

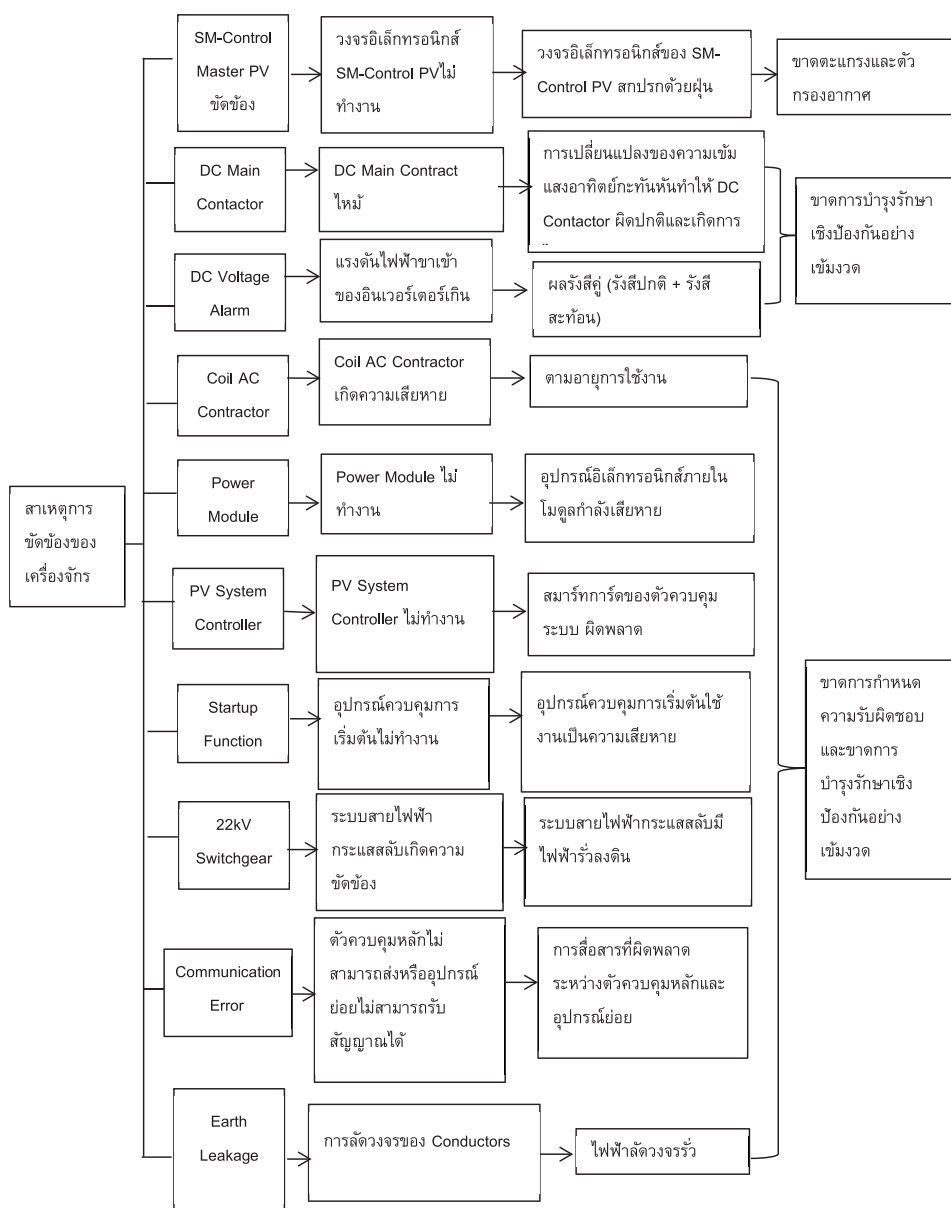
ความเสี่ยง ชั้น	เครื่องจักร/ อุปกรณ์	การบำรุงรักษา
สูง	SM Control Master PV	1) ทำความสะอาดหน้าสัมผัสของ SM control master PV ทุกเดือน 2) ติดตะแกรงดักฝุ่น (Filter) และทำความสะอาดตะแกรงดักฝุ่นทุกเดือน
สูง	DC main contactor	ตรวจวัดค่าความร้อนด้วยเครื่องเทอร์โมสแกน (Thermoscan) เดิมทำ ทุกหนึ่งปี เปลี่ยนเป็นทุกเดือน
กลาง	Earth Leakage	1) เปลี่ยนแปลงความถี่ของการตรวจสอบจาก 1 ปี/ครั้ง เป็น 3 เดือน/ ครั้ง 2) ตรวจสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ว่าแตกหรือไม่ทุกวัน เพื่อลดความ เสี่ยงของกระแสไฟฟ้ารั่วลงดิน 3) ตรวจสอบสายไฟฟ้ากระแสตรงว่าสายขาดหรือฉนวนของสายไฟฟ้า มีรอยเสียหายหรือไม่
ต่ำ	Communication error	ตรวจสอบอุปกรณ์สื่อสาร เช่น Ethernet switch, RTU, ระบบ SCADA ทุกปี
ต่ำ	DC Overvoltage	ตรวจสอบ DC Smart Box circuit breaker ทุกเดือน
ต่ำ	Power Module	เปลี่ยนแปลงความถี่ของการตรวจสอบจาก 1 ปี/ครั้ง เป็น 3 เดือน/ครั้ง สิ่งที่ตรวจสอบ ได้แก่ พัดลมระบายความร้อนของ Power module ระบบสื่อสารระหว่าง Power module กับ PV system controller
ต่ำ	Coil AC Contactor	เดิม เปลี่ยน Coil AC contactor เมื่อมีการเสียหาย เป็นเปลี่ยน ทุกปี
ต่ำ	PV System Controller	เปลี่ยนสมาร์ทการ์ด (Smart card) และ ตรวจสอบความถูกต้องของ พารามิเตอร์ของสมาร์ทการ์ด ทุก 6 เดือน
ต่ำ	Startup function inverter	ตรวจสอบการทำงานของระบบ Startup function inverter ทุกปี
ต่ำ	22kV Switchgear	1) เปลี่ยนแปลงความถี่ของการตรวจสอบจาก 3 เดือน/ครั้ง เป็นทุก เดือน สิ่งที่ตรวจสอบได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า อุปกรณ์ในตู้ Switchgear
	Breaker	สายไฟฟ้ากระแสสลับในระบบทั้งระดับแรงดัน 400 โวลต์ และ 22 กิโล โวลต์ ฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์อยู่ในสภาพดีเพื่อลดความเสี่ยงที่จะทำ ให้เกิดกระแสรั่วระหว่างเฟส หรือรั่วลงดิน 2) เปลี่ยนแปลงความถี่ของการตรวจสอบจากทุกหนึ่งเดือน เป็นทุก 15 วัน สิ่งที่ตรวจสอบ ได้แก่ สายส่งระดับแรงดัน 115 กิโลโวลต์ ว่ามี ความเสี่ยงที่จะทำให้ไฟรั่วลงดินจากต้นไม้พาดสายส่งตลอดเส้นทาง จากโรงไฟฟ้าถึงการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

4.2 ผลการวิเคราะห์หารากของสาเหตุเมื่อทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา SM-Control Master PV เกิดการขัดข้อง แสดงดังรูปที่ 6 โดยมีรากของสาเหตุได้แก่ (1) การไหม้ และ (2) ไม่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำรองเพียงพอ ซึ่งการแก้ไขที่จัดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำรองให้เพียงพอ นั้นยังไม่ใช่การแก้ไข ปัญหาที่แท้จริง แต่สาเหตุที่แท้จริงของความเสียหายมาจาก ความสกปรกของฝุ่น ดังนั้นสรุปสาเหตุหลักสามประเด็นดังนี้

1) การขาดตะแกรงและเครื่องกรองอากาศเพื่อป้องกันไม่ให้ฝุ่นละอองและแมลงเข้าไปในแผงวงจรอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (ดังรูปที่ 7)

2) ขาดการบำรุงรักษาเชิงป้องกันอย่างเข้มงวด

3) ขาดการกำหนดผู้รับผิดชอบต่อการตอบโต้แก้ไข เครื่องจักรเมื่อเกิดการขัดข้อง



รูปที่ 6 การวิเคราะห์หารากของสาเหตุของการเสียของเครื่องจักรในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 7 ตะแกรงเพื่อป้องกันแมลง

5. สรุปผล

จากเดิมเครื่องจักรของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้ค่อนข้างยากที่จะรู้ล่วงหน้าว่าจะเกิดเหตุขัดข้องเมื่อใดและไม่สามารถวางแผนเปลี่ยนชิ้นส่วนก่อนที่อุปกรณ์จะเสียหาย จึงเป็นเหตุให้โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีการบำรุงรักษาแบบเน้นการตรวจสอบปีละครั้งและแก้ไขเมื่อตรวจพบความผิดปกติ ซึ่งจะเป็นการบำรุงรักษาเชิงรับ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าการนำการบำรุงรักษาแบบเชิงรุกสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษาและการผลิตสำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ โดยทำการวิเคราะห์ความขัดข้องที่ก่อให้เกิดผลกระทบ ทำการกำหนดเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินค่าความเสี่ยงขึ้นจากสถิติเครื่องจักรขัดข้อง ทำการจัดลำดับความสำคัญของความขัดข้อง และทำการวิเคราะห์ ทำไม-ทำไม เพื่อหาสาเหตุของความขัดข้อง รวมถึงการนำวงจร PDCA มาใช้เพื่อติดตามและปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาและกิจกรรมจนกว่าผู้ปฏิบัติงานจะสามารถทำงานได้อย่างราบรื่น แล้วจึงกำหนดเป็นมาตรฐานการปฏิบัติงานบำรุงรักษา

ผลของการดำเนินการวิเคราะห์จนกระทั่งได้แผนการบำรุงรักษาเชิงรุก พบว่าสิ่งที่แตกต่างไปจากแผนเดิมคือการตรวจจับได้ (Detection) และการเพิ่มความถี่ในการตรวจจับนั้น รวมทั้งการติดตั้งอุปกรณ์กันฝุ่นและแมลงซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการ

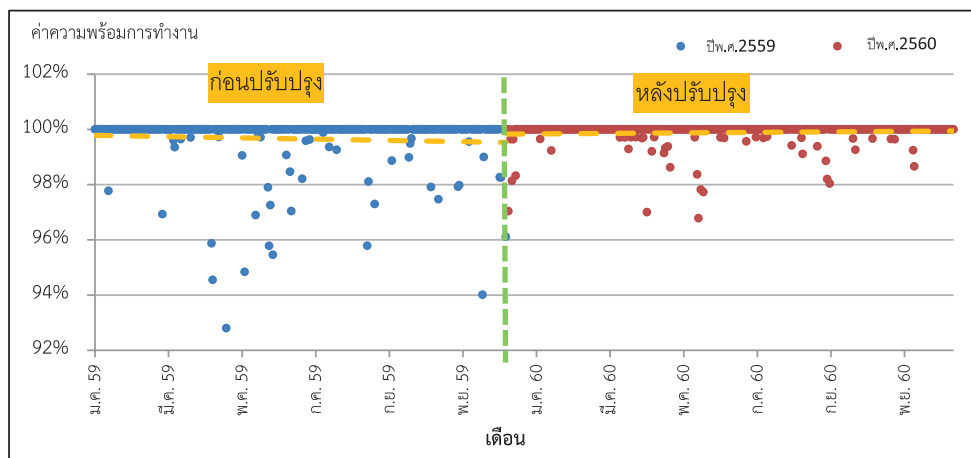
ขัดข้องของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ภายหลังการปรับปรุงได้ทำการประเมินค่าความเสี่ยงขึ้นอีกครั้งพบว่ามีความเสี่ยงขึ้นาลดลง ดังแสดงในตารางที่ 6 และยังพบว่าดัชนีต่างๆ ดีขึ้นดังนี้

- เพิ่มค่าเฉลี่ยของความพร้อมการใช้งานเครื่องจักร (Machine Availability) เพิ่มขึ้นจาก 99.43 % ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.20% เป็น 99.69% ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.41% (ดังรูปที่ 8)
- ค่าเวลาการสูญเสีย (Lost Time) ลดลงจาก 13,421 นาฬิกา/ปี เหลือ 4,967 นาฬิกา/ปี คิดเป็นลดลง 62.99%
- กำลังการสูญเสีย (Power Loss) ลดลงจาก 66,699 นาฬิกา/ปี เหลือ 47,731 นาฬิกา/ปี คิดเป็นลดลง 28.44%
- จำนวนการเกิดเหตุขัดข้องของเครื่องจักรลดลงจาก 72 ครั้ง/ปี เหลือ 43 ครั้ง/ปี คิดเป็นลดลง 40.28%

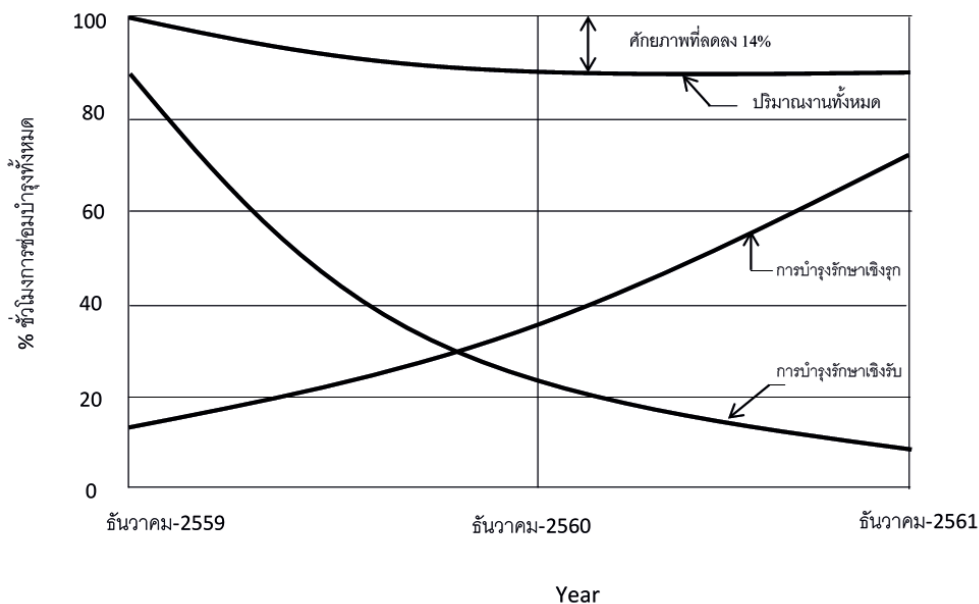
เมื่อเปรียบเทียบภาระงานของการบำรุงรักษาเชิงรับ (ก่อนการปรับปรุง เกิดขึ้นก่อน ธันวาคม 2559) และภาระงานของการบำรุงรักษาเชิงรุก (หลังการปรับปรุง ตั้งแต่ มกราคม 2560 ถึง ธันวาคม 2560) จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9 ซึ่งสามารถลดภาระงานของการบำรุงรักษาทั้งหมดลงได้ 14% ภายในเวลาหนึ่งปี และมีข้อสังเกตเพิ่มเติมได้ว่าไม่มีภาระงานการบำรุงรักษาทั้งหมดเพิ่มขึ้นอีกในปีต่อมา (มกราคม 2561 ถึง ธันวาคม 2561)

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่าความเสี่ยงขึ้นาก่อนและหลังการปรับปรุง

อุปกรณ์ที่เกิด ความเสียหาย	ก่อนการปรับปรุง				หลังการปรับปรุง				RPN ลดลง
	S	O	D	RPN	S	O	D	RPN	
SM-Control Master PV	8	10	6	480	8	10	4	320	33.33%
DC main contactor	10	9	5	450	10	8	5	400	11.11%
Earth leakage faults	2	9	8	144	2	8	6	96	33.33%
Communication error	2	6	5	60	2	6	5	60	0.00%
DC Overvoltage	2	10	4	80	2	10	3	60	25.00%
Power module	2	7	4	56	2	6	3	36	35.71%
Coil AC contactor	2	7	3	42	2	6	3	36	14.28%
PV System controller	2	1	2	4	2	1	2	4	0.00%
Startup function Inverter	2	1	2	4	2	1	2	4	0.00%
22kV Switchgear breaker	2	1	1	2	2	1	1	2	0.00%



รูปที่ 8 ค่าความพร้อมการทำงานก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง



รูปที่ 9 ภาระงานทั้งหมดในการบำรุงรักษา

6. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้จะส่งผลดียิ่งขึ้นถ้าหาก มีจำนวนพนักงานที่ทำหน้าที่ซ่อมบำรุงมากกว่านี้และมีการอบรมความรู้ในการซ่อมแก่พนักงานเหล่านั้นเพื่อลดเวลาในการซ่อม มีการบริหารจัดการระบบคลังชิ้นส่วนอุปกรณ์ ท้นต่อความต้องการใช้งาน ไม่เกิดเวลารอคอย งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาถึงตัวอย่างการใช้วงจร PDCA ในงานจัดการงานบำรุงรักษารวมทั้งการสร้างทีมงานและองค์ความรู้ของทีมงานจากงานวิจัยของ Rukijanpanich และ Pasuk [7]

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานได้มีการประชุมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลและมีการเปลี่ยนแปลงวิธีการปฏิบัติงานในการบำรุงรักษา จึงใคร่ขอแสดงความขอบพระคุณทีมงานของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แห่งนี้ที่ช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ดี

8. เอกสารอ้างอิง

1. Wongjirattikarn, S., 2013, "Improvement of Preventive Maintenance Planning of an Automobile Shaft Manufacturer by FMEA Technique," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 23 (3), pp. 643-653. (In Thai)
2. Automotive Industry Action Group (AIAG), 2012, Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), 3rd ed.
3. Application of FMEA and AHP to Improve the Dyeing Process in the Sample Factory, Master of Engineering Thesis, Department of Industrial and Management Engineering, Silpakorn University. (In Thai)
4. Bank, D., 2015, "FITT for Investors Crossing the Chasm," Recuperado a partir de [Online], Available: https://www.db.com/cr/en/docs/solar_report_full_length.pdf. [25 April 2018].
5. Deshpande, V.S. and Modak, J.P., 2003, Reliability Centered Maintenance in Electric Power Plant, Washington DC, Harper and Bros.
6. Dhillion, B.S., 1989, Life Cycle Costing: Technique, Models and Applications, Gordon and Breach,

New York.

7. Rukijkanpanich, J. and Pasuk, P., 2018, "Maintenance Management for Transportation Process in Quarry Industry," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 24, pp.185-199.

8. Aarseth, E., 2003, "Playing Research: Methodological Approaches to Game Analysis," *Proceedings of the Digital Arts and Culture Conference*, pp. 28-29.

9. Susto, G.A., Schirru, A., Pampuri, S., McLoone, S. and Beghi, A., 2014, "Machine Learning for Predictive Maintenance: A Multiple Classifier Approach,"

IEEE Transactions on Industrial Informatics, 11 (3), pp. 812-820.

10. Santaweesak, P. and Rukijkanpanich, J., 2017, "Modification Maintenance Period for Masterbatch Production," *KMUTT Research and Development Journal*, 40 (3), pp. 427-445. (In Thai)

11. Manaspiti, P., 2018, "Productivity Analysis and Improvement in Bottling Process through Maintenance Theories," *KMUTT Research and Development Journal*, 41 (2), pp. 199-209. (In Thai)

การศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้ากันเตาที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์และถ่านหินบิทูมินัส

อรรคเดช อับดุลมาติน^{1*} ปกป้อง รัตนชู¹

มหาวิทยาลัยราชภัฏวราชนครินทร์ ต.โคกเคียน อ.เมือง จ.นครราชสีมา 96000

เพ็ญพิชชา คงเพิ่มโกศล² วีรชาติ ตั้งจิรภัทร³ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล⁴

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

* Corresponding Author: akkadath.a@pnu.ac.th

¹ อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

⁴ ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 29 สิงหาคม 2562

แก้ไข : 16 มกราคม 2563

ตอบรับ : 11 กุมภาพันธ์ 2563

คำสำคัญ :

กำลังอัด / เถ้ากันเตา / ปฏิกิริยา

ปอซโซลาน / วัสดุปอซโซลาน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้ากันเตา บดละเอียด 2 ชนิด ได้แก่ เถ้ากันเตาจากถ่านหินลิกไนต์ (GLBA) และเถ้ากันเตาจากถ่านหินบิทูมินัส (GBBA) เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน โดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (OPC) ในมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลการทดสอบพบว่า ในช่วงอายุปลายของมอร์ตาร์ การใช้เถ้ากันเตา GLBA และ GBBA ที่มีปริมาณอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 3.70 และ 3.05 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงที่สุด กำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม) ของมอร์ตาร์ GLBA ที่มีอัตราส่วนที่ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 9-11 ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 13-17 ที่อายุ 90 วัน ขณะที่มอร์ตาร์ GBBA มีกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานอยู่ระหว่างร้อยละ 15-25 และร้อยละ 17-38 ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้ากันเตา GLBA มีค่าน้อยกว่าเถ้ากันเตา GBBA ที่อัตราส่วนที่เท่ากัน อย่างไรก็ตาม เถ้ากันเตา GLBA ยังคงสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยมีค่ากำลังอัดสูงกว่าร้อยละ 80 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 28 วันขึ้นไป

A Study of Pozzolanic Reaction of Two Bottom Ashes Obtained from Lignite and Bituminous Coal Combustion

Akkadath Abdulmatin^{1*}, Pokpong Rattanachu¹,

Princess of Naradhiwas University, Khokkien, Muang, Narathiwat 96000

Penpichcha Khongpermgon², Weerachart Tangchirapat³ and Chai Jaturapitakul⁴

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140

* Corresponding Author: akkadath.a@pnu.ac.th

¹ Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Ph.D. candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

³ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

⁴ Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: August 29, 2019

Revised: January 16, 2020

Accepted: February 11, 2020

Keywords:

Compressive Strength /

Bottom Ash /

Pozzolanic Reaction /

Pozzolanic Material

This study aimed to evaluate the compressive strength due to pozzolanic reaction of two types of ground bottom ash. Ground lignite (GLBA) and bituminous (GBBA) bottom ashes were used as pozzolanic materials to replace ordinary Portland cement (OPC) in mortar at either 10, 20, 30 or 40% by weight of binder. The results showed that at the later age, the use of GLBA and GBBA, which possessed the particles retained on No. 325 sieve of 3.70 and 3.05%, respectively, at 10% and 20% by weight of binder, respectively, resulted in the highest compressive strength of mortar. Compressive strength due to pozzolanic reaction of GLBA mortars with the replacement ratios of 10-40% by weight of binder ranged between 9-11% at 28 days and increased to 13-17% at 90 days of the control mortar. On the other hand, GBBA mortars exhibited compressive strength due to pozzolanic reaction between 15-25% and 17-38% at 28 days and 90 days, respectively. These results indicated that the compressive strength due to pozzolanic reaction of GLBA mortars was lower than that of GBBA mortars at the same replacement rate. However, GLBA could still be used to replace OPC by up to 30% by weight of binder; the resulting mortar exhibited the compressive strength higher than 80% of that of the control mortar at 28 days.

1. บทนำ

ปัจจุบันการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ายังคงมีอย่างต่อเนื่องทั่วโลก และเป็นที่ทราบกันดีว่าหลังจากกระบวนการเผาถ่านหินมีผลพลอยได้หลักๆ อยู่ 2 ส่วน ได้แก่ เถ้าถ่านหิน (fly ash) ประมาณร้อยละ 60-80 และเถ้าก้นเตา (bottom ash) ประมาณร้อยละ 20-40 โดยน้ำหนัก สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตมีอย่างต่อเนื่องทั้งในประเทศไทย และต่างประเทศและมีมาตรฐานรองรับในการใช้งานเป็นวัสดุปอซโซลาน ทำให้ในปัจจุบันเถ้าถ่านหินที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตในประเทศไทยมีปริมาณไม่เพียงพอต่อความต้องการในตลาด ในทางตรงกันข้ามเถ้าก้นเตายังคงนำไปทิ้งโดยไม่มีการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ การทิ้งเถ้าก้นเตาไม่เพียงแต่เป็นการเพิ่มต้นทุนในการกำจัด แต่ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพราะการศึกษาของ Gong และคณะ [1] พบว่ามีการพบโลหะหนัก เช่น Cd, Cr, และ Pb ปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดินบริเวณกองทิ้งของเถ้าก้นเตาและสารเหล่านี้จะถูกชะไหลลงสู่แม่น้ำ ในขณะที่ Di Bella และคณะ [2] รายงานว่าเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากมีองค์ประกอบของโลหะหนักเช่น Ni, Cu, Zn, Pb, และ Cd แต่ปริมาณความเข้มข้นขององค์ประกอบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน [3] ด้วยเหตุนี้หากสามารถใช้เถ้าก้นเตาเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ นอกจากเป็นการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์แล้วยังส่งผลให้โลหะหนักในเถ้าก้นเตาที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมนั้นถูกตรึงไว้ในคอนกรีตได้เช่นเดียวกัน [4]

เถ้าก้นเตาที่ได้รับจากโรงงานโดยตรงมีลักษณะเหมือนทราย มีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับเถ้าถ่านหิน มีนักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาการใช้เถ้าก้นเตาเพื่อนำมาแทนที่มวลรวมละเอียดในคอนกรีต [5-7] อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาบดละเอียดพบว่าเถ้าก้นเตามีศักยภาพเพียงพอที่สามารถใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์หรือใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุประสานได้ [8-9] นอกจากนี้ Jaturapitakkul และ Cheerarot [10] พบว่าเถ้าก้นเตาที่ได้รับจากโรงงานโดยตรงไม่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ แต่เมื่อนำมาบดให้ละเอียดจนมีอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์มาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยไม่ส่งผลกระทบต่อกำลัง

อัดคอนกรีตและมีกำลังอัดเทียบเท่ากับคอนกรีตควบคุมเมื่อคอนกรีตมีอายุ 60 วันขึ้นไป ต่อมา Abdulmatin และคณะ [11] ได้แนะนำว่าหากต้องการนำเถ้าก้นเตามาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานควรบดให้มีอนุภาคค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าดัชนีกำลังไม่ต่ำกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 7 วันขึ้นไปและเมื่อบดเถ้าก้นเตาจนมีอนุภาคค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักสามารถให้ค่าดัชนีกำลังได้สูงกว่าร้อยละ 100 เมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 60 วันขึ้นไป Oruji และคณะ [12] ได้เปรียบเทียบกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตาและเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินซับบิทูมินัส (sub-bituminous) พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตาในส่วนผสมมีค่ากำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าถ่านหินในส่วนผสมในอัตราส่วนการแทนที่เดียวกันอยู่ประมาณร้อยละ 7 อย่างไรก็ตามมอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตาในส่วนผสมไม่เกินร้อยละ 23 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมได้เมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 60 วันขึ้นไป

สำหรับสมบัติทางเคมีของเถ้าก้นเตาและเถ้าถ่านหินมักเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของถ่านหินโดยส่วนใหญ่พบว่าถ่านหินลิกไนต์และถ่านหินซับบิทูมินัสเมื่อเผาแล้วจะได้เถ้าถ่านหินประเภท C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [13] กล่าวคือมีปริมาณผลรวมออกไซด์ของซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริก (Fe_2O_3) อยู่ในช่วงร้อยละ 50 ถึง 70 โดยน้ำหนัก และมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ค่อนข้างสูงมากกว่าร้อยละ 10 ขึ้นไป สำหรับถ่านหินบิทูมินัสหรือแอนตราไซต์หลังจากผ่านการเผาพบว่าเป็นเถ้าถ่านหินประเภท F ซึ่งมีปริมาณผลรวม SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และมักมี CaO ต่ำกว่าร้อยละ 10 สำหรับผลกระทบของ CaO ต่อสมบัติของคอนกรีตและมอร์ตาร์มีการศึกษาโดย Antiohos และคณะ [14] ซึ่งรายงานว่าเถ้าถ่านหินที่มี CaO ต่ำจะให้กำลังอัดช่วงอายุต้นต่ำกว่าเถ้าถ่านหินที่มี CaO สูง เนื่องจากปริมาณปูนขาวอิสระ (free lime) ในเถ้าถ่านหินที่มี CaO สูงสามารถทำปฏิกิริยาเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) โดยไม่อาศัยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) จากผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยการพัฒนา กำลังของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินที่มี CaO ต่ำมีค่ามากขึ้นจนมากกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินที่มี CaO สูงที่อายุ 90 วันขึ้นไป ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่าในช่วง

อายุปลาย กำลังอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินที่มี CaO ต่ำเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน [15]

จากข้อมูลมาข้างต้นเห็นได้ว่าที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เถ้าถ่านหินที่มีความแตกต่างด้านองค์ประกอบทางเคมีหรือเถ้าถ่านหินที่มีจากการเผาถ่านหินต่างชนิดกันในงานคอนกรีต อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาด้านผลกระทบของการใช้เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินต่างชนิดกันต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตซึ่งอาจให้ผลที่แตกต่างออกไปจากกรณีของเถ้าถ่านหิน ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษากำลังอัดและกำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ของเถ้าถ่านหิน 2 แหล่ง ซึ่งมีองค์ประกอบเคมีแตกต่างกัน เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตต่อไป

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อหาปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์และจากถ่านหินบิทูมินัสที่เหมาะสม ที่ให้กำลังอัดของมอร์ตาร์สูงสุด

2.2 เพื่อหาผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์และถ่านหินบิทูมินัสต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์

2.3 เพื่อเปรียบเทียบกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์และจากถ่านหินบิทูมินัส

3. วัสดุที่ใช้ในการศึกษาและวิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)
- เถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (LBA) และเถ้าถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินบิทูมินัส (BBA) ซึ่งอยู่ในสภาพเปียก นำมาอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำเถ้าถ่านหินทั้ง 2 ชนิด มาบดให้มีความละเอียดค่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3 ± 1 โดยน้ำหนัก

- ทราเยมน้ำสำหรับใช้เป็นมวลรวมละเอียดร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 30 และค่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 นอกจากนี้ ยังนำทราเยมน้ำมาบดให้มีความละเอียดค่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 3 ± 1 โดยน้ำหนัก เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยา (nonreactive material; GS)

แทนที่ปูนซีเมนต์สำหรับทำร้อยละกำลังอัดเพื่อหาปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหิน

- น้ำประปา สำหรับใช้ผสมและบ่มมอร์ตาร์
- สารลดน้ำพิเศษประเภท polycarboxylate-based

เพื่อใช้ควบคุมการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ให้อยู่ระหว่างร้อยละ 105 ถึง 115

3.2 การทดสอบสมบัติของวัสดุ

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทดสอบสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) เถ้าถ่านหินจากการเผาถ่านหินลิกไนต์บดละเอียด (GLBA) เถ้าถ่านหินจากการเผาถ่านหินบิทูมินัสบดละเอียด (GBBA) และทราเยมน้ำบดละเอียด (GS) ได้แก่ ค่าร้อยละน้ำหนักค่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Median particle size; d_{50}) และความถ่วงจำเพาะ นอกจากนี้ได้ทดสอบสมบัติเชิงแรงรีเทนชันและความเปราะของวัสดุด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เชิงปริมาณ (XRD Quantitative) สำหรับสมบัติทางเคมีได้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

3.3 ส่วนผสมและการทดสอบมอร์ตาร์

ส่วนผสมของมอร์ตาร์ทั้ง 13 ส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 1 โดยทุกส่วนผสมใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1: 2.75 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B ratio) คงที่เท่ากับ 0.65 มีการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ให้อยู่ระหว่างร้อยละ 105 ถึง 115 โดยใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer; SP) เพื่อช่วยปรับค่าการไหลแผ่ตามต้องการ มอร์ตาร์ควบคุม (CT) ใช้วัสดุประสานจาก OPC ทั้งหมด มอร์ตาร์ที่ใช้ศึกษาแบ่งเป็น 3 ชุด คือ มอร์ตาร์ GLBA, GBBA และ GS ในแต่ละชุดแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุ GLBA, GBBA และ GS ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ใช้มอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด 5 เซนติเมตร หลังจากการหล่อมอร์ตาร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำมอร์ตาร์ออกจากแบบและบ่มมอร์ตาร์ในน้ำปูนขาวอิ่มตัวจนถึงอายุการทดสอบ ทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 [16] ที่อายุ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน โดยค่ากำลังอัดในแต่ละอายุการทดสอบได้จากการเฉลี่ยจากมอร์ตาร์ 5 ตัวอย่าง

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของมอร์ตาร์

มอร์ตาร์	ส่วนผสม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุ ประสาน	การไหลแผ่ (ร้อยละ)
	OPC	GLBA	GBBA	GS	Sand	SP		
CT	100	-	-	-	275	-	0.65	109
GLBA10	90	10	-	-	275	-	0.65	106
GLBA20	80	20	-	-	275	0.05	0.65	108
GLBA30	70	30	-	-	275	0.12	0.65	111
GLBA40	60	40	-	-	275	0.20	0.65	108
GBBA10	90	-	10	-	275	-	0.65	109
GBBA20	80	-	20	-	275	-	0.65	114
GBBA30	70	-	30	-	275	0.05	0.65	113
GBBA40	60	-	40	-	275	0.10	0.65	109
GS10	90	-	-	10	275	-	0.65	113
GS20	80	-	-	20	275	-	0.65	110
GS30	70	-	-	30	275	0.05	0.65	111
GS40	60	-	-	40	275	0.10	0.65	107

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

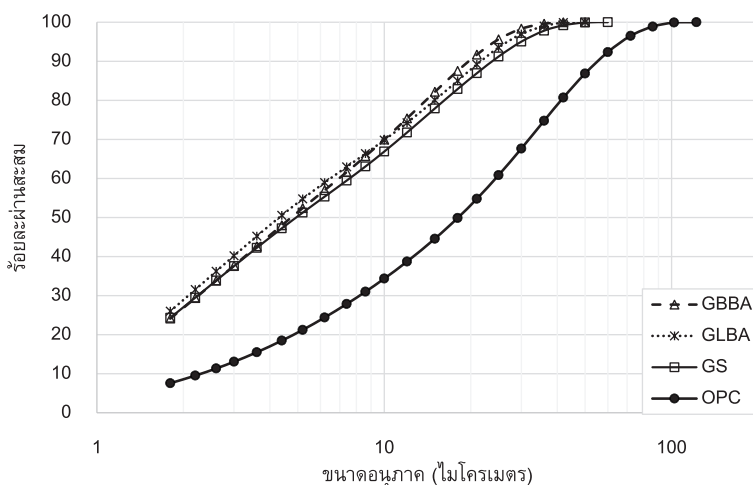
4.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ตารางที่ 2 แสดงสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ศึกษาครั้งนี้ซึ่งได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC), เถ้ากั้นเตาจากการเผาถ่านหินลิกไนต์บดละเอียด (GLBA), เถ้ากั้นเตาจากการเผาถ่านหินบิทูมินัสบดละเอียด (GBBA), และทรายแม่น้ำบดละเอียด (GS) ความละเอียดของ OPC, GLBA, GBBA, และ GS แสดงในรูปของค่าร้อยละน้ำหนักข้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าเท่ากับร้อยละ 16.80, 3.70, 4.09 และ 3.76 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และความถ่วงจำเพาะมีค่าเท่ากับ 3.14, 2.68, 2.55 และ 2.61 ตามลำดับ รูปที่ 1 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุทั้ง 4 ชนิด ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า GLBA, GBBA และ GS มีการกระจายตัวของอนุภาคใกล้เคียงกัน โดย

มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 4.32, 4.76 และ 4.95 ไมโครเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ OPC มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 18.08 ไมโครเมตร องค์ประกอบทางแร่วิทยา (Mineralogical composition) ของ GLBA, GBBA และ GS แสดงดังตารางที่ 3 ผลการทดสอบพบว่า GS มีความเป็นผลึกร้อยละ 100 โดยอยู่ในรูปของ Quartz, Microcline และ Muscovite ร้อยละ 80.4, 17.7 และ 1.9 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับกับงานวิจัยของ Norrarat และคณะ [17] ที่ระบุว่าทรายแม่น้ำ (River sand) มีค่าความเป็นผลึกร้อยละ 100 ซึ่งอยู่ในรูปของ Quartz, Microcline, Albite และ Muscovite ร้อยละ 79.4, 13.6, 3.9 และ 3.1 ตามลำดับ ผลการทดสอบนี้สามารถบอกได้ว่า GS เป็นวัสดุเฉื่อย (Inert material) ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยา สำหรับ GLBA ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ สำหรับผลการ

ทดสอบของงานวิจัยก่อนหน้านี้โดย Hanjitsuwan, S. and Phoo-ngernkham [8] รายงาน เล็กกันเตาจากการโรงไฟฟ้า แม่เมาะมีองค์ประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึกของแร่ Quartz, Anorthite, Calcite, Augite, และ Gypsum ในขณะที่ผลการทดสอบครั้งนี้พบว่ามีความไม่เป็นผลึก (Amorphous) ร้อยละ 58.5 แร่ผลึกส่วนใหญ่ของ GLBA อยู่ในรูปของ Anorthite, Muscovite, และ Diopside (รูปหนึ่งของ Augite) ร้อยละ 15.9, 3.5 และ 9.1 ตามลำดับ และอยู่ในรูปของแร่ผลึก Quartz, Magnetite, Calcite, Gypsum, แร่ผลึกอื่นๆ รวมกันเท่ากับ ร้อยละ 13.0 (แสดงดังตารางที่ 3) ซึ่งแตกต่างจากลักษณะ แร่ผลึกของ GBBA ที่ได้จากการเผาถ่านหินบิทูมินัสที่อยู่ในรูปของ Quartz, Mullite, Corundum, Cristobalite, และ Rutile เท่ากับร้อยละ 14.2, 20.0, 1.1, 1.8 และ 0.4 ตามลำดับ และ

ความไม่เป็นผลึกของ GBBA มีค่าสูงกว่า GLBA โดย GBBA มีค่าความไม่เป็นผลึกเท่ากับร้อยละ 62.5 ในขณะที่ GLBA มีค่าความไม่เป็นผลึกเท่ากับร้อยละ 58.5 แม้เล็กกันเตาได้มาจากการเผาถ่านหินเช่นเดียวกับถ่านหิน แต่พบว่าเมื่อนำค่าความไม่เป็นผลึกของเล็กกันเตาทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกับ ถ่านหิน เล็กกันเตาทั้งสองชนิดมีค่าความไม่เป็นผลึกต่ำกว่า ถ่านหิน โดยที่ความไม่เป็นผลึกของถ่านหินมีค่าประมาณ ร้อยละ 70-95 [18] จากรายงานของ Chindaprasirt และคณะ [18] ระบุว่าถ่านหินขนาดเล็กมีค่าความไม่เป็นผลึกสูงกว่า ถ่านหินขนาดใหญ่ โดยถ่านหินขนาดเล็กมีค่าความไม่เป็นผลึกเท่ากับร้อยละ 85-95 ในขณะที่ถ่านหินขนาดใหญ่มีค่าความไม่เป็นผลึกเท่ากับร้อยละ 70-75



รูปที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุ OPC, GLBA, GBBA และ GS

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

วัสดุ	ประมาณค่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, d_{50} (ไมโครเมตร)	ความถ่วงจำเพาะ
OPC	16.80	18.08	3.14
GLBA	3.70	4.32	2.68
GBBA	3.09	4.76	2.55
GS	3.76	4.95	2.61

ตารางที่ 3 องค์ประกอบในทางแร่วิทยาของวัสดุ GLBA, GBBA และ GS

วัสดุ	GLBA		GBBA		GS	
แร่หลัก (ร้อยละ)	Quartz	1.8	Quartz	14.2	Quartz	80.4
	Hematite	1.0	Mullite	20.0	Microcline	17.7
	Magnetite	1.8	Corundum	1.1	Muscovite	1.9
	Albite	1.9	Cristobalite	1.8		
	Anorthite	15.9	Rutile	0.4		
	Calcite	1.9				
	Gypsum	1.3				
	Muscovite	3.5				
	Diopside	9.1				
	Gehlenite	2.0				
	Ettringite	1.3				
ความไม่เป็นผลึก (ร้อยละ)	58.5		62.5		0.0	

4.2 สมบัติทางเคมีของวัสดุ

ตารางที่ 4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ องค์ประกอบหลักทางเคมีของ OPC คือ CaO และ SiO₂ มีค่าเท่ากับร้อยละ 63 และ 20.9 ตามลำดับ สำหรับ GLBA และ GBBA มีค่าผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 71.2 และ 91.2 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าปริมาณของ SO₃ และ LOI มีค่าไม่เกินร้อยละ 5 และ 6 ตามลำดับ จากองค์ประกอบทางเคมีบ่งบอกได้ว่า GLBA และ GBBA จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [13] แม้ว่า GLBA และ GBBA เป็นถ้ำกันเตาบดละเอียด อย่างไรก็ตามปริมาณ CaO ของ GLBA มีค่าสูงถึงร้อยละ 17 ในขณะที่ GBBA มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.2 เมื่ออิงตามการศึกษา

ของ McCarthy และคณะ [19] พบว่า GLBA ที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้จัดเป็นวัสดุที่มี CaO ระดับกลาง โดยมีค่า CaO ระหว่างร้อยละ 10 ถึง 20 ในขณะที่ GBBA จัดเป็นวัสดุที่มี CaO ต่ำกว่าคือ มีค่า CaO ต่ำกว่าร้อยละ 10 เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของ GLBA ที่มาจากแหล่งเดียวกันแต่ช่วงเวลาแตกต่างกันพบว่า องค์ประกอบทางเคมีของ GLBA แตกต่างกันเล็กน้อย Wongsang-ngu และคณะ [20] รายงานว่าถ้ำกันเตาจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ มี SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ และ CaO เท่ากับร้อยละ 46.0, 22.3, 10.6 และ 11.5 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าถ้ำกันเตาจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ในปัจจุบันที่ใช้ในการศึกษาจะมีปริมาณ SiO₂ ต่ำลงและมีปริมาณ CaO ที่สูงขึ้น องค์ประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนไปดังกล่าวอาจส่งผลให้สมบัติ

ของของกรีทหรือมอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตาจากการเผาถ่านหิน
ลิกไนต์ ในส่วนผสมเปลี่ยนไป

สำหรับ GS ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีองค์ประกอบหลักคือ

SiO₂ มีค่าเท่ากับร้อยละ 91.5 ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติทางแร่
วิทยาของ GS ที่มีแร่ Quartz สูงถึงร้อยละ 80.4

ตารางที่ 4 สมบัติทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	OPC	GLBA	GBBA	GS
SiO ₂	20.9	38.1	61.7	91.5
Al ₂ O ₃	4.8	20.4	24.0	3.7
Fe ₂ O ₃	3.4	12.7	5.5	1.8
CaO	63.3	17.0	2.2	0.2
MgO	1.3	2.8	1.1	< 0.01
SO ₃	2.7	1.7	0.2	0.0
Na ₂ O	0.3	1.4	0.5	< 0.01
K ₂ O	0.4	2.2	1.3	2.6
LOI	2.9	3.6	2.9	0.2

4.3 กำลังอัดของมอร์ตาร์

กำลังอัดของมอร์ตาร์ทั้ง 13 ส่วนผสมแสดงดังตาราง
ที่ 5 เห็นได้ว่ามอร์ตาร์ CT มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 25.8, 28.4,
38.8 และ 43.5 เมกะพาสคัล ที่อายุ 3, 7, 28 และ 90 วัน
ตามลำดับ โดยในช่วงอายุต้น (3 และ 7 วัน) มอร์ตาร์ GLBA,
GBBA และ GS ทุกส่วนผสมมีค่ากำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ CT
และพบว่าในช่วงอายุต้นกำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อมีการแทนที่
มากขึ้น ตัวอย่างเช่น ที่อายุ 3 วัน การแทนที่ร้อยละ 10 โดย
น้ำหนักของวัสดุประสาน ทำให้มอร์ตาร์ GLBA10, GBBA10
และ GS10 มีกำลังอัดเท่ากับ 23.8, 24.3 และ 23.5 เมกะ-
พาสคัล ตามลำดับ เมื่อเพิ่มการแทนที่เป็นร้อยละ 40 โดย
น้ำหนักของวัสดุประสาน กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงเหลือ
16.7, 17.1 และ 15.5 เมกะพาสคัล สำหรับมอร์ตาร์ GLBA40,
GBBA40 และ GS40 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการลด
ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลงเป็นการลดปริมาณ C3S และ C2S
ส่งผลให้กำลังอัดในช่วงอายุต้นลดลง อย่างไรก็ตามเมื่ออายุ
มากขึ้นมอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตาในส่วนผสมมีการพัฒนากำลังอัด

ได้สูงขึ้นโดยมอร์ตาร์ GLBA10 มีกำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ตาร์
CT ที่อายุ 60 วัน และมีกำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์ CT ที่อายุ
90 วัน เมื่อเพิ่มการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตา GLBA เป็น
ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน กำลังอัดมอร์ตาร์
GLBA20 มีค่าเท่ากับร้อยละ 84 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ
3 วัน และที่อายุ 90 วัน สามารถพัฒนากำลังอัดได้เทียบเท่า
มอร์ตาร์ CT อย่างไรก็ตามมอร์ตาร์ GLBA30 และ GLBA40
มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ CT ทุกอายุการทดสอบ ผลการทดสอบ
นี้สอดคล้องกับรายงานของ Kurama และคณะ [21] ได้ศึกษา
คอนกรีตที่มีเถ้าก้นเตาจากถ่านหินลิกไนต์ในส่วนผสม พบว่า
การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาจากถ่านหินลิกไนต์ร้อยละ 10
และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ให้กำลังอัดสูงกว่า
คอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 6 และ 2 ที่อายุ 56 วัน
ตามลำดับ แต่สำหรับการแทนที่ที่ร้อยละ 25 พบว่ากำลัง
คอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมแม้คอนกรีตมีอายุที่ 56 วัน
การพัฒนา กำลังอัดเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อพิจารณา มอร์ตาร์
ที่แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา GBBA (เถ้าก้นเตาจากถ่านหินบิทูมินัส)

ตัวอย่างเช่น มอร์ตาร์ GBBA10 แม้ว่ามีส่วนปูนซีเมนต์ในส่วนผสมหายไปร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน แต่มอร์ตาร์ GBBA มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ CT ตั้งแต่อายุ 14 วัน ประมาณร้อยละ 2 และมีกำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์ CT ร้อยละ 5, 6 และ 8 เมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ เมื่อทำการแทน GBBA ในส่วนผสมเป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าเท่ากับ 39.9, 43.9 และ 49.2 เมกะพาสคัล ซึ่งมากกว่ามอร์ตาร์ CT เป็นร้อยละ 3, 7 และ 13 ที่อายุ 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ สำหรับการ ใช้ GBBA แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ถึงแม้ว่ามอร์ตาร์ GBBA40 มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ CT ประมาณร้อยละ 35 ที่อายุ 3 วัน แต่เมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 90 วัน พบว่ามอร์ตาร์ GBBA40 มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงมอร์ตาร์ CT ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นถึงผลของปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาขั้นที่สองที่ต้องรอสารตั้งต้นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดค่อนข้างต่ำในช่วงอายุต้น แต่กำลังอัดเพิ่มขึ้นในช่วงอายุปลายทำให้บางส่วนผสมมีกำลัง

อัดสูงกว่ามอร์ตาร์ CT [22-24]

สำหรับมอร์ตาร์ GS ในทุกการแทนที่พบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเมื่อมอร์ตาร์มีอายุเพิ่มขึ้นซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับมอร์ตาร์ CT, GLBA และ GBBA อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงร้อยละของกำลังอัดเทียบกับมอร์ตาร์ CT พบว่ามอร์ตาร์ GS ทุกการแทนที่มีร้อยละของกำลังอัดเทียบกับมอร์ตาร์ CT ค่อนข้างคงที่ แม้มอร์ตาร์มีอายุเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น มอร์ตาร์ GS10 มีกำลังอัดเทียบกับมอร์ตาร์ CT เท่ากับร้อยละ 91, 88, 90, 91, 90 และ 92 ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาแต่ละการแทนที่สามารถหาค่าเฉลี่ยร้อยละของกำลังอัดเทียบกับมอร์ตาร์ CT ได้เท่ากับร้อยละ 90, 82, 72 และ 62 สำหรับมอร์ตาร์ GS10, GS20, GS30 และ GS40 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาศึกษาโดย Jaturapitakkul และคณะ [25] ที่พบว่ามอร์ตาร์ที่มีทรายบดละเอียดขนาดอนุภาคข้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5.8 ในส่วนผสมที่อัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าเท่ากับร้อยละ 92, 84, 76 และ 64 ตามลำดับ

ตารางที่ 5 กำลังอัดของมอร์ตาร์

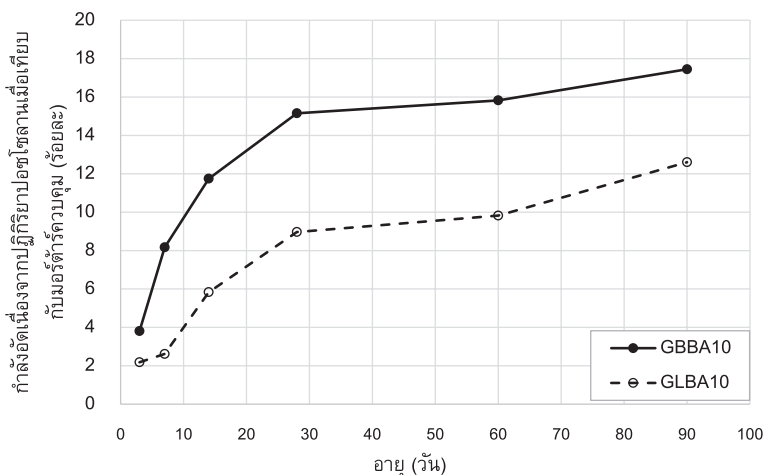
มอร์ตาร์	กำลังอัด (เมกะพาสคัล)- ร้อยละของกำลังอัด						ค่าเฉลี่ยร้อยละของกำลังอัดของมอร์ตาร์ GS
	3 days	7 days	14 days	28 days	60 days	90 days	
CT	25.8- 100	28.4- 100	33.7- 100	38.8- 100	41.1- 100	43.5- 100	
GLBA10	23.8- 92	26.3- 93	32.4- 96	38.5- 99	41.2- 100	44.7- 103	
GLBA20	21.6- 84	24.8- 87	29.6- 88	35.7- 92	39.7- 96	43.3- 100	
GLBA30	19.0- 74	21.5- 76	26.3- 78	31.9- 82	34.7- 84	38.3- 88	
GLBA40	16.7- 65	18.1- 64	23.2- 69	28.4- 73	31.0- 75	34.5- 79	
GBBA10	24.3- 94	27.9- 98	34.4- 102	40.9- 105	43.6- 106	46.8- 108	
GBBA20	22.2- 86	26.7- 94	33.4- 99	39.9- 103	43.9- 107	49.2- 113	
GBBA30	20.1- 78	22.9- 81	30.3- 90	38.1- 98	42.7- 104	47.4- 109	
GBBA40	17.1- 66	19.1- 67	27.4- 81	33.9- 87	38.6- 94	43.6- 100	
GS10	23.5- 91	24.9- 88	30.4- 90	35.3- 91	36.9- 90	39.9- 92	90
GS20	21.2- 82	24.1- 85	27.6- 82	31.2- 80	33.3- 81	35.5- 82	82
GS30	18.8- 73	20.7- 73	24.7- 73	27.4- 71	29.1- 71	30.4- 70	72
GS40	15.5- 60	18.1- 64	21.2- 63	24.4- 63	25.5- 62	26.3- 61	62

4.4 ร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยา ปอซโซลาน

ตารางที่ 5 แสดงค่าเฉลี่ยร้อยละของกำลังอัดของมอร์ตาร์ GS เทียบกับมอร์ตาร์ CT แสดงให้เห็นถึงค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีการแทนที่ OPC ด้วย GS ในปริมาณการแทนที่แตกต่างกัน โดย Jaturapitakkul และคณะ [25] รายงานว่ากำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าเท่ากับร้อยละ 88.8, 80.7, 73.1 และ 58.1 เมื่อมี OPC ในส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 90, 80, 70 และ 60 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ และมีกำลังอัดเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาค (Packing effect) ที่มีขนาดอนุภาคค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 5 ± 1 โดยน้ำหนัก เท่ากับร้อยละ 2.7, 3.4, 2.8 และ 5.8 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ สำหรับในการศึกษาครั้งนี้กำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าเท่ากับร้อยละ 90, 82, 72 และ 62 ในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำค่าร้อยละของกำลังของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตาในอัตราส่วนการแทนที่ต่างกลบลด้วยค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะได้ค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (รวมการอัดตัวของอนุภาค) ของเถ้าก้นเตาเมื่อเทียบกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม

รูปที่ 2 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ของมอร์ตาร์ทั้งสองประเภทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออายุเพิ่มขึ้นและปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าก้นเตา GBBA แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วง 4-6 ที่อายุ 3 วัน และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15-25 และ 17-38 ที่อายุ

28 และ 90 วัน ตามลำดับ ในขณะที่มอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตา GLBA ร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วง 2-3, 9-11 และ 13-17 ที่อายุ 3, 28, และ 90 วัน ตามลำดับ จากผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่ามอร์ตาร์แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา GBBA มีค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูงกว่ามอร์ตาร์แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา GLBA ในทุกอัตราส่วน และทุกช่วงอายุการทดสอบ ในช่วงอายุต้นมอร์ตาร์ GBBA มีค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูงกว่ามอร์ตาร์ GLBA เล็กน้อย เป็นที่สังเกตว่าเถ้าก้นเตา GLBA มีปริมาณ CaO สูงถึงร้อยละ 17.0 แต่มอร์ตาร์ GLBA ยังคงมีกำลังอัดช่วงต้นต่ำเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าก้นเตา GBBA ซึ่งมีปริมาณ CaO เพียงร้อยละ 2.2 ลักษณะดังกล่าวนี้แตกต่างไปจากพฤติกรรมของเถ้าถ่านหิน โดย Papadakis [26] รายงานว่า เมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินที่มีปริมาณ CaO สูง (CaO เท่ากับร้อยละ 22.7) ในมอร์ตาร์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้กำลังอัดในช่วงต้นที่ได้จากการแทนที่ของเถ้าถ่านหินมีการพัฒนาสูงขึ้นประมาณร้อยละ 31 ของกำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยกำลังที่เพิ่มสูงขึ้นในช่วงอายุต้นไม่ได้เกิดจากความละเอียดของเถ้าถ่านหินเพียงอย่างเดียว แต่ยังเกิดเนื่องจากการประสานด้วยตัวเอง (Self-cementing) ของเถ้าถ่านหินที่มี CaO อีกด้วย อย่างไรก็ตามสำหรับผลการทดสอบของมอร์ตาร์เถ้าก้นเตาที่ศึกษาในครั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า ถึงแม้เถ้าก้นเตา GLBA มี CaO สูงกว่าเถ้าก้นเตา GBBA แต่ปริมาณความไม่เป็นผลึกของเถ้าก้นเตา GLBA มีค่าต่ำกว่าเถ้าก้นเตา GBBA โดยเถ้าก้นเตา GBBA มีค่าเท่ากับร้อยละ 62.5 ในขณะที่ GLBA มีค่าเท่ากับร้อยละ 58.5 นอกจากนี้เถ้าก้นเตาที่ได้จากโรงไฟฟ้าอยู่ในสภาวะเปียกชื้น ด้วยเหตุนี้อาจทำให้ CaO อิสระที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาได้ทำปฏิกิริยาไปแล้วบางส่วน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ที่ใช้ GBBA และ GLBA แทนที่ OPC ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม และอายุการบ่ม

จากรูปที่ 2 พบว่าความแตกต่างของค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมระหว่างมอร์ตาร์ GLBA และ GBBA เห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อมอร์ตาร์มีอายุมากขึ้น (หลังจาก 14 วันขึ้นไป) มอร์ตาร์ GBBA มีค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูงกว่ามอร์ตาร์ GLBA อยู่ประมาณร้อยละ 6, 11, 17 และ 17 สำหรับอัตราส่วนการแทนที่เถ้ากันเตาร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (รูปที่ 2, 3, 4 และ 5) ตามลำดับจากผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่ออายุมากขึ้นปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ของเถ้ากันเตาส่งผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาปอซโซลานอย่างชัดเจน โดยเถ้ากันเตา GLBA มีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 รวมกันเท่ากับร้อยละ 58.5 มีร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้ากันเตา GBBA ซึ่งมีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 รวมกันเท่ากับร้อยละ 85.7 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 มีผลโดยตรงต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออายุปลายของมอร์ตาร์ [22, 27]

รูปที่ 3 เปรียบเทียบร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้ากันเตาทั้งสองชนิดเทียบกับเถ้าถ่านหินลิกไนต์บดละเอียดจากงานวิจัยก่อนหน้า [28] ซึ่งมีอนุภาคค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 4.3 มีปริมาณ

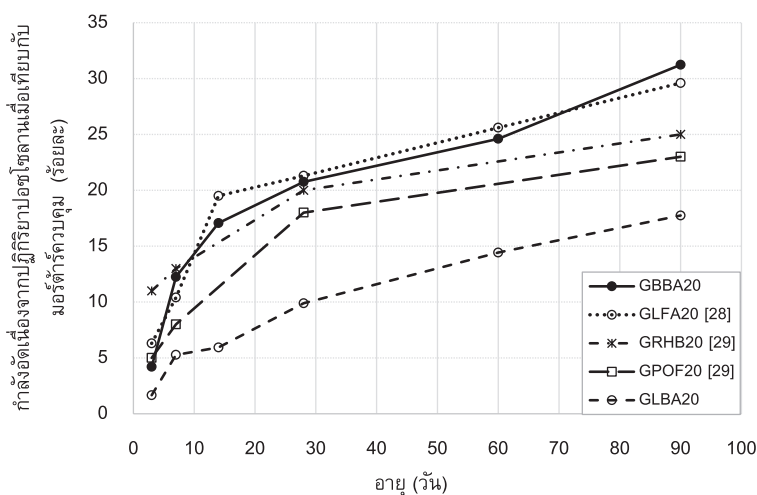
SiO_2 , Al_2O_3 และ CaO เท่ากับร้อยละ 45.78, 21.13 และ 12.03 ตามลำดับ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B Ratio) ในส่วนผสมมอร์ตาร์เท่ากับ 0.65 ซึ่งมีค่าเท่ากับที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เมื่อมีอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (GLFA20) พบว่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ของมอร์ตาร์ GLFA20 มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ GBBA20 แต่เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ GLBA20 ซึ่งมาจากการเผาถ่านหินลิกไนต์เหมือนกันพบว่ามอร์ตาร์ GLFA20 มีค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูงกว่ามอร์ตาร์ GLBA20 อาจเนื่องมาจากเถ้ากันเตามีความเป็นผลึกสูงกว่าเถ้าถ่านหินที่มีจากแหล่งเดียวกัน ประกอบกับเถ้าถ่านหินจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ ที่ใช้มาอ้างอิงในครั้งนี้มีลักษณะทางกายภาพกลมทำให้วัสดุมีการกระจายตัวได้ดีใน ส่วนผสมส่งผลให้ส่วนผสมมอร์ตาร์มีความสม่ำเสมอมากขึ้น

นอกจากนี้หากเปรียบเทียบร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้ากันเตาบดละเอียดจากถ่านหินทั้งสองชนิดเปรียบเทียบกับวัสดุปอซโซลานจากเถ้าชีวมวลในได้แก่ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด (GRHB) และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด (GPOF) [29] ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า ร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดในอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (GRHB20) มีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์

GBBA20 และมอร์ตาร์ GLBA20 อย่างไรก็ตามช่วงอายุปลาย (หลังจาก 28 วัน) มอร์ตาร์ GRHB20 มีค่าร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานต่ำกว่ามอร์ตาร์ GBBA20 เล็กน้อย แต่ยังคงสูงกว่ามอร์ตาร์ GLBA20 ในขณะที่ ร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเจ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ในอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (GPOF20) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ GBBA20 ในช่วงอายุต้น และมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ GBBA20 เมื่อมีอายุ

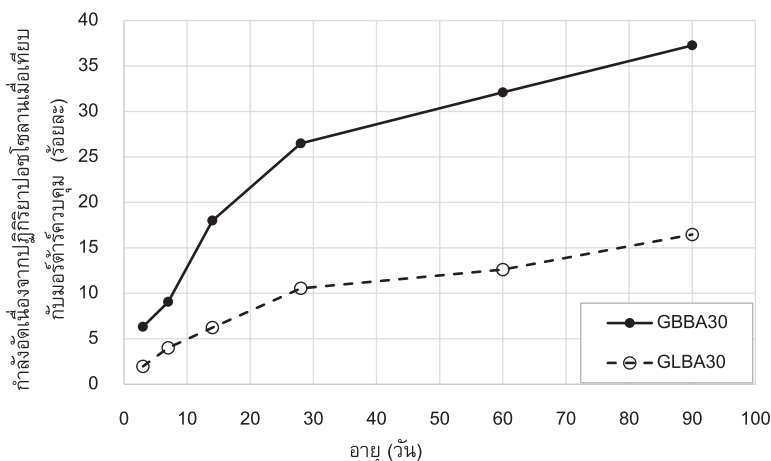
28 วันขึ้นไป อย่างไรก็ตามร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ GPOF20 ยังคงมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ GLBA20 ทุกช่วงอายุ

จากผลการทดสอบครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าเจ้ากันเตา GBBA มีสมบัติปอซโซลานมากกว่า GLBA โดยร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของ GBBA มีค่าใกล้เคียงกับวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นจากการศึกษาของงานวิจัยก่อนหน้านี้ เช่น เจ้าถ่านหิน, เจ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเจ้าปาล์มน้ำมัน

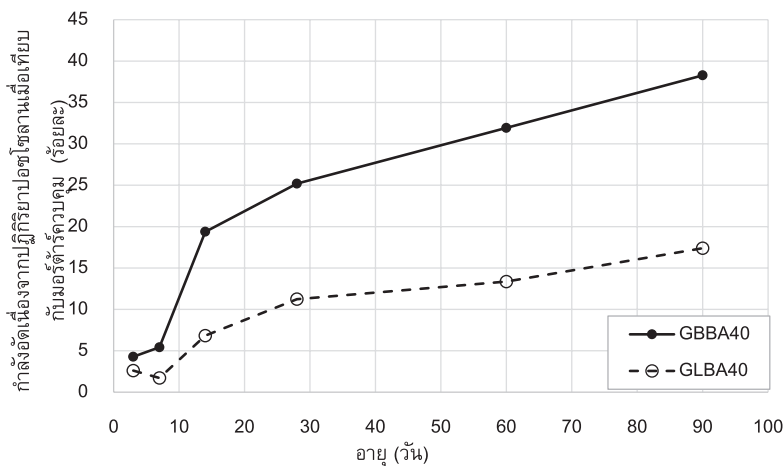


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ที่ใช้ GLFA, GBBA และ GLBA แทนที่ OPC ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม และอายุการบ่ม

หมายเหตุ สำหรับมอร์ตาร์ GRHB20 และ GPOF20 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ที่ใช้ GBBA และ GLBA แทนที่ OPC ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม และอายุการบ่ม

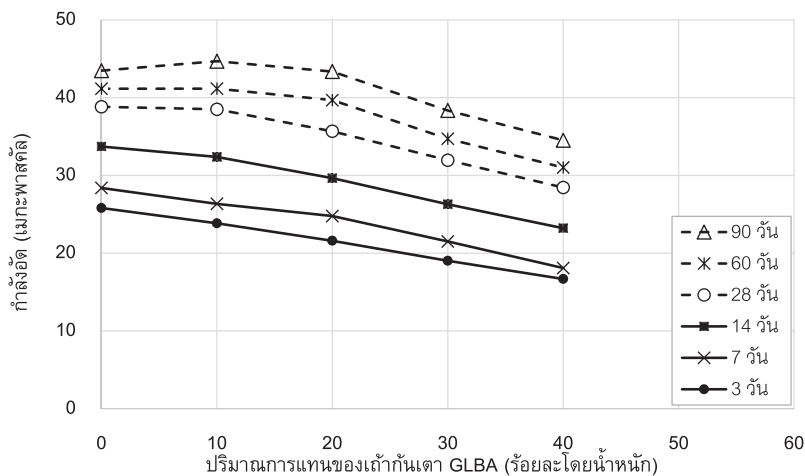


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ที่ใช้ GBBA และ GLBA แทนที่ OPC ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม และอายุการบ่ม

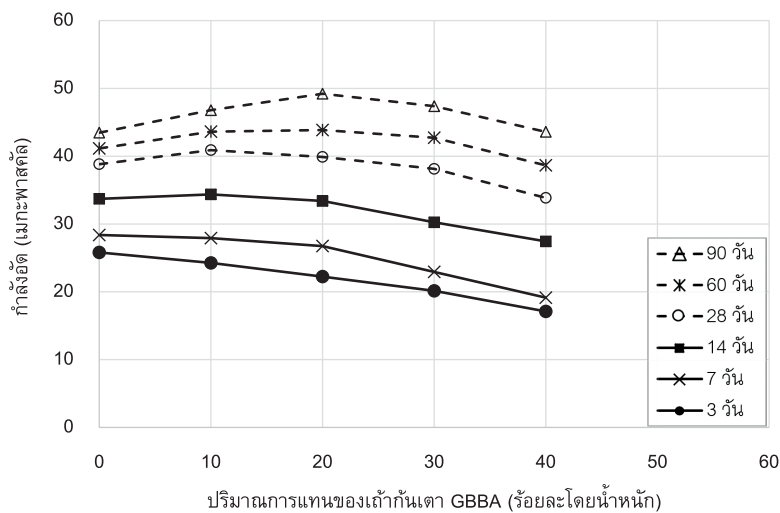
4.5 ปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตาที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตา GLBA กับกำลังอัดของมอร์ตาร์ ตามรูปที่ 6 สำหรับอายุการบ่ม 3 วัน พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตา GLBA ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลง เป็นผลเนื่องมาจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม อย่างไรก็ตามเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 60 วันและ 90 วัน พบว่าอัตราการลดลงของกำลังอัดเนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตา GLBA ในช่วงร้อยละ 10 ถึง 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีค่าลดลงโดยสามารถสังเกตได้จากความชันของเส้นกราฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อายุ 90 วัน พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าก้นเตา GLBA ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีกำลังอัดสูงสุด และมีกำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุมเมื่อใช้เถ้าก้นเตา GLBA ในส่วนผสมไม่เกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน หากพิจารณาร้อยละของกำลังอัดเทียบกับมอร์ตาร์ CT การเพิ่มอัตราการแทนที่ของเถ้าก้นเตา GLBA ถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้การกระทบในด้านกำลังอัดไม่มากนักเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ CT กล่าวคือมอร์ตาร์ GLBA30 ยังคงมีกำลังอัดมากกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 3 วัน ขึ้นไป และเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 80 เมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 28 วัน

สำหรับอิทธิพลการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตา GBBA ต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์แสดงดังรูปที่ 7 ในช่วงอายุต้นของมอร์ตาร์ GBBA ผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกับมอร์ตาร์ GLBA กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อมอร์ตาร์มีอายุ 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์ที่มีปริมาณเถ้าก้นเตาในส่วนผสมร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มีกำลังอัดสูงสุด ปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าก้นเตา GBBA แสดงผลได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นที่อายุ 60 วัน หากสังเกตจากเส้นกราฟจะเห็นได้ว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตา GBBA ไม่เกินร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน มอร์ตาร์มีการพัฒนา กำลังได้สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม นอกจากนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตา GBBA ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ส่งผลให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงที่อายุ 90 วัน โดยสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมถึงร้อยละ 10 ผลการทดสอบนี้มีทิศทางเดียวกันกับผลงานวิจัยของ Jaturapitakkul และ Cheerarot [10] ซึ่งรายงานว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาแต่ละชนิดจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะในช่วงร้อยละ 10 ถึง 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถพัฒนา กำลังอัดได้สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ตั้งแต่อายุ 60 วันขึ้นไป โดยมีมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าก้นเตา ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ให้กำลังอัดสูงสุด โดยมีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุมเท่ากับร้อยละ 8 และ 12 ที่อายุ 60 และ 90 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตา GLBA



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าก้นเตา GBBA

5. สรุปผลการวิจัย

จากงานผลของการวิจัยเถ้าก้นเตา GLBA และ GBBA เพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สำหรับองค์ประกอบทางเคมีหากใช้มาตรฐาน ASTM C618 เป็นเกณฑ์ พบว่าทั้งเถ้าก้นเตา GLBA และ GBBA ที่มีปริมาณอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 3.70 และ 3.05 โดยน้ำหนัก ตามลำดับจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class F โดยมีค่าผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 71.2

และ 91.2 ตามลำดับ แม้ว่าเถ้าก้นเตาจะไม่ใช่เถ้าถ่านหิน

2. ผลึกส่วนมากที่พบในเถ้าก้นเตา GLBA อยู่ในรูปของ Anorthite และ Diopside โดยมีปริมาณร้อยละ 15.9 และ 9.1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีปริมาณออสซิลานเท่ากับร้อยละ 58.5 โดยน้ำหนัก สำหรับผลึกที่พบในเถ้าก้นเตา GBBA อยู่ในรูปของ Mullite และ Quartz มีค่าเท่ากับร้อยละ 20 และ 14 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีปริมาณออสซิลานเท่ากับร้อยละ 62.5 โดยน้ำหนัก

3. การใช้เถ้าก้นเตา GLBA และ GBBA ที่มีปริมาณอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 3.70 และ 3.05 โดยน้ำหนัก แทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสม พบว่ามอร์ตาร์ GBBA มีค่าร้อยละของกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซแลนสูงกว่ามอร์ตาร์ GLBA ในอัตราส่วนการแทนที่ที่เท่ากัน

4. การใช้เถ้าก้นเตาบดละเอียดจนมีปริมาณอนุภาคค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 3 ± 1 โดยน้ำหนัก เป็นวัสดุปอซโซแลนสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยมีกำลังอัดมากกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุม ที่อายุมากกว่า 14 และ 60 วัน สำหรับมอร์ตาร์ GBBA40 และ GLBA40 ตามลำดับ

5. เมื่อกำหนดให้มอร์ตาร์มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากันพบว่า อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตา GLBA ที่ให้กำลังอัดสูงที่สุดคือร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และเท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสำหรับเถ้าก้นเตา GBBA

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (สัญญาเลขที่ CE-KMUTT 6222) และสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรสาขานครินทร์ อีกทั้งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่เอื้อเฟื้อวัสดุที่ใช้สำหรับการทำวิจัย ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

1. Gong, X., Wu, T., Qiao, Y. and Xu, M., 2009, "In Situ Leaching of Trace Elements in a Coal Ash Dump and Time Dependence Laboratory Evaluation," *Energy & Fuels*, 24 (1), pp. 84-90.
2. Di Bella, M., Italiano, F., Magazù, S., Mottese, A., Interdonato, M., Gentile, F. and Sabatino, G., 2018, "Risk Assessment of Bottom Ash from Fuel Oil Power Plant of Italy: Mineralogical, Chemical and Leaching Characterization," *Environmental Earth Sciences*, 77 (5), pp. 1-9.

3. Anastasiadou, K., Christopoulos, K., Mousios, E. and Gidarakos, E., 2012, "Solidification/Stabilization of Fly and Bottom Ash from Medical Waste Incineration Facility," *Journal of Hazardous Materials*, 207, pp. 165-170.
4. Hashemi, S.S.G., Mahmud, H.B., Ghuan, T.C., Chin, A.B., Kuenzel, C. and Ranjbar, N., 2019, "Safe Disposal of Coal Bottom Ash by Solidification and Stabilization Techniques," *Construction and Building Materials*, 197, pp. 705-715.
5. Krudam, W., Akkarapanyatorn, W. and Sahamitmongkol, R., 2016, "Effect of Bottom Ash on Autogenous Shrinkage of Binary Binder Mortar," *Journal of Thailand Concrete Association*, 4 (2), pp. 1-13. (In Thai)
6. Wongsas, A., Zaetang, Y., Sata, V. and Chindaprasit, P., 2016, "Properties of Lightweight Fly Ash Geopolymer Concrete Containing Bottom Ash as Aggregates," *Construction and Building Materials*, 111, pp. 637-643.
7. Goudar, S.K., Shivaprasad, K. and Das, B.B., 2019, "Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete Using Coal-Bottom Ash as Replacement of Fine Aggregate," *Sustainable Construction and Building Materials*, 25, pp. 863-872.
8. Hanjitsuwan, S. and Phoo-ngernkham, T., 2017, "Utilization of Calcium Carbide Residue in Bottom Ash Geopolymer: Study on Mechanical, Mineral Composition and Molecular," *KMUTT Research and Development Journal*, 20 (3), pp. 461-471. (In Thai)
9. Oruji, S., Brake, N.A., Guduru, R.K., Nalluri, L., Günaydin-Şen, Ö., Kharel, K., Rabbanifar, S., Hosseini, S. and Ingram, E., 2019, "Mitigation of ASR Expansion in Concrete Using Ultra-Fine Coal Bottom Ash," *Construction and Building Materials*, 202, pp. 814-824.
10. Jaturapitakkul, C. and Cheerarot, R., 2003, "Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15 (1), pp. 48-53.

11. Abdulmatin, A., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2018, "An Investigation of Bottom Ash as a Pozzolan Material," *Construction and Building Materials*, 186, pp. 155-162.
12. Oruji, S., Brake, N.A., Nalluri, L. and Guduru, R.K., 2017, "Strength Activity and Microstructure of Blended Ultra-Fine Coal Bottom Ash-Cement Mortar," *Construction and Building Materials*, 153, pp. 317-326.
13. American Society for Testing and Materials, 2017, "ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," *ASTM International*, West Conshohocken, Vol. 04.02, Philadelphia.
14. Antiohos, S., Papadakis, V., Maganari, K. and Tsimas, S., 2003, "The Development of Blended Supplementary Cementing Materials Consisting of High and Low Calcium Fly Ashes," *Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement*, Durban, South Africa, pp. 747-757.
15. Thomas, M., Shehata, M. and Shashiprakash, S., 1999, "The Use of Fly Ash in Concrete: Classification by Composition," *Cement, Concrete and Aggregates*, 21 (2), pp. 105-110.
16. American Society for Testing and Materials, 2016, "ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-In. Or [50-mm] Cube Specimens)," *ASTM International*, West Conshohocken, Vol. 04.01, Philadelphia.
17. Norrarat, P., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2017, "Evaluation of Heat Evolution of Pastes Containing High Volume of Ground River Sand and Ground Granulated Blast Furnace Slag," *Materials Science*, 23 (1), pp. 57-63.
18. Chindaprasirt, P., Ruangsiriyakul, S., Cao, H. and Bucea, L., 2001, "Influence of Mae Moh Fly Ash Fineness on Characteristics, Strength and Drying Shrinkage Development of Blended Cement Mortars," *The Eighth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Singapore, pp. 5-7.
19. McCarthy, G., Solem, J., Manz, O. and Hassett, D., 1989, "Use of a Database of Chemical, Mineralogical and Physical Properties of North American Fly Ash to Study the Nature of Fly Ash and Its Utilization as a Mineral Admixture in Concrete," *MRS Online Proceedings Library Archive*, 178.
20. Wongsang-ngu, S., Taporn, A., Cheerarat, R. and Lamon, A., 2012, "An Application of Hill Climbing Algorithm for Optimal Ratio of Ground Bottom Ash in Concrete," *KMUTT Research and Development Journal*, 35 (2), pp. 173-185. (In Thai)
21. Kurama, H. and Kaya, M., 2008, "Usage of Coal Combustion Bottom Ash in Concrete Mixture," *Construction and Building Materials*, 22 (9) pp. 1922-1928.
22. Papadakis, V.G., 1999, "Effect of Fly Ash on Portland Cement Systems: Part I. Low-Calcium Fly Ash," *Cement and Concrete Research*, 29 (11), pp. 1727-1736.
23. Cheriaf, M., Rocha, J.C. and Pera, J., 1999, "Pozzolan Properties of Pulverized Coal Combustion Bottom Ash," *Cement and Concrete Research*, 29 (9), pp. 1387-1391.
24. Hanehara, S., Tomosawa, F., Kobayakawa, M. and Hwang, K., 2001, "Effects of Water/Powder Ratio, Mixing Ratio of Fly Ash, and Curing Temperature on Pozzolan Reaction of Fly Ash in Cement Paste," *Cement and Concrete Research*, 31 (1), pp. 31-39.
25. Jaturapitakkul, C., Tangpagasit, J., Songmue, S. and Kiattikomol, K., 2011, "Filler Effect of Fine Particle Sand on the Compressive Strength of Mortar," *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 18 (2), pp. 240-246.
26. Papadakis, V.G., 2000, "Effect of Fly Ash on

Portland Cement Systems: Part II. High-Calcium Fly Ash," *Cement and Concrete Research*, 30 (10), pp. 1647-1654.

27. Antiohos, S., Maganari, K. and Tsimas, S., 2005, "Evaluation of Blends of High and Low Calcium Fly Ashes for Use as Supplementary Cementing Materials," *Cement and Concrete Composites*, 27 (3), pp. 349-356.

28. Tangpagasit, J., 2007, Pozzolanic Reaction and Packing Effect of Pozzolans on Compressive Strength

of Mortar, *Philosophy of Engineering Dissertation*, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

29. Tangpagasit, J., Songmue, S., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol K., 2005, "A Study of Strength Activity Index of Mortar Due to Hydration Reaction, Packing Effect, and Pozzolanic Reaction of Rice Husk-Bark Ash and Palm Oil Fuel Ash," *KMUTT Research and Development Journal*, 28 (4), pp. 465-476. (In Thai)

การออกแบบสร้างและทดสอบหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอนแนวนอน

ธนาพล สุขชนะ*

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ต.หันตรา อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000

* Corresponding Author: thanaphol.s@rmutsb.ac.th, ton0019@hotmail.com

อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 4 กรกฎาคม 2562

แก้ไข : 13 มกราคม 2563

ตอบรับ : 13 กุมภาพันธ์ 2563

คำสำคัญ :

หม้อไอน้ำ / เทอร์โมไซฟอน /

ท่อโค้ง / สมรรถนะ / จุดเดือด

การศึกษาเชิงทดลองในการออกแบบ สร้าง และทดสอบหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอนแนวนอน ครั้งนี้กระทำการขึ้นเพื่อศึกษาลักษณะการทำงาน อิทธิพลของการไหลกลับของของเหลว อัตราการเติมน้ำเป็นสารทำงานที่เหมาะสม และสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนโดยรวมของหม้อต้มทรงกระบอกแนวนอน ซึ่งทำด้วยท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 123 mm ยาว 250 mm ทำการทดลองด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ในช่วง 10–100 kW/m² และอุณหภูมิคงที่ในช่วง 50–90°C ในขณะที่คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นซึ่งมีอุณหภูมิน้ำเข้าคงที่เท่ากับ 25°C ผลการทดลอง พบว่า หม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอนสามารถถ่ายโอนความร้อนได้ในลักษณะเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรทั่วไป การไหลกลับของของเหลวเหนือผิวการเดือดแบบปลายท่อโค้งให้ผลดีต่อสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อน ขณะที่อัตราการเติมที่เหมาะสมเท่ากับ 10% ของปริมาตรระบบ โดยมีค่าความต้านทานความร้อนรวมต่ำสุดเท่ากับ 0.065°C/W เมื่อฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 100 kW/m²

Design, Construction and Testing of a Horizontal Thermosyphon Boiler

Thanaphol Sukchana*

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Hantra, Phranakhon Si Ayutthaya 13000

* Corresponding Author: thanaphol.s@rmutsb.ac.th, ton0019@hotmail.com

Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture.

Article Info

Article History:

Received: July 4, 2019

Revised: January 13, 2020

Accepted: February 13, 2020

Keywords:

Boiler / Thermosyphon /
Bent Pipe / Performance /
Boiling Point

Abstract

The present experimental study, which involved the design, construction and testing of a horizontal thermosyphon boiler, aimed at investigating the general behavior of the developed boiler as well as at determining the influences of liquid return rate, optimum filling ratio of a working fluid (water) and overall heat transfer performance of the boiler. The boiler was made of copper tubing with an inner diameter of 123 mm and a length of 250 mm. Constant heat flux in the range of 10–100 kW/m² and constant temperature in the range of 50–90°C were used in the experiments. A condenser was cooled by cold water at a constant temperature of 25°C. The results showed that the developed thermosyphon boiler could transfer heat in much the same way as a typical thermosyphon cycle. Returning liquid return flowing above the boiling surface of the bended pipe was found effective on increasing the heat transfer performance. An optimum filling ratio was noted to be 10% of the system volume, with the lowest total thermal resistance of 0.065°C/W and heat flux of 100 kW/m².

1. บทนำ

เทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการถ่ายโอนความร้อนด้วยหลักการเดือดภายในท่อปิด ซึ่งมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนสูงและราคาไม่แพง มีหลักการทำงานอย่างง่ายตามหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยปลายด้านหนึ่งของท่อจะรับความร้อนและทำให้สารทำงานระเหยเป็นไอและลอยสูงขึ้น จากนั้นจะส่งถ่ายความร้อนทิ้งให้กับครีบริบายความร้อน เกิดกลั่นตัวเป็นของเหลวไหลย้อนกลับไปยังแหล่งรับความร้อนอีกครั้งด้วยแรงโน้มถ่วง ซึ่งจะวัฏจักรเช่นนี้อยู่ภายในท่อปลายปิดและมีอายุการใช้งานยาวนาน สำหรับในประเทศไทยเรานั้นมีงานวิจัยเทอร์โมไซฟอนและได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารภาษาไทยดังเช่น Wannapakhe [1] พบว่าการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอนในประเทศไทยส่วนใหญ่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน แต่มีงานวิจัยบางส่วนใช้สารทำความเย็น ซึ่งวิธีการเดิมสารทำความเย็นให้กับเทอร์โมไซฟอนด้วยวิธีการอัดไอน้ำได้นำเสนอไว้โดย Sukchana และ Thadniam [2] เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรวมถึงต้นทุนในการผลิต ในส่วนงานวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ Srimuang และ Kokpimai [3] ทดลองพบว่าการใช้ผงทองแดงกับน้ำเป็นสารทำงานทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น ขณะที่ Pipatpaiboon และคณะ [4] ได้แนะนำการเลือกใช้สารทำงานให้เหมาะสมต้องพิจารณาจากช่วงอุณหภูมิทำงานของสารทำงานที่ครอบคลุมอุณหภูมิการทำงานของท่อความร้อน สำหรับการประยุกต์ใช้งานนั้น Nakkaew และ Wongwises [5] ได้สรุปการเพิ่มสมรรถนะของระบบปรับอากาศโดยการติดตั้งท่อความร้อนซึ่งช่วยทำให้ระบบปรับอากาศมีสมรรถนะเพิ่มขึ้น Siricharoenpanich และคณะ [6] ประยุกต์ใช้ท่อความร้อนเพื่อช่วยทำให้เครื่องปรับอากาศมีประสิทธิภาพเพิ่มเฉลี่ยประมาณ 20% Kanjai และ Mongkon [7] ใช้ท่อความร้อนในการลดความชื้นในระบบปรับอากาศซึ่งช่วยทำให้ค่า COP ของเครื่องปรับอากาศเพิ่มขึ้น Sichamnan และคณะ [8] พบว่าการระบายความร้อนด้วยท่อความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ช่วยทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้ 9% ในการประยุกต์ใช้ในการอบลดความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้เทอร์โมไซฟอนแบบท่อเดียวนั้นได้วิจัยและพัฒนาโดย Nimmol และ Ritthong [9] ซึ่งและใช้ R134a เป็นสารทำงาน นอกจากนี้ การศึกษางานวิจัยซึ่งได้รับการตีพิมพ์ในวารสารต่างประเทศที่ผ่านมาทั้งในด้านการวิจัยขั้นพื้นฐาน

การเพิ่มสมรรถนะ และการประยุกต์ใช้ดังเช่น Gedik [10] พบว่าสารทำงานที่แตกต่างกันจะมีความเหมาะสมกับอัตราการไหลของการหล่อเย็นไม่เหมือนกัน ในขณะที่ Ong และคณะ [11] พบว่าค่าความต้านทานความร้อนของเทอร์โมไซฟอนเปลี่ยนแปลงได้ตามอัตราการเดินสารทำงาน โดยผลการทดสอบของ Chen และ Yang [12] พบว่าการใช้เอซีโตนเป็นสารทำงานจะมีสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าน้ำประมาณ 7 เท่า ต่อมา Liu และคณะ [13] พบว่าอัตราการเดิน R134a มีผลโดยตรงกับความผันผวนในการเดือดและความดันในระบบในปีเดียวกันนั้นเอง Gorecki [14] ได้ผลสรุปว่าสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำงานมีผลต่ออัตราการเดินและสมรรถนะที่ต่างกัน ในปีต่อมา Dobriansky และ Wojcik [15] ได้รวบรวมผลการทดลองเทอร์โมไซฟอนรูปแบบต่างๆ ไว้ว่ากลุ่มของสารทำงานมีความเหมาะสมที่อุณหภูมิในการทำงานแตกต่างกันโดยเฉพาะการใช้น้ำเป็นสารทำงานจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่ากลุ่มสารทำงานที่เป็นสารทำความเย็นในช่วงอุณหภูมิ 30–100°C นอกจากนี้ขนาดของหม้อต้มหรือส่วนรับความร้อนต้องมีความเหมาะสมจึงจะทำให้เทอร์โมไซฟอนมีประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งสามารถประเมินได้ด้วยแบบจำลองของ Kleanthous [16] ในขณะที่ Jiang และคณะ [17] ใช้ PA6 Particles ในส่วนรับความร้อนสามารถช่วยให้เทอร์โมไซฟอนที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานมีสมรรถนะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 25% ต่อจากนั้น Aghel และคณะ [18] สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนบริเวณคอนเดนเซอร์เฉลี่ย 10–17% ด้วยการออกแบบให้น้ำหล่อเย็นไหลแบบขวางในคอนเดนเซอร์ เมื่อสำรวจและศึกษางานวิจัยเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรที่มีอิวาโปรเตอร์ขนาดใหญ่หรือมีลักษณะเป็นอ่างและการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยอิวาโปรเตอร์ ซึ่งเป็นลักษณะที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยในครั้งนี้ พบว่า Kiseev และ Sazhin [19] ได้ทดลองระบายความร้อนให้กับหลอด LED ด้วยเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรที่มีส่วนรับความร้อนเป็นอ่างและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ 20–25% ด้วย Nanofluid ซึ่งก่อนหน้านี้ He [20] พบว่าอัตราส่วนการเดินที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความดันและจุดเดือดของสารทำงานเพิ่มขึ้น ของเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรที่มีอิวาโปรเตอร์และคอนเดนเซอร์ที่มีลักษณะเป็นอ่างโดยมีของสารทำงานในแนวนอน นอกจากนี้ Zhang และคณะ [21–23] พบว่าการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้วยอิวาโปรเตอร์

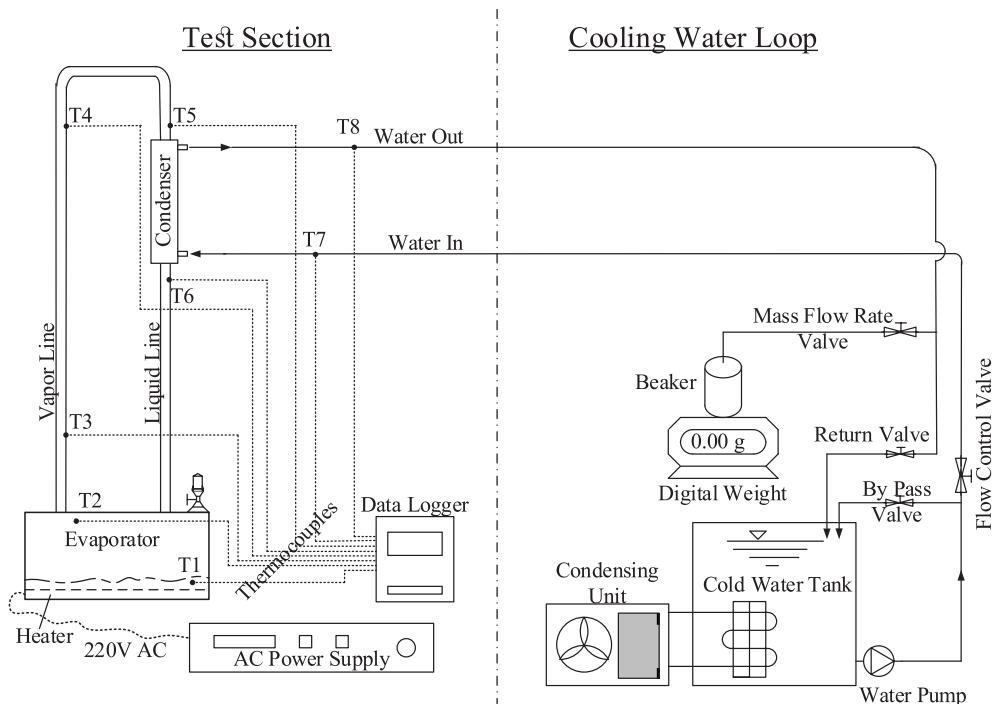
มากกว่า 1 ตำแหน่งนั้น จะสามารถทำงานได้รวดเร็วด้วยโหลดความร้อนที่สูงขึ้นแต่แหล่งความร้อนจะต้องมีปริมาณใกล้เคียงกันจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมไซฟอนสรุปได้ว่าสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักๆ คือชนิดของสารทำงาน อัตราการเติม รูปแบบหรือรูปร่างลักษณะของเทอร์โมไซฟอน โหลดความร้อน การระบายความร้อน และสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายโดยเฉพะงานวิจัย [9]

สำหรับการวิจัยครั้งนี้เป็นการสร้างและทดสอบหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอนต้นแบบที่ออกแบบให้เป็นหม้อไอน้ำโดยมีท่อนำไอระเหยและท่อนำของเหลวเป็นท่อปลายเปิดอยู่ภายในหม้อต้ม ซึ่งมีเป้าหมายในการออกแบบสร้างเป็นตู้อบสมุนไพรและสามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลากหลายมากขึ้น ที่สำคัญจะต้องไม่มีไอเสียสัมผัสกับชิ้นงานที่อบในตู้และสามารถควบคุมอุณหภูมิการทำงานได้ด้วยหลักการการทำงานของเทอร์โมไซฟอน ทั้งนี้หม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอนต้นแบบนี้จะศึกษาลักษณะการทำงาน อิทธิพลของปลายท่อของเหลวไหลกลับ อัตราการเติมน้ำเป็นสารทำงานที่เหมาะสม และสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนโดยรวมก่อนใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบใช้งานจริงต่อไป

2. การทดลอง

2.1 วงจรการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงแผนภาพอุปกรณ์ในการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยส่วนทำน้ำเย็น (Cooling Water Loop) และส่วนการทดสอบ (Test Section) โดยในส่วนของการทำน้ำเย็นนั้นเป็นระบบทำความเย็นแบบปิดขนาด 3.52 kW (1 Ton/h) โดยมีถังน้ำเย็นขนาดความจุ 150 L อุณหภูมิน้ำสามารถควบคุมให้คงที่ได้ด้วยระบบการควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ ส่งจ่ายน้ำเย็นจากถังไปยังส่วนการทดสอบด้วยปั้มน้ำที่มีอัตราการไหลสูงสุด 15 L/min ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเย็นโดยการปรับวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow Control Valve) และวาล์วลดความดัน (By Pass Valve) ซึ่งวัดอัตราการไหลเชิงมวลด้วยการตวงและชั่งด้วยเครื่องชั่งแบบตัวเลขรุ่น ML-CF1 ที่มีย่านการวัด 1,000 g และมีค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ± 1 g เทียบกับเวลา วัดอุณหภูมิและบันทึกด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดเท่ากับ $\pm 0.1\%$ ร่วมกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) ยี่ห้อ GRAPHTEC รุ่น GL820 มีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 0.05\%$

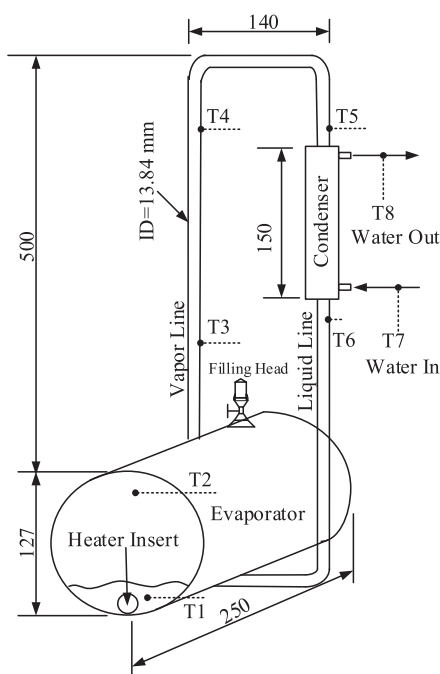


รูปที่ 1 ไดอะแกรมอุปกรณ์ในการทดลองหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอน

2.2 อุปกรณ์การทดลอง

หม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอนที่ออกแบบสร้างในการทดลอง ดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยฮีวโปรเตอร์เป็นหม้อต้มทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (OD) เท่ากับ 127 mm ทำด้วยท่อทองแดงมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (ID) เท่ากับ 123 mm ยาว 250 mm ท่อน้ำไอระเหยและของเหลวมีขนาดเท่ากันตลอด เพื่อให้เกิดความดันสูญเสีย (Pressure Loss) ในระบบให้น้อยที่สุดดังผลสรุปของ Padilla และคณะ [24] โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 13.84 และ 15.875 mm

ความสูงรวมเท่ากับหม้อต้มเท่ากับ 627 mm และมีท่อทองแดง ขนาด 12.7 mm ยาว 250 mm สำหรับสอตฮีทเตอร์ไฟฟ้า 220V เข้าภายในหม้อต้มและวัดกำลังไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดแบบ ตัวเลขยี่ห้อ YUGO รุ่น M9805G ซึ่งมีย่านการวัด 6,000 W มีความละเอียดในการอ่านค่าได้ต่ำสุดเท่ากับ 1 W โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1% คอนเดนเซอร์ระบายความร้อน ด้วยน้ำมีช่วงผิวสัมผัสยาว 150 mm วัดอุณหภูมิของน้ำทางเข้า และทางออกเพื่อใช้คำนวณหาปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายโอนได้



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอน

2.3 การทดลองและเงื่อนไขในการทดลอง

การทดลองนั้นเริ่มด้วยการทดสอบอิทธิพลรูปแบบท่อไหลกลับของของเหลว 2 รูปแบบเพื่อการออกแบบประยุกต์ใช้งานดังรูปที่ 3 คือ แบบไหลกลับภายใต้ผิวของเหลวในหม้อต้ม 2 ลักษณะ (A1, A2) และแบบไหลกลับเหนือผิวของเหลวในหม้อต้ม 2 ลักษณะ (B1, B2) โดยปลายท่อแบบ B2 มีรัศมีความโค้งนอกเท่ากับ 1.5D โดยให้ไหลลดความร้อนคงที่เท่ากับ 300W (30 kW/m²) และเติมน้ำเป็นสารทำงานในอัตรา 10% ของปริมาตรช่องว่างของระบบตามผลการทดลองของ Chehade

และคณะ [25] ซึ่งน้ำบริสุทธิ์หรือน้ำกลั่นนั้นเป็นสารทำงานอันดับต้นๆ ที่ถูกเลือกใช้ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับสารทำงานอื่นๆ เนื่องจากน้ำนั้นมีค่าความจุความร้อนจำเพาะสูง หาได้ทั่วไป บรรจุและทำสุญญากาศได้ง่าย ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม รวมทั้งมีสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่จะสามารถทำให้เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำเฉลี่ย 30°C เมื่อสามารถทำให้เกิดความดันสัมบูรณ์ในระบบ หลังจากนั้นเลือกใช้รูปแบบท่อไหลกลับของสารทำงานหลังการควบแน่นที่เหมาะสมเพื่อทดลองหาอัตราการเติมที่เหมาะสมต่อไปด้วยอัตราการเติม 7, 8, 9,

10, 11, 12, และ 13% เมื่อได้อัตราการเติมที่เหมาะสมแล้วจึงนำมาทดสอบเพื่อหาสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนด้วยโหลดความร้อนคงที่ในช่วง 100W–1000W (10–100 kW/m²) สุดท้ายทำการทดลองแบบอุณหภูมิคงที่ในช่วง 50–90°C โดยในทุกๆ การทดลองนั้นคอนเดนเซอร์จะถูกระบายความร้อน

ด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิทางเข้าเฉลี่ย 25°C และมีอัตราการไหลเชิงมวลเฉลี่ย 500 g/min (8.33×10⁻³ kg/s) โดยเครื่องมือวัดค่าตัวแปรต่างๆ ในการทดลองนั้นทำให้เกิดความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์จากการวัดได้สูงสุดตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์จากการวัดในการทดลอง

Parameter	Maximum Uncertainty
Temperature	±0.14 °C
Cooling Water Mass Flow Rate	±5.0 g/min
Heat Load	±2.56 %

2.4 การตรวจสอบขีดจำกัดการเดือด

ก่อนจะทำการทดลองสำหรับการถ่ายโอนความร้อนด้วยหลักการเดือดนั้นจะต้องตรวจสอบโหลดความร้อนที่จะสามารถรับได้ด้วยขีดจำกัดการเดือดของสารทำงานนั้นๆ (Boiling Limit, q_{boil}) Sukchana และ Pratinthong [26] โดยจะต้องไม่เกิดการแห้งขึ้นในระบบ ในการทดลองครั้งนี้มีอัตราการเติมน้ำเป็นสารทำงานน้อยที่สุดเท่ากับ 7% ของปริมาตรระบบหรือมีปริมาณเท่ากับ 228 cm³ และเมื่อตรวจสอบขีดจำกัดการเดือดด้วยสมการที่ (1) [26] พบว่าโหลดความร้อนสูงสุดที่สามารถใช้งานได้เท่ากับ 16,383 W ซึ่งในการทดลองหาอัตราการเติมที่เหมาะสมนั้นใช้โหลดความร้อนคงที่เท่ากับ 300W ซึ่งน้อยกว่าโหลดความร้อนสูงสุดประมาณ 65 เท่า

$$q_{boil} = 0.12h_{fg}S_E(\rho_v)^{0.5}[\sigma(\rho_l - \rho_v)]^{0.25} \quad (1)$$

โดยที่ g คืออัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง h_{fg} คือค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ/kg), ρ_v , ρ_l คือความหนาแน่นของไอและของเหลว (kg/m³), σ คือแรงตึงผิวของของไหล (N/m) และ S_E คือพื้นที่ผิวการรับความร้อนของฮีวโปเรเตอร์ (m²)

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

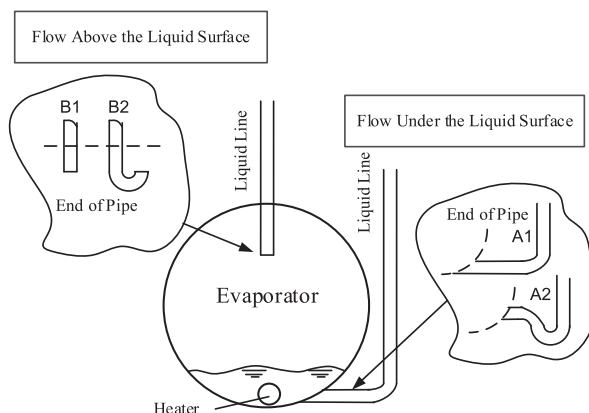
ในการสร้างและทดสอบสมรรถนะหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรแนวนอนนั้นแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ 1) ทดลองเพื่อหาลักษณะสลายของท่อไหลกลับที่เหมาะสม 2) เพื่อหาอัตราการเติมที่เหมาะสม และ 3) เพื่อทดสอบสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อน

3.1 อิทธิพลของลักษณะปลายท่อไหลกลับของเหลว

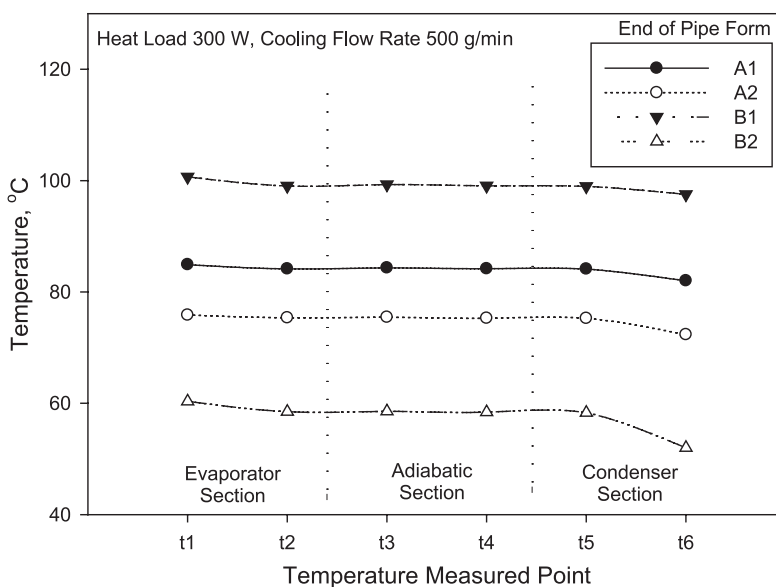
ทดสอบรูปแบบการไหลกลับของของเหลว 4 ลักษณะดังรูปที่ 3 โดยให้ฟลักซ์ความร้อนคงที่เท่ากับ 30 kW/m² เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบสร้างเทอร์โมไซฟอนแบบหม้อต้มที่มีลักษณะคล้ายกับงานวิจัย [19] ซึ่งจะมีความแตกต่างจากเทอร์โมไซฟอนแบบวงจรทั่วไปที่มีลักษณะเป็นท่อบางตัวกัน ผลการทดลองดังรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าปลายท่อแต่ละแบบมีอิทธิพลต่อจุดเดือดของสารทำงานในระบบ โดยปลายท่อแบบ B1 เป็นผลทำให้มีจุดเดือดสูงสุดรองลงมาเป็น A1, A2 และ B2 ตามลำดับ ซึ่งการไหลเวียนของสารทำงานในเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรนั้นจะต้องอาศัยผลต่างของความดันภายในระหว่างท่อไอกับท่อของเหลว (Pressure Drop) Chiaperro และคณะ [27] โดยความดันในท่อของเหลวนั้นจะลดลงเนื่องจากการ

ควมแน่น จากผลการทดลองแสดงว่าปลายท่อแบบ B1, A1 และ A2 ทำให้เกิดการควมแน่นได้ช้าและมีของเหลวในปริมาณไม่มากพอจึงทำให้เกิดไอซึ่งเป็นแรงต้านการไหลของไอที่มาจากท่อหน้าไอระเหยจึงส่งผลต่อจุดเดือดที่สูงขึ้น โดยปกติแล้วปลายท่อแบบ A1 และ A2 สามารถใช้กับเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรทั่วไปได้แต่พบว่าไม่เหมาะกับเทอร์โมไซฟอนที่มีอาการเดือด

ขนาดใหญ่ เมื่อพิจารณาปลายท่อแบบ B2 พบว่ามีจุดเดือดต่ำสุดเนื่องจากมีของเหลวอยู่ในช่องอและเป็นอิสระกับของเหลวในหม้อต้มสามารถไหลกลับด้วยแรงโน้มถ่วงและล้นลงในอ่างจึงทำให้เกิดผลต่างของความดันได้เร็วกว่าแบบอื่น สำหรับการทดลองในขั้นตอนต่อไปนั้นจะใช้เฉพาะปลายท่อแบบ B2 ในการทดสอบ



รูปที่ 3 รูปแบบการไหลกลับและลักษณะปลายท่อ



รูปที่ 4 อิทธิพลของลักษณะปลายท่อไหลกลับต่ออุณหภูมิการทำงานในระบบ

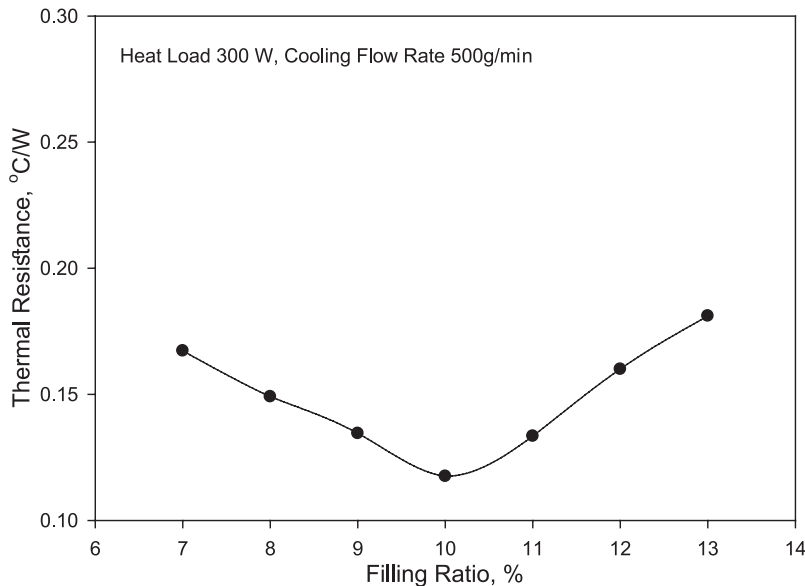
3.2 ผลการทดสอบอัตราการเติมน้ำเป็นสารทำงานที่เหมาะสม

การทดลองเพื่อหาอัตราการเติมที่เหมาะสมด้วยอัตราการเติม 7, 8, 9, 10, 11, 12 และ 13% ของปริมาตรรวมของระบบโดยให้โหลดความร้อนคงที่เท่ากับ 300W ตามเงื่อนไขการทดลอง รูปที่ 5 แสดงเป็นความสัมพันธ์ของอัตราการเติมกับค่าความต้านทานความร้อน (Z) ที่คำนวณได้ด้วยสมการที่ (2) จะเห็นได้ว่าอัตราการเติมมีผลโดยตรงกับค่าความต้านทานความร้อนโดยพบว่าที่อัตราการเติม 10% มีค่าความต้านทานความร้อนต่ำสุดจึงเป็นอัตราการเติมที่เหมาะสมซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง [25] แสดงว่าที่อัตราการเติม 10% มีผลทำให้

จุดเดือดต่ำกว่าอัตราการเติมอื่นๆ เนื่องจากอัตราการเติมสารทำงานนั้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรช่องว่างที่เหลือนในระบบ โดยจะมีผลต่อความดันและจุดเดือดภายในระบบซึ่งเป็นความสัมพันธ์กันด้วยสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยตรง

$$Z = \frac{\Delta T}{Q_{cond}} \quad (2)$$

โดยที่ Z คือค่าความต้านทานความร้อนรวม ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$), ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิไววโปรเตอรกับคอนเดนเซอร์ ($^{\circ}\text{C}$) และ Q_{cond} คือความร้อนที่ถ่ายเทได้บริเวณคอนเดนเซอร์ (W)



รูปที่ 5 ค่าความต้านทานความร้อนที่อัตราการเติมสารทำงานแตกต่างกัน

3.3 สมรรถนะของหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอน

สมรรถนะของหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอนประเมินจากปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายโอนได้โดยคำนวณด้วยสมการที่ (3) และจุดเดือดของสารทำงานในระบบ เมื่อให้ความร้อนคงที่โดยการคำนวณเป็น ฟลักซ์ความร้อนด้วยสมการที่ (4) ได้ฟลักซ์ความร้อนคงที่ในช่วง 10–100 kW/m^2 รูปที่ 6(a) จะเห็นได้ว่าจุดเดือดของสารทำงานมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับฟลักซ์ความร้อนซึ่งเป็นข้อมูลที่สามารถใช้ในการทำนายผล

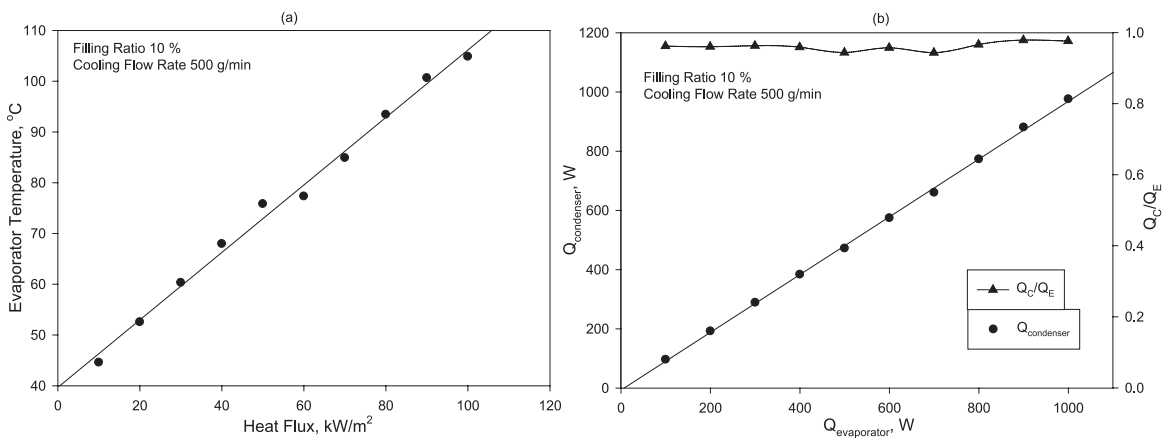
ระหว่างฟลักซ์ความร้อนและจุดเดือดของหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอนในรูปแบบที่ทำการทดลองได้ เมื่อพิจารณารูปที่ 6(b) พบว่าระบบสามารถถ่ายโอนความร้อนจากไววโปรเตอรไปยังคอนเดนเซอร์ได้เฉลี่ย 94–97% โดยมีการสูญเสียเพียง 3–6% ซึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียความร้อนผ่านฉนวนที่หุ้มและความแม่นยำของเครื่องมือวัด นอกจากนี้การทดลองแบบอุณหภูมิกึ่งที่ดังรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนได้นั้นมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นเช่นเดียวกับรูปที่ 6(a) และพบว่า

ในช่วงอุณหภูมิ 50–90°C ระบบสามารถถ่ายโอนความร้อนได้เฉลี่ย 200–750 W หรือคิดเป็นฟลักซ์ความร้อนที่อีวาโปเรเตอร์รับได้เท่ากับ 20–75 kW/m² โดยไม่คิดการสูญเสียความร้อนของระบบ ซึ่งสามารถที่จะใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบประยุกต์ใช้งานจริงต่อไปได้

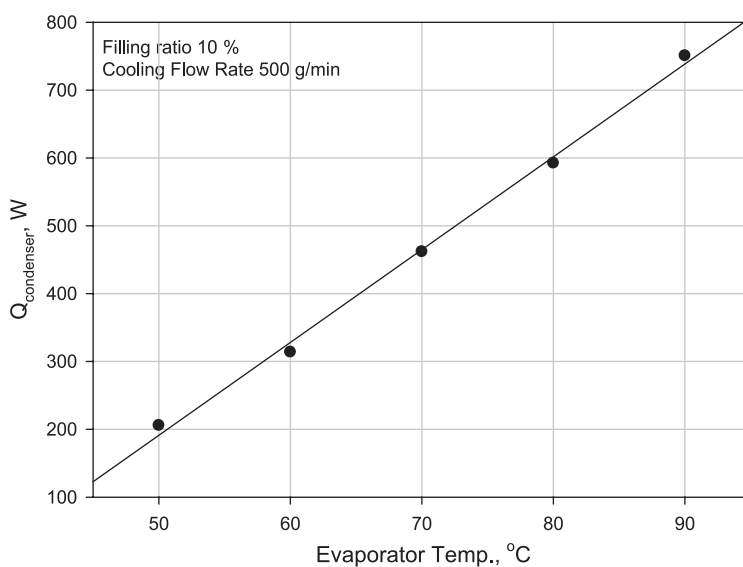
$$Q = mc_p \Delta T \quad (3)$$

$$q = \frac{Q_{evap}}{S_E} \quad (4)$$

โดยที่ Q คือปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายโอนได้ (W), m คืออัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (kg/s), c_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg.°C), ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น (°C), q คือฟลักซ์ความร้อน (kW/m²), Q_{evap} คือโหลดความร้อนที่ให้ (W) และ S_E คือพื้นที่ผิวของท่อให้ความร้อน (m²)



รูปที่ 6 สมรรถนะการถ่ายโอนความร้อนเมื่อให้ความร้อนคงที่

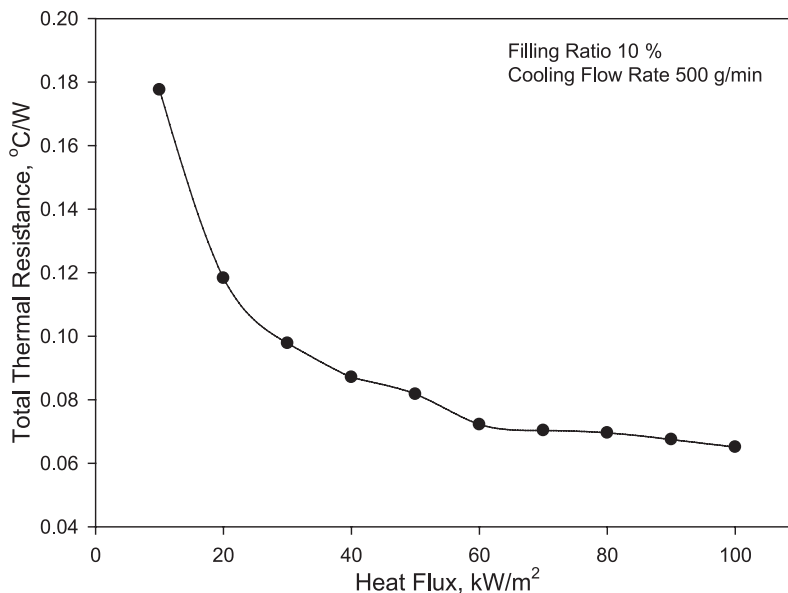


รูปที่ 7 สมรรถนะการถ่ายโอนความร้อนเมื่ออุณหภูมิอีวาโปเรเตอร์คงที่

3.4 ค่าความต้านทานความร้อนรวม

ค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z) ของหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอนซึ่งได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (2) เป็นคุณลักษณะในการถ่ายโอนความร้อนอย่างหนึ่งของเทอร์โมไซฟอน [11, 14, 18, 20, 28] เทียบกับฟลักซ์ความร้อนดังรูปที่ 8 จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานความร้อนรวมลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อฟลักซ์ความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 10 kW/m^2 ไปยัง 60 kW/m^2 และยังคงมีแนวโน้มลดลงเมื่อฟลักซ์ความ

ร้อนสูงมากกว่า 60 kW/m^2 ซึ่งแสดงว่าท่อความร้อนที่สร้างขึ้นยังมีสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนได้ดี การประยุกต์ใช้งานนั้นสามารถใช้ค่า Z ในการคำนวณออกแบบเพื่อหาโหลดความร้อนและอุณหภูมิการทำงานที่เหมาะสมของระบบได้ สำหรับหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอนตามรูปแบบที่ได้ทำการทดลองพบว่ามีค่า Z ต่ำสุดเท่ากับ 0.065°C/W ด้วยฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 100 kW/m^2



รูปที่ 8 ค่าความต้านทานความร้อนรวมของหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอน

4. สรุปผลการทดลอง

การออกแบบสร้างและทดสอบหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอนโดยการเติมน้ำกลั่นเป็นสารทำงานด้วยอัตราการเติม 10% ของปริมาตรระบบ ซึ่งปริมาตรส่วนใหญ่นั้นเป็นส่วนของหม้อต้มประมาณ 95% จึงทำให้มีลักษณะเป็นหม้อไอน้ำ โดยท่อน้ำไอน้ำและท่อน้ำของเหลวเป็นท่อแบบปลายเปิดอยู่ภายในหม้อต้ม จากผลการทดลองพบว่าหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอนจะมีสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนได้ดีนั้นปลายท่อของเหลวไหลกลับจะต้องไม่อยู่ใต้ผิวการเดือดและต้องมีช่องเหลวค้างอยู่ในท่อเพื่อป้องกันแรงดันจากความดันไอในหม้อต้ม ในการทดลองนี้

สามารถถ่ายโอนความร้อนจากฮีวโปรเตอร์ไปยังคอนเดนเซอร์ได้เฉลี่ย 94–97% และพบว่าค่าความต้านทานความร้อนรวมต่ำสุดเท่ากับ 0.065°C/W ด้วยฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 100 kW/m^2 ในขณะที่ค่าความต้านทานความร้อนรวมยังคงมีแนวโน้มลดลงเมื่อฟลักซ์ความร้อนสูงขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

1. Wannapakhe, S., 2012, "Heat Pipe and Thermosyphon Applications in Thailand," *The Journal of KMUTNB*, 22 (3), pp. 689–702. (In Thai).

2. Sukchana, T. and Thadniam, V., 2019, "A Technique of Heat Pipe Filling with the Refrigerants Vapor Compression Method," *The Journal of KMUTNB*, 29 (1), pp. 93–102 (In Thai).
3. Srimuang, W. and Kokpimai, D., 2013, "Enhancement of Heat Transfer Efficiency of Flat Two Phase Closed Thermosyphon by Using Copper Nano Powder with Water as Working Fluid," *Burapha Science Journal*, 18 (1), pp. 125–136. (In Thai).
4. Pipatpaiboon, N., Rittidech, S. and Paramatthanuwat, T., 2013, "Heat Transfer Characteristics of Oscillating Heat Pipes," *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (2), pp. 259–270. (In Thai).
5. Nakkaew, S. and Wongwises, S., 2018, "Application of Heat Pipes to Enhance Performance of Air Conditioning System," *KMUTT Research and Development Journal*, 41 (3), pp. 267–279. (In Thai).
6. Siricharoenpanich, A., Rittidech, S. and Bubphachot, B., 2014, "Performance Improvement of air Conditioner by using Closed-Loop Oscillating Heat Pipe with Check Valves," *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, 33 (3), pp. 294–299. (In Thai).
7. Kanjai, S. and Mongkon, S., 2017, "Dehumidification Potentiality of Evaporative Cooling System for Residential Home by Heat Pipe," *Engineering Journal Chiang Mai University*, 24 (1), pp. 166–179. (In Thai).
8. Sichamnan, S., Chompookham, T. and Rittidech, S., 2016, "Efficiency Enhancement of Solar Panels using Copper Mesh Wick Heat Pipe," *UBU Engineering Journal*, 9 (1), pp. 11–22. (In Thai).
9. Nimmol, C. and Ritthong, W., 2012, "Application of Thermosyphon Heat Pipes for Paddy Dehydration Process," *KKU Research Journal*, 17 (6) pp. 862–879. (In Thai).
10. Gedik, E., 2016, "Experimental Investigation of the Thermal Performance of a Two-Phase Closed Thermosyphon at Different Operating Conditions," *Energy and Buildings*, 127, pp. 1096–1107.
11. Ong, K.S., Goh, G., Tshai, K.H. and Chin, W.M., 2016, "Thermal Resistance of a Thermosyphon Filled with R410A Operating at Low Evaporator Temperature," *Applied Thermal Engineering*, 106, pp. 1345–1351.
12. Chen, S. and Yang, J., 2016, "Loop Thermosyphon Performance Study for Solar Cells Cooling," *Energy Conversion and Management*, 121, pp. 297–304.
13. Liu, Y., Li, Z., Li, Y., Kim, S. and Jiang, Y., 2018, "Experimental Investigation of Geyser Boiling in a Two-Phase Closed Loop Thermosyphon with High Filling Ratios," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, pp. 857–869.
14. Gorecki, G., 2018, "Investigation of Two-Phase Thermosyphon Performance Filled with Modern HFC Refrigerants," *Heat and Mass Transfer*, 54, pp. 2131–2143.
15. Dobriansky, Y. and Wojcik, R., 2019, "State of the Art Review of Conventional and Anti-Gravity Thermosyphons: Focus on Two Working Fluids," *International Journal of Thermal Sciences*, 136, pp. 491–508.
16. Kleanthous, A. and Van G., R.A., 2017, "Influence of Boiler Size and Location on One-Dimensional Two-Phase Vertical Pipe Flow," *International Journal of Thermal Sciences*, 121, pp. 150–162.
17. Jiang, F., Tan, Y., Qi, Guo-Peng., Chen, Wen-jing., Han, Xiao-Yu and Li, Xiu-lun., 2016, "Heat Transfer Enhancement in a Closed Thermosyphon with Thermally Conductive PA6/Water," *Applied Thermal Engineering*, 101, pp. 322–329.
18. Aghel, B., Rahimi, M. and Almasi, S., 2017, "Heat Transfer Enhancement of Two Phase Closed Thermosyphon using a Novel Cross Flow Condenser," *Heat Mass Transfer*, 53 (3), pp. 765–773.

19. Kiseev, V. and Sazhin, O., 2019, "Heat Transfer Enhancement in a Loop Thermosyphon using Nanoparticles/Water Nanofluid," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 132, pp. 557–564.
20. He, H., Furusato, K., Yamada, M., Shen, B., Hidaka, S., Kohno, M., Takahashi, K. and Takata, Y., 2017, "Efficiency Enhancement of a Loop Thermosyphon on a Mixed-Wettability Evaporator Surface," *Applied Thermal Engineering*, 123, pp. 1245–1254.
21. Zhang, H., Shao, S., Gao, Y., Xu, H. and Tian, C., "The Effect of Heating Power Distribution on the Startup Time and Overshoot of a Loop Thermosyphon with Dual Evaporators," *Applied Thermal Engineering*, 132, pp. 554–559.
22. Zhang, H., Shao, S., Gao, Y., Xu, H. and Tian, C., 2018, "The Transient Response, Oscillation and Internal Flow of a Loop Thermosyphon with Dual Evaporators," *International Journal of Refrigeration*, 88, pp. 451–457.
23. Zhang, H., Shao, S., Xu, H. and Tian, C., 2019, "Experimental Investigation on a Loop Thermosyphon with Three Evaporators: Unique Startup and Oscillation Phenomena," *International Journal of Refrigeration*, 99, pp. 363–370.
24. Padilla, M., Revellin, R. Wallet, J. and Bonjour, J., 2013, "Flow Regime Visualization and Pressure Drops of HFO-1234yf, R-134a and R-410A During Downward Two-Phase Flow in Vertical Return Bends," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 40, pp. 116–134.
25. Chehade, A.A., Louahlia-Gualous, H. Le Masson, S. Victor, I. and Abouzahab-Damaj, N., 2014, "Experimental Investigation of Thermosyphon Loop Thermal Performance," *Energy Conversion and Management*, 84, pp. 671–680.
26. Sukchana, T. and Pratinthong, N., 2017, "Effect of Bending Position on Heat Transfer Performance of R-134a Two-Phase Close Loop Thermosyphon with an Adiabatic Section using Flexible Hoses," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 114, pp. 527–535.
27. Chiapero E.M., Fernandino, M. and Dorao, C.A., 2014. "Experimental Results on Boiling Heat Transfer Coefficient Frictional Pressure Drop and Flow Patterns for R134a at a Saturation Temperature of 34°C," *International Journal of Refrigeration*, 40, pp. 317–327.
28. Reay, D.A. and Kew, P.A., 2006, *Heat Pipes*, Jordan Hill, Burlington.

สมบัติเชิงเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของเค้กที่เติมฟิวเร่มะม่วง

ปรัสรา กนกปติวณิช¹ ปิติพร ฤทธิเรืองเดช^{2*} ปารมี พูลสวัสดิ์³ และ สุพิชชา ไหมสมบุญ³

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

* Corresponding Author: pitiporn@gmail.com

¹ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

³ นิสิตปริญญาตรี ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 20 สิงหาคม 2562

แก้ไข : 12 มกราคม 2563

ตอบรับ : 14 กุมภาพันธ์ 2563

คำสำคัญ :

ฟิวเร่มะม่วง / เค้กมะม่วง /
แบทเทอร์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาผลของปริมาณฟิวเร่มะม่วงต่อสมบัติเชิงวิทยาการและของแบทเทอร์และสมบัติเชิงเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของเค้กที่เติมฟิวเร่มะม่วง โดยผันแปรฟิวเร่มะม่วงในปริมาณที่ต่างกัน 3 ระดับ (25 40 และ 55 กรัม) ลงในแบทเทอร์ 100 กรัม จากการศึกษา พบว่า แบทเทอร์ที่เตรียมที่ทุกสภาวะการทดลองมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก เนื่องจากมีค่าดัชนีการไหลอยู่ในช่วงระหว่าง 0.51-0.60 การเติมฟิวเร่มะม่วงปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่าดัชนีความข้นเหลวของแบทเทอร์ลดลง ส่งผลต่อสมบัติเชิงเคมีและกายภาพของเค้กมะม่วง โดยปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณเส้นใยหยาบ ค่าความแข็ง แรงที่ใช้ในการเคี้ยว ค่า L^* a^* และ b^* เพิ่มขึ้นเมื่อใส่ฟิวเร่มะม่วงในปริมาณที่มากขึ้น ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ปริมาณไขมัน ปริมาตรจำเพาะ ค่าการยี้ดเกาะกันภายในอาหาร และค่าการกลับคืนตัวลดลง ($p \leq 0.05$) ผลการประเมินสมบัติเชิงประสาทสัมผัส พบว่า ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบโดยรวมเค้กมะม่วงที่ใส่ฟิวเร่มะม่วง 25 และ 40 กรัมต่อแบทเทอร์ 100 กรัมมากที่สุดและไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

Chemical, Physical and Sensory Properties of Cake Added with Mango Puree

Prassara Kanokbodeevanit¹, Pitiporn Ritthiruangdej^{2*}, Paramee Poonsawat³
and Supitchar Maisombun³

Kasetsart University, Ladyaow, Chatuchak, Bangkok 10900

* Corresponding Author: pitiporn@gmail.com

¹ Graduate Student, Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry.

² Associate Professor, Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry.

³ Undergraduate Student, Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: August 20, 2019

Revised: January 12, 2020

Accepted: February 14, 2020

Keywords:

Mango Puree /

Mango Cake / Batter

The objective of this research was to investigate the effect of mango puree addition on the rheology of cake batter and to determine selected chemical, physical and sensory properties of the mango cake. Three different levels of mango puree (25, 40 and 55 g) were added in 100 g of cake batter. The results indicated that all cake batters exhibited pseudoplastic behavior; the flow behavior indices of the batters ranged from 0.51 to 0.60. The consistency index of cake batters decreased with increasing mango puree content; the decrease in turn affected the chemical and physical properties of the cake. The contents of moisture, ash and fiber and the values of hardness, chewiness, L^* , a^* and b^* of mango cake increased ($p \leq 0.05$) when the mango puree content increased, whereas the fat content, specific volume, cohesiveness and springiness of the samples showed an opposite trend ($p \leq 0.05$). Sensory evaluation showed that 25 g and 40 g of mango puree added to 100 g of cake batter resulted in the highest overall liking score; the results belonging to the two cake samples were nevertheless not significantly different ($p > 0.05$).

1. บทนำ

มะม่วง (*Mangifera indica* L.) มีชื่อสามัญว่า Mango จัดอยู่ในวงศ์ Anacardiaceae [1] เป็นผลไม้เมืองร้อนที่สำคัญซึ่งสามารถบริโภคได้ทั้งในรูปแบบสดหรือผ่านกระบวนการแปรรูป [2] ประเทศอินเดียมีสัดส่วนการปลูกมะม่วงมากที่สุดตามด้วยประเทศจีน ปากีสถาน เม็กซิโก และไทย [3] มะม่วงเป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยสารอาหารต่างๆ เช่น กรดแอสคอร์บิก เบต้าแคโรทีน และสารประกอบโพลีฟีนอลต่างๆ ซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สามารถต้านอนุมูลอิสระได้ [4] แต่เนื่องจากลักษณะที่บอบบางและเน่าเสียง่ายของมะม่วงสุกหลังจากการเก็บเกี่ยว จึงทำให้เกิดการสูญเสียในระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา เป็นสาเหตุให้เกิดการแปรรูปมะม่วงสุกให้เป็นพืชร่เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์อื่น (Intermediate ingredients) เช่น น้ำผลไม้ น้ำหวาน หรือใช้ในการผลิตแยม เยลลี่ ผลิตภัณฑ์นม และขนมอบต่างๆ [5] แต่เนื่องจากองค์ประกอบที่แตกต่างกันในพืชร่ เช่น น้ำตาล กรด แสง เพคติน น้ำ โยอาหาร และอื่นๆ ทำให้สมบัติเชิงกายภาพ เช่น เนื้อสัมผัส ความเป็นกรดต่าง ความหนืด วอเตอร์แอคทีวิตี ความหนาแน่น และค่าสีเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ใช้พืชร่เป็นวัตถุดิบ เช่น ความคงตัว ปฏิกริยาเคมี และกิจกรรมทางจุลินทรีย์ [6]

ผลิตภัณฑ์ขนมอบ (Bakery product) เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่มีการบริโภคมากที่สุดในโลก โดยเค้กเป็นผลิตภัณฑ์ขนมอบที่ได้รับความนิยมเนื่องจากมีลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ดี [7] โดยทั่วไปส่วนผสมของเค้กประกอบด้วยไขมัน น้ำตาล แป้งสาลี ไข่ และนม ซึ่งปริมาณไขมัน (20-50%) และปริมาณน้ำตาล (10-30%) ในสูตรขึ้นอยู่กับประเภทของเค้ก [8] ส่วนผสมเหล่านี้เมื่อรวมกันจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อละเอียดและเบา คุณภาพของเค้กขึ้นอยู่กับการใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพดี มีวิธีการผสม ระยะเวลาและอุณหภูมิในการอบที่ถูกต้อง สำหรับส่วนผสมที่ใช้ในการทำเค้กแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ทำให้เกิดโครงสร้างของเค้ก ได้แก่ แป้ง ไข่ และนม ส่วนกลุ่มที่ทำให้เค้กนุ่ม ได้แก่ น้ำตาล ไขมัน และผงฟู [9] ปัจจุบันแนวโน้มการตระหนักและใส่ใจในสุขภาพมีเพิ่มขึ้น โดยผลิตภัณฑ์ขนมอบส่วนใหญ่มักทำจากแป้งสาลีซึ่งเป็นแป้งที่มีเส้นใยอาหารจากธรรมชาติค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์จากธัญพืช [10] จึงเกิดการพัฒนาลักษณะขนมอบหลายรูปแบบเพื่อเพิ่มคุณค่าทางอาหาร

และตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค เช่น การแทนที่แป้งสาลีด้วยเส้นใยอาหารจากแหล่งอื่นๆ ซึ่งพืชร่เป็นหนึ่งในแหล่งของเส้นใยอาหารดังกล่าว [11]

จากการรวบรวมงานวิจัยต่างๆ พบว่า มีการนำพืชร่มะม่วงมาใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบหลายชนิด เช่น งานวิจัยของ Asefa และคณะ [12] ได้นำพืชร่มะม่วงมาแทนที่แป้งสาลีเพื่อศึกษาสมบัติเชิงเคมีในผลิตภัณฑ์คุกกี้ และพบว่าการแทนที่แป้งสาลีด้วยพืชร่มะม่วงในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความชื้นและเถ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำพืชร่มะม่วงมาทำให้อยู่ในรูปของผงหรือแป้งเพื่อความสะดวกก่อนนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบต่างๆ โดยงานวิจัยของ Badifu และคณะ [13] ได้นำแป้งมะม่วงมาแทนที่แป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมปังและพบว่าการแทนที่แป้งสาลีด้วยแป้งมะม่วงในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความชื้น โยอาหาร เถ้า และปริมาณเบต้าแคโรทีนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณไขมันลดลง แต่ยังไม่พบงานวิจัยที่นำพืชร่มะม่วงมาใช้ในการทำเค้ก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของการใช้พืชร่มะม่วงต่อสมบัติเชิงวิทยาการและของแบทเทอร์ และสมบัติเชิงเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของเค้กมะม่วง เพื่อพัฒนาลักษณะเค้กมะม่วงให้เป็นที่ต้องการของผู้บริโภคต่อไป

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

2.1 พืชร่มะม่วง

พืชร่มะม่วงพันธุ์แก้วขมิ้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก บริษัท ฐิตินันท์ ฟู้ด จำกัด โดยคุณภาพของพืชร่มะม่วงมีดังนี้ ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด 23.5 ± 0.10 องศาบริกซ์ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ร้อยละ 50.09 ± 0.62 และ 56.17 ± 0.86 ตามลำดับ ความชื้นร้อยละ 73.67 ± 0.16 ค่าสี L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 54.14 ± 0.02 , 17.79 ± 0.05 และ 69.32 ± 0.29 ตามลำดับ

2.2 การวางแผนการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณพืชร่มะม่วงที่มีต่อค่าความหนืดของแบทเทอร์ และสมบัติเชิงเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของเค้กมะม่วง โดยผันแปรปริมาณพืชร่มะม่วงจำนวน 3 ระดับ คือ 25, 40 และ 55 กรัมต่อน้ำหนักส่วนผสมสูตรพื้นฐานทั้งหมด 100 กรัม วางแผนการทดลอง

แบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) สูตรพื้นฐานของเค้กประกอบด้วย แป้งเค้ก 26.46 กรัม ไข่ไก่ 24.27 กรัม น้ำตาลทราย 23.81 กรัม น้ำมันพืช 23.81 กรัม ผงฟู 0.66 กรัม เบคกิ้งโซดา 0.40 กรัม และเกลือ 0.40 กรัม

วิธีการทำเค้กมะม่วงทำได้โดย ร่อนแป้งเค้ก ผงฟู เบคกิ้งโซดา และเกลือผสมรวมกัน เทไข่ไก่ และน้ำตาลทรายลงในโถผสมของเครื่อง Kitchen aid (KMX51, Kenwood, Kenwood Limited, Havant, United Kingdom) ปั่นด้วยความเร็วปานกลาง เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นใส่แป้งที่ร่อนเตรียมไว้ และน้ำมันพืชลงในโถผสม ปั่นด้วยความเร็วปานกลาง เป็นเวลา 1 นาที ใส่ผิวมะม่วงลงไปปั่นต่อด้วยความเร็วปานกลางเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเทส่วนผสม 500 กรัม ใส่ลงในพิมพ์เค้กสี่เหลี่ยมขนาด $5 \times 5 \times 2.5$ นิ้ว อบเค้กโดยใช้เครื่อง Electric Convection Oven (DH4B-B, LinkRich, Linkrich Machinery Development Co., Ltd., Saint-Petersburg, Russia) ที่อุณหภูมิ 190°C เป็นเวลาประมาณ 30 นาที

2.3 การวิเคราะห์ความหนืดของแบทเทอร์

ทำการวัดค่าความหนืดของแป้งแบทเทอร์โดยดัดแปลงวิธีการของ Chaia และ Pongsawatmanit [14] ใช้เครื่อง Brookfield (DV-III ULTRA PROGRAMMABLE RHEOMETER, Brookfield Engineering Laboratories, Inc., Stoughton, Massachusetts, United States) ใช้หัววัดเบอร์ 29 ความเร็วรอบในการหมุนอยู่ในช่วง 10-100 rpm ควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างที่ $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ วัดค่า shear stress (τ) และ shear rate ($\dot{\gamma}$) เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า τ และ $\dot{\gamma}$ และอธิบายความสัมพันธ์ด้วยสมการ Power law ($\tau = K\dot{\gamma}^n$) เพื่อหาค่าดัชนีความข้นเหลว (consistency index; K) และค่าดัชนีการไหล (flow behavior index; n) ของแบทเทอร์

2.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงเคมีของเค้กมะม่วง

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ (Proximate analysis) ของตัวอย่างเค้ก ตามวิธีการของ AOAC [18] ได้แก่ ความชื้น ไขมัน เส้นใยหยาบ เถ้า และโปรตีน ($5.70 \times$ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด) แล้วนำมาคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรตจากสูตร คาร์โบไฮเดรต (%) = $100 - (\text{ความชื้น} (\%) + \text{ไขมัน} (\%) + \text{เส้นใยหยาบ} (\%) + \text{เถ้า} (\%) + \text{โปรตีน} (\%))$

2.5 การวิเคราะห์ปริมาตรจำเพาะของเค้กมะม่วง

วิเคราะห์ปริมาตรจำเพาะของตัวอย่างเค้กตามวิธีการของ TIS.(374-2534) [15] โดยใช้การแทนที่ด้วยเมล็ดงา (Rapeseed displacement) ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างเค้กมะม่วง (ก) จากนั้นใส่เค้กมะม่วงลงในภาชนะที่มีความสูงและความกว้างมากกว่าเค้กมะม่วงที่จะทำการวัดปริมาตรจำเพาะเติมเมล็ดงาให้เต็มช่องว่างทั้งด้านข้างและด้านบนของภาชนะวัดปริมาตรของเมล็ดงาที่ใช้เติมลงไปทั้งหมด (ข) ด้วยกระบอกตวง จากนั้นวัดปริมาตรของภาชนะเปล่าโดยการเติมเมล็ดงาให้เต็มภาชนะแล้ววัดปริมาตรของเมล็ดงา (ค) ด้วยกระบอกตวง นำมาคำนวณหาปริมาตรจำเพาะ (specific volume) จากสูตร ปริมาตรจำเพาะ = $[\text{ปริมาตรเมล็ดงา (ค)} - \text{ปริมาตรเมล็ดงา (ข)}] / \text{น้ำหนักเค้กมะม่วง (ก)}$

2.6 การวิเคราะห์สมบัติเชิงสีของเค้กมะม่วง

วิเคราะห์สมบัติเชิงสีของตัวอย่างเนื้อเค้กด้านใน (crumb) และด้านนอก (crust) โดยดัดแปลงวิธีการของ Ronda และคณะ [16] ทำการหั่นตัวอย่างเค้กมะม่วงเป็นสี่เหลี่ยมขนาด $30 \times 30 \times 30$ มิลลิเมตร วัดค่าสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer (CM3500d, Konica Minolta Sensing Americas, United States) ในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 มุมมองในการวัด 10° ค่าสีที่วัดได้แก่ L^* (แสดงถึงความสว่าง มีค่าอยู่ระหว่าง 0 (มืด) ถึง 100 (สว่าง)), a^* (เครื่องหมาย + หมายถึงสีแดง และเครื่องหมาย - หมายถึงสีเขียว) และ b^* (เครื่องหมาย + หมายถึงสีเหลือง และเครื่องหมาย - หมายถึงสีน้ำเงิน)

2.7 การวิเคราะห์สมบัติเชิงเนื้อสัมผัสของเค้กมะม่วง

วิเคราะห์สมบัติเชิงเนื้อสัมผัสของตัวอย่างเค้ก โดยดัดแปลงวิธีการของ Huang และ Yang [17] ใช้เครื่อง Texture analyzer (TA.XT Plus, Stable Micro Systems Ltd., United Kingdom) ด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) โดยการทดสอบแรงกด (Compression Test) วัดค่าความแข็ง (Hardness, N) ค่าการยึดเกาะกันภายในอาหาร (Cohesiveness) ค่าการกลับคืนตัว (Springiness) และแรงที่ใช้ในการเคี้ยว (Chewiness, N) ของตัวอย่างเค้กมะม่วงที่หั่นเป็นสี่เหลี่ยม

ขนาด 20 x 20 x 20 มิลลิเมตร ใช้หัววัดแบบทรงกระบอก ขนาด 36 มิลลิเมตร (36 mm cylinder probe) กำหนดสภาวะในการวัดดังนี้ load cell 50 kg, pre-test speed 5 mm/s, test speed 1 mm/s, post-test speed 1 mm/s และกดลงบนตัวอย่างเป็นระยะทาง 10 มิลลิเมตร

2.8 การประเมินสมบัติเชิงประสาทสัมผัสของเค้กมะม่วง

ทำการประเมินความชอบตัวอย่างเค้กด้วยวิธี 9-Point Hedonic Scaling Test (คะแนนเท่ากับ 1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด และคะแนนเท่ากับ 9 คือ ชอบมากที่สุด) ในคุณลักษณะด้านสี น้ำตาลของหน้าเค้ก ความมันวาวของหน้าเค้ก ความแน่นเนื้อ กลิ่นรสมะม่วง ความนุ่ม รสหวาน และความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน เสิร์ฟตัวอย่างพร้อมกันโดยจัดลำดับการเสิร์ฟแบบสุ่ม วางแผนการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Completely Block Design; RCBD) และกำหนดให้ผู้ชิมเป็นบล็อก (Block)

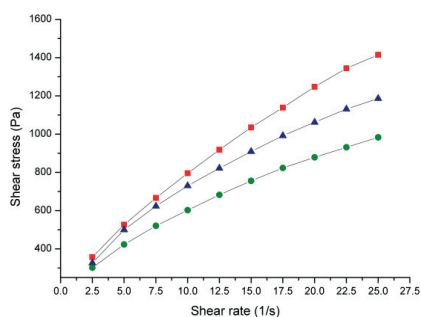
2.9 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำค่าสมบัติเชิงกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสของเค้กมะม่วงที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทางสถิติโดยวิธี Duncan's New Multiple Range โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป SPSS for Windows (IBM Co., New York, United States)

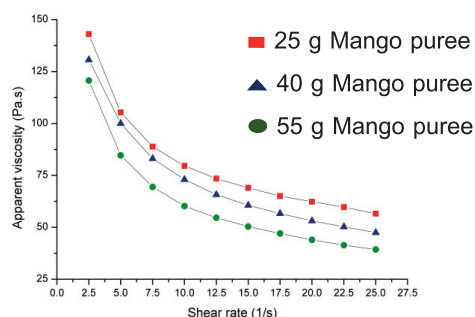
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการวิเคราะห์ความหนืดของแบทเทอร์

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate ของแบทเทอร์ที่ผันแปรปริมาณฟิวเร่มะม่วงในระดับแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 1(ก) ร่วมกับผลการใช้สมการ Power law อธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าสมการ Power law สามารถอธิบายพฤติกรรม การไหลของแบทเทอร์ทุกสิ่งทดลองได้เป็นอย่างดี ($R^2 = 0.99$) โดยแบทเทอร์ทุกสิ่งทดลองแสดงพฤติกรรมกรไหลแบบซูโดพลาสติก (pseudoplastic) เนื่องจากค่าดัชนีการไหล (flow behavior index; n) ของแบทเทอร์อยู่ในช่วง 0.51-0.60 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 [19] โดยความหนืดปรากฏ (apparent viscosity) ของแบทเทอร์ลดลงเมื่ออัตราเฉือน (shear rate) และปริมาณการใส่ฟิวเร่มะม่วงเพิ่มขึ้น [20] แสดงดังรูปที่ 1 (ข) เมื่อพิจารณาค่าดัชนีความข้นเหลว (consistency index; K) ของแบทเทอร์ที่สามารถอธิบายถึงค่าความหนืดได้ [21] พบว่าเมื่อใส่ฟิวเร่มะม่วงในปริมาณที่มากขึ้น มีผลทำให้แบทเทอร์มีค่าความหนืดลดลงพิจารณาได้จากค่าดัชนีความข้นเหลวลดลงตามปริมาณฟิวเร่มะม่วงที่ใส่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gurung และคณะ [22] ที่ได้นำฟิวเร่ฟักทองมาแทนที่แป้งสาลีในผลิตภัณฑ์บิสกิต และพบว่ากรใส่ฟิวเร่ฟักทองในปริมาณที่มากขึ้นเป็นการเพิ่มปริมาณน้ำลงในส่วนผสมของแบทเทอร์เนื่องจากฟิวเร่ฟักทองที่นำมาใช้มีปริมาณความชื้นสูงถึงร้อยละ 92.1 ส่งผลให้ความหนืดของแบทเทอร์ และความหนาของบิสกิต ลดลงตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate (ก) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง apparent viscosity และ shear rate (ข) ของแบทเทอร์ที่เติมฟิวเร่มะม่วงในระดับแตกต่างกัน

ตารางที่ 1 ผลของปริมาณพืชมะม่วงต่อดัชนีความชื้นเหลว (consistency index; K) และดัชนีการไหล (flow behavior index; n) ของแบบเทอร์

ปริมาณพืชมะม่วง (กรัม) ต่อแบบเทอร์ 100 กรัม	ดัชนีความชื้นเหลว (K) (Pa s ⁿ)	ดัชนีการไหล (n)	R ²
25	384.99	0.6069	0.9990
40	334.14	0.5573	0.9991
55	297.52	0.5186	0.9995

3.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงเคมีของเค้กมะม่วง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเค้กมะม่วง ได้ผลแสดงดังตารางที่ 2 เมื่อใส่พืชมะม่วงในปริมาณที่มากขึ้น พบว่าปริมาณความชื้น เถ้า และเส้นใยหยาบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากพืชมะม่วงที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในงานวิจัยนี้มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 73.7 อีกทั้งมะม่วงเป็นผลไม้ที่อุดมไปด้วยใยอาหาร ไขมัน และโพแทสเซียม [23, 24] ส่งผลให้เค้กมะม่วงมีปริมาณเส้นใยหยาบและเถ้าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณไขมันลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากสูตรของโครงสร้าง

เส้นใยสามารถอุ้มน้ำได้เป็นอย่างดี ดังนั้นปริมาณเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้น จึงไปลดความสามารถในการจับกับน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบ (oil-binding capacity) ส่งผลให้ปริมาณไขมันรวมของผลิตภัณฑ์สุดท้ายลดลง [25, 26] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ramírez-Maganda และคณะ [27] ที่ได้นำพืชมะม่วงมาแทนที่แป้งสาลี และน้ำตาลทรายเพื่อเพิ่มคุณค่าทางอาหารในผลิตภัณฑ์ที่มีฟีนอล ผลพบว่าการแทนที่แป้งสาลีและน้ำตาลทรายด้วยพืชมะม่วงในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความชื้นและเถ้าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณไขมันลดลงเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2 ผลของการเติมพืชมะม่วงที่ระดับแตกต่างกันในแบบเทอร์ต่อองค์ประกอบทางเคมีของเค้กมะม่วง

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณพืชมะม่วง (กรัม) ต่อแบบเทอร์ 100 กรัม		
	25	40	55
Moisture (%)	21.76 ± 0.95 ^c	23.57 ± 0.41 ^b	28.27 ± 0.17 ^a
Protein (%) ^{ns}	6.60 ± 0.32	6.64 ± 0.06	6.89 ± 0.01
Fat (%)	29.00 ± 0.32 ^a	27.49 ± 0.12 ^b	26.57 ± 0.16 ^c
Ash (%)	1.28 ± 0.02 ^c	1.31 ± 0.01 ^b	1.39 ± 0.01 ^a
Fiber (%)	0.90 ± 0.06 ^b	1.06 ± 0.11 ^{ab}	1.28 ± 0.20 ^a
Carbohydrate (%)	39.65 ± 1.64 ^a	38.53 ± 0.59 ^a	35.12 ± 0.17 ^b

หมายเหตุ : ^{a-c} ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวนอนแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} แสดงถึงค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกายภาพของเค้กมะม่วง

โดยทั่วไปแล้วปริมาตรจำเพาะของเค้กมีความสัมพันธ์

กับค่าความหนืดของแบบเทอร์ ในงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณพืชมะม่วง ส่งผลให้ปริมาตรจำเพาะของเค้กลดลง ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 2 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อ

เพิ่มปริมาณพืชมะม่วงมากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของแบทเทอร์ลดลง (ดังตารางที่ 1) มีผลทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำซึ่งเกิดการขยายตัวในระหว่างการอบไม่ถูกกักเก็บไว้ในเค้ก จึงทำให้การขึ้นฟูและปริมาตรจำเพาะของเค้กลดลงตามลำดับ [28] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Erfanian และ Rasti [29] ที่ได้นำนมถั่วเหลืองมาแทนที่นมวัวในผลิตภัณฑ์เค้กและพบว่า การแทนที่นมถั่วเหลืองในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ความหนืดของแบทเทอร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากความสามารถในการจับกับน้ำของนมถั่วเหลืองมากกว่านมวัว แบทเทอร์จึงสามารถกักเก็บแก๊สและไอน้ำได้ดี ส่งผลให้ปริมาตรจำเพาะของเค้กเพิ่มมากขึ้น เมื่อพิจารณาจากเนื้อสัมผัสจากตารางที่ 3 พบว่า การใส่พืชมะม่วงในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าการยึดเกาะกันภายใน

อาหาร (cohesiveness) และค่าการกลับคืนตัว (springiness) ลดลง ในขณะที่ค่าความแข็ง (hardness) และแรงที่ใช้ในการเคี้ยว (chewiness) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากปริมาตรจำเพาะและปริมาณไขมันที่ลดลงส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น [30, 31] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hussien [32] ที่ได้นำพืชมะม่วงมาแทนที่ไขมันในผลิตภัณฑ์เค้กแล้วพบว่า การเพิ่มปริมาณพืชมะม่วงในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งและแรงที่ใช้ในการเคี้ยวเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณไขมันที่ลดลงและปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น ทำให้จำนวนฟองอากาศและปริมาตรจำเพาะในเค้กลดลงตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลของการเติมพืชมะม่วงที่ระดับแตกต่างกันในแบทเทอร์ต่อองค์ประกอบทางเคมีของเค้กมะม่วง

สมบัติเชิงกายภาพ	ปริมาณพืชมะม่วง (กรัม) ต่อแบทเทอร์ 100 กรัม		
	25	40	55
Specific volume	2.27 ± 0.06 ^a	2.17 ± 0.07 ^b	1.53 ± 0.04 ^c
Hardness (N)	2.06 ± 0.10 ^c	2.26 ± 0.14 ^b	3.53 ± 0.16 ^a
Cohesiveness	0.74 ± 0.02 ^a	0.72 ± 0.02 ^b	0.66 ± 0.03 ^c
Springiness	0.933 ± 0.007 ^a	0.925 ± 0.012 ^b	0.900 ± 0.015 ^c
Chewiness (N)	1.44 ± 0.07 ^c	1.51 ± 0.06 ^b	2.05 ± 0.20 ^a
L* (Crumb)	57.11 ± 0.18 ^b	61.89 ± 0.03 ^a	62.53 ± 0.20 ^a
a* (Crumb)	10.42 ± 0.22 ^b	10.65 ± 0.16 ^b	12.08 ± 0.14 ^a
b* (Crumb)	36.66 ± 0.21 ^c	37.53 ± 0.20 ^b	39.14 ± 0.08 ^a
L* (Crust)	40.39 ± 0.25 ^c	43.42 ± 0.41 ^b	47.60 ± 0.15 ^a
a* (Crust)	12.58 ± 0.37 ^c	17.50 ± 0.38 ^b	19.91 ± 0.04 ^a
b* (Crust)	17.27 ± 0.33 ^c	18.86 ± 0.24 ^b	27.66 ± 0.21 ^a

หมายเหตุ : ^{a-c} ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวนอนแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



รูปที่ 2 ลักษณะปรากฏของเค้กมะม่วงที่เติมพืชมะม่วงในระดับแตกต่างกันในแบทเทอร์

เมื่อพิจารณาค่าสมบัติเชิงสีจากตารางที่ 3 พบว่า การใส่พิวเร่มะม่วงในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ของเปลือกด้านนอก (crust) และเนื้อด้านใน (crumb) ของเค้กเพิ่มขึ้น เนื่องจากพิวเร่มะม่วงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นมะม่วงสุก โดยทั่วไปมะม่วงสุกประกอบด้วยเบต้าแคโรทีนซึ่งเป็นรงควัตถุที่ให้สีเหลืองปริมาณ 1,768 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม

ของเนื้อมะม่วง [33] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mala และคณะ [34] ได้นำผงฟักทองที่เตรียมจากเนื้อฟักทองซึ่งมีเบต้าแคโรทีนสูงมาใช้ทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์มัฟฟินและพบว่า การใส่ผงฟักทองในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ของเนื้อด้านในมัฟฟินเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยคะแนนความชอบในคุณลักษณะต่างๆ ของเค้กมะม่วงจากการเติมพิวเร่มะม่วงที่ระดับแตกต่างกันในแบบเทอร์ โดยให้ผู้ทดสอบจำนวน 50 คน ประเมินด้วยวิธี 9-point hedonic scaling test

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	ปริมาณพิวเร่มะม่วง (กรัม) ต่อแบบเทอร์ 100 กรัม		
	25	40	55
สีน้ำตาลของหน้าเค้ก	7.0 $\pm$ 1.2 ^a	6.5 $\pm$ 1.4 ^a	5.7 $\pm$ 1.8 ^b
ความมันวาวของหน้าเค้ก ^{ns}	6.5 $\pm$ 1.3	6.1 $\pm$ 1.4	6.3 $\pm$ 1.5
ความแน่นเนื้อ	6.4 $\pm$ 1.8 ^a	6.4 $\pm$ 1.5 ^a	5.6 $\pm$ 1.8 ^b
กลิ่นรสมะม่วง ^{ns}	6.0 $\pm$ 1.4	5.8 $\pm$ 1.4	5.5 $\pm$ 1.7
ความนุ่ม	6.6 $\pm$ 1.6 ^{ab}	6.8 $\pm$ 1.3 ^a	6.0 $\pm$ 1.8 ^b
รสหวาน	6.7 $\pm$ 1.4 ^a	6.3 $\pm$ 1.6 ^{ab}	5.7 $\pm$ 2.0 ^b
ความชอบโดยรวม	6.6 $\pm$ 1.3 ^a	6.4 $\pm$ 1.3 ^a	5.6 $\pm$ 1.8 ^b

หมายเหตุ : ^{a-b} ตัวอักษรที่ต่างกันในแนวนอนแสดงถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{na} แสดงถึงค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

3.4 ผลการประเมินสมบัติเชิงประสาทสัมผัสของเค้กมะม่วง

จากตารางที่ 4 แสดงผลการประเมินความชอบเค้กมะม่วงที่ประเมินโดยผู้ทดสอบ 50 คน พบว่าเค้กมะม่วงทั้ง 3 สูตร มีคะแนนความชอบในคุณลักษณะด้านความมันวาวของหน้าเค้ก และกลิ่นรสมะม่วงไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีคะแนนความชอบส่วนใหญ่อยู่ระหว่างบอกไม่ได้ว่าชอบหรือไม่ชอบถึงชอบเล็กน้อย ส่วนคะแนนความชอบในคุณลักษณะด้านสีน้ำตาลของหน้าเค้ก ความแน่นเนื้อ ความนุ่ม รสหวาน และความชอบโดยรวมของเค้กมะม่วงทั้ง 3 สูตรแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเค้กมะม่วงสูตรที่ใส่พิวเร่มะม่วง 25 และ 40 กรัมต่อน้ำหนักส่วนผสม 100 กรัม มีคะแนนความชอบด้านคุณลักษณะดังกล่าวมากที่สุดและไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

4. สรุปผลการทดลอง

การใส่พิวเร่มะม่วงในปริมาณที่แตกต่างกันส่งผลต่อสมบัติเชิงกระแสวิทย์ของแบบเทอร์และสมบัติเชิงเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของเค้กมะม่วง เมื่อพิจารณาความหนืดของแบบเทอร์พบว่า แบบเทอร์ทุกสิ่งทดลองมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก และการใส่พิวเร่มะม่วงในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้แบบเทอร์มีความหนืดลดลงเนื่องจากปริมาณน้ำในส่วนผสมที่มากขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงเคมีและกายภาพของเค้กมะม่วงพบว่า การใส่พิวเร่มะม่วงในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณเส้นใยหยาบ ค่าความแข็ง แรงที่ใช้ในการเคี้ยว และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณไขมัน ปริมาตรจำเพาะ ค่าการยัดเกาะกันภายในอาหาร และค่าการกลับคืนตัวลดลง สำหรับสมบัติเชิงประสาทสัมผัสของเค้กมะม่วงพบว่า เค้กมะม่วงสูตรที่ใส่พิวเร่

มะม่วง 25 และ 40 กรัมต่อน้ำหนักส่วนผสม 100 กรัม เป็นสูตรที่มีความชอบโดยรวมมากที่สุดและไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$)

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท ลูตินันท์ ฟู้ด จำกัด ที่ให้การสนับสนุนพืชมะม่วง เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

1. Postharvest Technology Innovation Center, 2013, Mango-Production and Post-harvest Technology, Office of the Higher Education Commission, Chiang Mai. (In Thai)
2. Sogi, D.S., Siddiq, M., Greiby, I. and Dolan, K.D., 2013, "Total Phenolics, Antioxidant Activity, and Functional Properties of 'Tommy Atkins' Mango Peel and Kernel as Affected by Drying Methods," *Food Chemistry*, 141 (3), pp. 2649-2655.
3. Gundurao, A., Ramaswamy, H.S. and Ahmed, J., 2011, "Effect of Soluble Solids Concentration and Temperature on Thermo-physical and Rheological Properties of Mango Puree," *International Journal of Food Properties*, 14 (5), pp. 1018-1036.
4. Sehwat, R., Nema, P.K. and Kaur, B.P., 2018, "Quality Evaluation and Drying Characteristics of Mango Cubes Dried using Low-pressure Superheated Steam, Vacuum and Hot Air Drying Methods," *LWT*, 92, pp. 548-555.
5. Kermani, Z.J., Shpigelman, A., Houben, K., ten Geuzendam, B., Van Loey, A.M. and Hendrickx, M.E., 2015, "Study of Mango Endogenous Pectinases as a Tool to Engineer Mango Purée Consistency," *Food Chemistry*, 172, pp. 272-282.
6. Tansakul, A., Kantrong, H., Saengrayup, R. and Sura, P., 2012, "Thermophysical Properties of Papaya Puree," *International Journal of Food Properties*, 15, pp. 1086-1100.
7. Eke, J., Sanni, S.A. and Owuno, F., 2009, "Proximate and Sensory Properties of Banana Cakes," *Nigerian Food Journal*, 27 (2).
8. Akubor, P.I., Eze, E.C. and Popoola, C.A., 2017, "Effect of Substituting Fat with Pawpaw Puree on the Qualities of Cake," *FUW Journal of Agriculture and Life Sciences*, 1 (1), pp. 1-8.
9. Jammek, J. and Naivikul, O., 2011, Basic of Bakery Technology, Text and Journal Publication, Bangkok. (In Thai)
10. Cheong, G., 2001, "Quality Characteristics of Korean Wheat Flour and Imported Wheat Flour," *Korean Journal of Community Living Science*, 12, pp. 23-27.
11. Kim, J.H., Lee, H.J., Lee, H.S., Lim, E.J., Imm, J.Y. and Suh, H.J., 2012, "Physical and Sensory Characteristics of Fibre-enriched Sponge Cakes Made with Opuntia Humifusa," *LWT-Food Science and Technology*, 47 (2), pp. 478-484.
12. Asefa, B., Assefa, H., Girma, G., Tsehanew, H. and Shemsadin F., 2017, "The Physicochemical and Sensory Characteristic of Cookies Baked from Wheat Flour and Mango Pulp," *Food Science and Quality Management*, 65, pp. 16-21.
13. Badifu, G.I.O., Chima, C.E., Ajayi, Y.I. and Ogori, A.F., 2005, "Influence of Mango Mesocarp Flour Supplement to Micronutrient, Physical and Organoleptic Qualities of Wheat-based Bread," *Nigerian Food Journal*, 23 (1), pp. 59-68.
14. Chaiya, B. and Pongsawatmanit, R., 2011, "Quality of Batter and Sponge Cake Prepared from Wheat-tapioca Flour Blends," *Kasetsart Journal of National Science*, 45, pp. 305-311.
15. Thai Industrial Standards Institute, 1991, Standard for Wheat Flour : Bread Flour, TIS.374-2534. (In Thai)
16. Ronda, F., Gómez, M., Caballero, P.A., Oliete,

- B. and Blanco, C. A., 2009, "Improvement of Quality of Gluten-free Layer Cakes," *Food Science and Technology International*, 15 (2), pp. 193-202.
17. Huang, M. and Yang, H., 2019, "Eucheuma Powder as a Partial Flour Replacement and its Effect on the Properties of Sponge Cake," *LWT*, 110, pp. 262-268.
18. AOAC., 2000, Official Methods of Analysis of AOAC International, 17th ed., The Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, Maryland.
19. Noorlaila, A., Hasanah, H. N., Asmeda, R. and Yusoff, A., 2018, "The Effects of Xanthan Gum and Hydroxypropylmethylcellulose on Physical Properties of Sponge Cakes," *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*.
20. Chhabra, R.P., 2010, Non-Newtonian Fluids: An Introduction in Rheology of Complex Fluids, Springer, New York.
21. Baixauli, R., Sanz, T., Salvador, A. and Fiszman, S.M., 2003, "Effect of the Addition of Dextrin or Dried Egg on the Rheological and Textural Properties of Batters for Fried Foods," *Food Hydrocolloids*, 17 (3), pp. 305-310.
22. Gurung, B., Ojha, P. and Subba, D., 2016, "Effect of Mixing Pumpkin Puree with Wheat Flour on Physical, Nutritional and Sensory Characteristics of Biscuit," *Journal of Food Science and Technology Nepal*, 9, pp. 85-89.
23. Hernández-Sánchez, C., Luis, G., Moreno, I., Cameán, A., González, A.G., González-Weller, D. and Hardisson, A., 2012, "Differentiation of Mangoes (*Mangifera indica* L.) Conventional and Organically Cultivated According to their Mineral Content by using Support Vector Machines," *Talanta*, 97, pp. 325-330.
24. Vergara-Valencia, N., Granados-Pérez, E., Agama-Acevedo, E., Tovar, J., Ruales, J. and Bello-Pérez, L.A., 2007, "Fibre Concentrate from Mango Fruit: Characterization, Associated Antioxidant Capacity and Application as a Bakery Product Ingredient," *LWT-Food Science and Technology*, 40 (4), pp. 722-729.
25. Zamora-Gasga, V.M., Bello-Pérez, L.A., Ortiz-Basurto, R.I., Tovar, J. and Sáyago-Ayerdi, S.G., 2014, "Granola Bars Prepared with Agave Tequilana Ingredients: Chemical Composition and in Vitro Starch Hydrolysis," *LWT-Food Science and Technology*, 56 (2), pp. 309-314.
26. Jeddou, K.B., Bouaziz, F., Zouari-Ellouzi, S., Chaari, F., Ellouz-Chaabouni, S., Ellouz-Ghorbel, R. and Nouri-Ellouz, O., 2017, "Improvement of Texture and Sensory Properties of Cakes by Addition of Potato Peel Powder with High Level of Dietary Fiber and Protein," *Food Chemistry*, 217, pp. 668-677.
27. Ramírez-Maganda, J., Blancas-Benítez, F.J., Zamora-Gasga, V.M., García-Magaña, M.D.L., Bello-Pérez, L.A., Tovar, J. and Sáyago-Ayerdi, S.G., 2015, "Nutritional Properties and Phenolic Content of a Bakery Product Substituted with a Mango (*Mangifera indica*) 'Ataulfo' processing by-product," *Food Research International*, 73, pp. 117-123.
28. Ashwini, A., Jyotsna, R. and Indrani, D., 2009, "Effect of Hydrocolloids and Emulsifiers on the Rheological, Microstructural and Quality Characteristics of Eggless Cake," *Food Hydrocolloids*, 23 (3), pp. 700-707.
29. Erfanian, A. and Rasti, B., 2019, "Effects of Soy Milk on Physical, Rheological, Microbiological and Sensory Properties of Cake," *International Food Research Journal*, 26 (1), pp. 237-245.
30. Martínez-Cervera, S., de la Hera, E., Sanz, T., Gómez, M. and Salvador, A., 2013, "Effect of Nutriose on Rheological, Textural and Sensorial Characteristics of Spanish Muffins," *Food and Bioprocess Technology*, 6 (8), pp. 1990-1999.
31. Marina, A.M., Nurhanan, A.R., Rosli, W.W. and

- Ain, O.N., 2016, "Physical Properties and Microstructure of Butter Cake Added with Persea Americana Purée," *Sains Malaysiana*, 45 (7), pp. 1105-1111.
32. Hussien, H.A., 2016, "Using Vegetable Purée as a Fat Substitute in Cakes," *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 5, pp. 284-92.
33. Department of Health, 2001, Nutritive Values of Thai Foods, The War Veterans Organization of Thailand Under Royal Patronage of His Majesty the King, Bangkok. (In Thai)
34. Mala, S.K., Aathira, P., Anjali, E.K., Srinivasulu, K. and Sulochanamma, G., 2018, "Effect of Pumpkin Powder Incorporation on the Physico-chemical, Sensory and Nutritional Characteristics of Wheat Flour Muffins," *International Food Research Journal*, 25 (3), pp. 1081-1087.

สมบัติทางกล การนำความร้อน และโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตผสมแกนกัญชง

วันโชค เครือหงษ์¹ และ ศตวรรษ หฤหรรษ์พงศ์^{1*}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

* Corresponding Author: wat_gus@hotmail.com

¹ อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 4 กรกฎาคม 2562

แก้ไข : 20 มกราคม 2563

ตอบรับ : 17 กุมภาพันธ์ 2563

คำสำคัญ :

คอนกรีตกัญชง / สมบัติเชิงกล /
โครงสร้างทางจุลภาค

บทความนี้รายงานผลในแง่ของสมบัติทางกล การนำความร้อน และโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตผสมแกนกัญชง และศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้แกนกัญชงเพื่อแทนมวลรวมหยาบทั้งหมด ทั้งนี้ ใช้แกนกัญชงเป็นมวลรวมหยาบร่วมกับสารละลายอลูมิเนียมซิลิเกต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตคอนกรีตกัญชง โดยทำการศึกษาอัตราส่วนผสมแกนกัญชงที่เหมาะสมที่ร้อยละ 0.8 1.2 1.6 2.0 และ 2.4 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และใช้อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2 สารละลายอลูมิเนียมซิลิเกตต่อสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2 และส่วนสารลดน้ำพิเศษที่ร้อยละ 1 ของปูนซีเมนต์ จากผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตผสมแกนกัญชงที่อัตราส่วนน้อยที่สุด (ร้อยละ 0.8) มีการรับกำลังอัดและแรงดัดที่สูงกว่ากรณีการผสมแกนกัญชงที่อัตราส่วนที่มากขึ้น ตัวอย่างคอนกรีตซึ่งมีอัตราส่วนผสมของแกนกัญชงสูงสุด (ร้อยละ 2.4) มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำกว่าตัวอย่างที่ผสมแกนกัญชงที่อัตราส่วนผสมต่ำกว่า ในแง่ของโครงสร้างทางจุลภาค พบว่า คอนกรีตผสมแกนกัญชงมีลักษณะการกระจายตัวของโพรงอากาศที่ดี และอัตราส่วนผสมของแกนกัญชงที่สูงขึ้นส่งผลให้ความเป็นรูพรุนสูงขึ้น ซึ่งทำให้คอนกรีตมีความพรุนสูง และค่ากำลังอัดมีค่าที่ลดลง ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาคสอดคล้องกับผลค่ากำลังอัด

Mechanical Properties, Thermal Conductivity and Microstructure of Hemp Concretes

Wunchock Kroehong¹ and Sattawat Haruehansapong^{1*}

Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Uthenthawai Campus,
Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330

* Corresponding Author: wat_gus@hotmail.com

¹ Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: July 4, 2019

Revised: January 20, 2020

Accepted: February 17, 2020

Keywords:

Hemp Concrete /
Mechanical Properties /
Microstructure

This paper reports mechanical properties, thermal conductivity and microstructure of hemp concretes as well as the results on the potential of using hemp shiv as coarse aggregate in concrete. Hemp shiv was mineralized with aluminium sulfate and calcium hydroxide prior to being used as coarse aggregate to produce hemp concretes. The ratio of hemp was varied at 0.8%, 1.2%, 1.6%, 2.0% and 2.4% of the weight of cement, while the cement to sand ratio was fixed at 1:2. The ratio of $Al_2(SO_4)_3$ to $Ca(OH)_2$ was 1:2 and the amount of superplasticizer was fixed at 1% by weight of cement. The results illustrated that compressive strength and flexural strength of the sample with the lowest ratio of hemp (0.8%) were higher than those of the sample with the highest ratio of hemp. Thermal conductivity of concrete with the highest ratio of hemp (2.4%) was lower than that of the sample with the lowest ratio of hemp. Sample at the highest ratio of hemp exhibited higher porosity and more extensive pore distributions, resulting in a lower compressive strength. The results on microstructure and those on compressive strength corresponded with each other.

1. บทนำ

กัญชงเป็นไม้ล้มลุกที่มีลักษณะทางพฤกษศาสตร์คล้าย กัญชา แตกต่างกันคือ ต่อมาน้ำมันของกัญชงมีน้อยกว่า กัญชง จัดเป็นพืชซึ่งให้ประโยชน์หลักทางด้านสิ่งทอ ชาวเขาทางภาคเหนือมีการใช้เส้นใยจากลำต้นกัญชงมาตั้งแต่โบราณ โดยใช้เส้นใยจากลำต้นกัญชงที่ออกดอกใหม่ มีอายุระหว่าง 3-4 เดือน เนื่องจากเป็นช่วงที่เส้นใยมีความเหนียวที่สุด เเบาและเป็นสีขาว เหมาะสำหรับการใช้เป็นเส้นใยทอผ้า เส้นใยกัญชงเป็นเส้นใยที่มีคุณภาพสูงมีความยืดหยุ่น แข็งแรงและทนทานสูง สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์จากเส้นใยได้มากมาย ตั้งแต่เชือกจนถึงเส้นใยที่ละเอียด จนถึงอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนประกอบยานยนต์ ก็นำใยกัญชงไปใช้ประโยชน์ตั้งแต่ จักรยาน จนถึงเครื่องบิน โดยใช้เส้นใยกัญชงเป็นส่วนประกอบของพลาสติกเพื่อเพิ่มความเหนียว ทนต่อแรงกระแทก และมีความยืดหยุ่นสูง วัสดุที่ผลิตได้มีน้ำหนักเบา รวมทั้งยังสามารถใช้ทำฉนวนกันเสียง และฉนวนกันความร้อนได้ ส่วนแกนลำต้นของกัญชงจากกระบวนการที่นำเส้นใยไปใช้งาน แกนกัญชง หรือ แกนเฮมพ์ มีสีขาว น้ำหนักเบา ไม่มีฝุ่น เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากที่เหลือของการลอกเส้นใย ทำให้เหลือเศษทิ้งเป็นจำนวนมาก มีสมบัติในการดูดซับกลิ่น น้ำหรือน้ำมันได้ดี ซึ่งในต่างประเทศนิยมนำไปผลิตเป็นพลังงานชีวมวลในรูปแบบต่างๆ เช่น ถ่านไม้ ชาร์โคล เมทานอลและสกักเป็นแอลกอฮอล์ หรือนำไปผลิตเป็นวัสดุก่อสร้างเพื่อการตกแต่งภายในอาคาร เช่น ไม้อัด เฟอร์นิเจอร์ ฉนวนกันความร้อน บล็อกกัญชง ไฟเบอร์ กัญชงอีกทั้งการปลูกกัญชงมีข้อดีคือไม่ทำลายป่าและสิ่งแวดล้อม สามารถเก็บเกี่ยวได้ถึง 3-4 ครั้งต่อปี เห็นได้ว่าประโยชน์ของพืชกัญชงมีมาก นำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งจากใบ เส้นใย และลำต้น

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำกัญชงมาประยุกต์ใช้ในงานด้านก่อสร้างต่างๆ [1-3] โดยการนำเส้นใยกัญชงที่มีความเหนียวมาประยุกต์ใช้ในงานด้านคอนกรีตไปบ้างแล้วบางส่วน โดยในส่วนที่เหลือคือแกนลำต้นของกัญชงที่เหลือจากกระบวนการที่นำเส้นใยไปใช้งาน โดยการนำส่วนของแกนกัญชง ที่มีขนาดเล็กแบน และเรียวยาว ประมาณ 3-5 มิลลิเมตร ซึ่งใช้เป็นวัตถุชีวภาพผสมร่วมกับคอนกรีตโดยใช้เครื่องผสมคอนกรีตทั่วไป โดยจะผสมให้เข้ากันที่สภาวะชั้นเหลวพอเหมาะ สามารถนำไปปั่นอัดก้อนขึ้นรูปในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น รูปแบบสี่เหลี่ยมตัน

สี่เหลี่ยมกลวง อิฐบล็อกประสาน หรือผนังคอนกรีตกัญชงหล่อในที่ สามารถทนต่อการเผาไหม้ได้เป็นอย่างดี [4] หรือการนำมาทำเป็นแผ่นฉนวนหลังคา [5] อีกทั้งคอนกรีตกัญชง (Hemp concrete) ยังสามารถประยุกต์ใช้เป็น สำหรับงานหล่อโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกไม่มากหรือทำเป็นปูนฉาบผนังคอนกรีตกัญชง [6]

งานวิจัยของ Saksith และคณะ [7] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพแกนกัญชงด้วยอลูมิเนียมซัลเฟต $Al_2(SO_4)_3$ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ ก่อนนำมาใช้เป็นมวลรวมหยาบในส่วนผสมคอนกรีต แกนกัญชงส่งผลให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นมากกว่าคอนกรีตที่ไม่ผ่านการควบคุมคุณภาพถึง 4 เท่า คอนกรีตกัญชงที่ใช้แกนกัญชงผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วงระหว่าง 160 ถึง 180 กก/ซม² และค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 14.5-16.5 ในส่วนของงาน Billy และคณะ [8] ได้ศึกษาส่วนผสมและสมบัติของคอนกรีตผสมแกนกัญชง ส่วนผสมที่เหมาะสมในการเติมแกนต้นกัญชงชนิดบดย่อยเข้าไปในคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ได้มีค่าความต้านทานแรงอัด ค่ากำลังแรงดึง และค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นที่สูงกว่าคอนกรีตมาตรฐาน แต่ในมุมมองของการใช้ทดแทนเหล็กเส้นนั้น กัญชงยังคงมีจุดเสียในด้านของความยืดหยุ่น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงในการนำไปเป็นโครงสร้างหรือพื้นสำเร็จรูป ซึ่งหากจะนำไปใช้ทดแทนเหล็กเส้นได้นั้น ควรมีการปรับปรุงสมบัติในด้านโมดูลัสความยืดหยุ่นของการเสริมแรงด้วยกัญชงก่อนการนำไปใช้งาน [9] Etienne และคณะ [10] ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนผสมน้ำต่อสมบัติทางด้านการถ่ายเทความร้อนและการกักเก็บเสียงของคอนกรีตกัญชง พบว่าอัตราส่วนน้ำที่แปรเปลี่ยนของคอนกรีตกัญชงไม่ส่งผลต่อสมบัติการกักเก็บเสียง แต่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน โดยความสัมพันธ์ที่ได้เกือบจะเป็นช่วงเส้นตรง เมื่อมีการใช้อัตราส่วนผสมน้ำที่เพิ่มมากขึ้น Laurent และคณะ [11] ศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของแกนคอนกรีตกัญชงที่มีขนาดตั้งแต่ 3-9 มม. พบว่า ในการใช้แกนคอนกรีตกัญชงที่มีขนาดที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลทั้งทางด้านกำลังรับแรงอัด และแรงดัด ซึ่งการใช้แกนคอนกรีตกัญชงที่มีขนาดประมาณ 3 มม. ทำให้ความพรุนคอนกรีต และกระบวนการก่อตัวของคอนกรีตกัญชงมีค่าที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แกนคอนกรีตกัญชงที่มีขนาดประมาณ 9 มม.

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาทางผู้วิจัยได้เห็นถึงสมบัติที่ดีของกัญชง จึงได้นำวัสดุทางธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ผสมรวมกับคอนกรีต เป็นการนำวัสดุที่มีอยู่และเหลือใช้มาผสมเป็นวัสดุก่อสร้าง เพื่อที่จะช่วยชุมชนในพื้นที่ที่ห่างไกลทางภาคเหนือ ให้มีชีวิตความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น ทั้งยังช่วยส่งเสริมการปลูกพืช ช่วยสร้างรายได้ให้แก่ชุมชน รวมถึงลดปริมาณการตัดไม้ทำลายป่า ลดการเผาไหม้จากเศษวัสดุเหลือทิ้ง โดยผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปออกแบบผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ ในลักษณะของคอนกรีตเบา เช่น แผ่นฝ้าเพดาน ผนัง พื้นห้อง และยังเป็นการประยุกต์ใช้วัสดุทางธรรมชาติมาผสมรวมกับคอนกรีตเพื่อนำไปสร้างที่อยู่อาศัย ที่สำคัญยังเป็นการป้องกันรักษาสิ่งแวดล้อม ไม่ให้มีมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาทำลายจากเศษใบ กัญชงที่เหลือจากกระบวนการตีเพื่อเอาเส้นใย ที่จะส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ อีกทั้งยังเป็นทางเลือกใหม่ที่จะทำให้อุตสาหกรรมการผลิตวัสดุก่อสร้างมีทางเลือกให้มีคุณค่าและเป็นประโยชน์ในการใช้สอยในการก่อสร้างที่มากขึ้นอีกทางหนึ่ง ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแกนกัญชง สามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีตทางด้านก่อสร้างได้ อีกทั้งเป็นวัสดุฉนวนกันความร้อน ทนต่อการเก็บเสียง หรือ ใช้เป็นวัสดุที่ทนไฟ ได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังเป็นวัสดุธรรมชาติที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่เบาขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านคอนกรีตต่างๆ ได้ ในขณะที่ประเทศไทยการใช้แกนกัญชงมาประยุกต์ในงานคอนกรีตนั้นยังมีค่อนข้างน้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งประเด็นในเรื่องการพัฒนาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแกนกัญชงในการแทนที่ของมวลรวมหยาบ ต่อสมบัติทั้งทางด้านเชิงกล และการนำความร้อน รวมทั้งศึกษาในเรื่องของโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตผสมแกนกัญชง

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- ปูนซีเมนต์ เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (Ordinary Portland Cement Type 1 หรือ OPC)
- แกนกัญชงจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูงจากทางภาคเหนือของประเทศไทย ใช้แทนเป็นมวลรวมหยาบ (หิน) ทั้งหมด และมีค่าความถ่วงจำเพาะ และความหนาแน่นอยู่ที่ 0.6

และ 120 กก/ตร.ม. โดยใช้ที่ขนาดค้ำตะแกรงเบอร์ 4 และ เบอร์ 8

- ทราายน้ที่ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ตามมาตรฐาน ASTM C33

- สารเคมีที่ใช้ อลูมิเนียมซัลเฟต ($Al_2(SO_4)_3$) กับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่อัตราส่วน 1:2 และ สารลดน้ำซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์

2.2 ขั้นตอนการผสม

1. เตรียมส่วนผสมและคัดเลือกแกนกัญชง ขนาดของแกนกัญชงจะมีขนาดคละกั้นโดยการแยกขนาดแกนกัญชง โดยต้องนำมาร่อนใช้ส่วนที่ค้ำในตะแกรงขนาดเบอร์ 4 และ เบอร์ 8 ดังรูปที่ 1 โดยใช้ส่วนที่ค้ำตะแกรงขนาดเบอร์ 4 ที่ ร้อยละ 35 และ ที่ค้ำตะแกรงขนาดเบอร์ 8 ที่ร้อยละ 65 หลักการเตรียมส่วนผสมคล้ายคลึงกับงานวิจัย Saksith และ คณะ [7]

2. ชั่งน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดตามอัตราส่วนผสม ดังตารางที่ 1 โดยใช้แกนกัญชงแทนมวลรวมหยาบทั้งหมดที่ ร้อยละ 0.8 1.2 1.6 2.0 และ 2.4 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ โดยแสดงเป็นสัญลักษณ์ดังนี้ HC08 HC12 HC16 HC20 และ HC24 ปูนซีเมนต์ต่อทรายใช้อัตราส่วนผสม 1:2 ส่วนสารลดน้ำ พิเศษใช้ที่อัตราส่วนร้อยละ 1 ต่อปูนซีเมนต์ ทุกอัตราส่วนผสม ตัวอย่างทั้งหมด

3. นำแกนกัญชงที่ได้เตรียมไว้ทั้ง 2 ขนาดนำมาผสมรวมกับอลูมิเนียมซัลเฟต $Al_2(SO_4)_3$ เป็นเวลา 3 นาที แล้วปล่อยทิ้งไว้ 15 นาที ต่อจากนั้นใส่สารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $Ca(OH)_2$ แล้วผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาอีก 90 วินาที ก่อนที่จะนำไปผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำ ตามลำดับ

4. เมื่อทำการผสมเสร็จแล้วเทลงแบบหล่อขนาด 5x5x5 ซม. สำหรับการทดสอบกำลังอัด ขนาด 35x10x2 ซม. สำหรับการทดสอบกำลังดัด และขนาด 10x10x2 ซม. สำหรับการทดสอบการนำความร้อน แล้วนำไปบ่มแห้ง โดยการหุ้มด้วยพลาสติก เป็นระยะเวลา 7 วัน และ 28 วัน แล้วนำมาทดสอบแรงอัด แรงดัด การนำความร้อน และโครงสร้างทางด้านจุลภาค



รูปที่ 1 แกนกัญชง ที่ค้ำในตะแกรงขนาดเบอร์ 4 กับ 8

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของตัวอย่างทั้งหมด

ตัวอย่าง	ปูน (กรัม)	ทราย (กรัม)	กัญชง (กรัม)	น้ำ (มล.)	$Al_2(SO_4)_3$ (มล.)	$CO(OH)_2$ (มล.)
HC08	1125	2250	9	135	19	38
HC12	1125	2250	13.5	203	28	57
HC16	1125	2250	18	270	38	76
HC20	1125	2250	22.5	338	47	95
HC24	1125	2250	27	405	57	113

3. ผลการวิจัย

3.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกัญชง

ผลการทดสอบการรับกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตกัญชง ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร โดยทำการทดสอบตัวอย่างที่เวลา 7 วันและ 28 วัน นำมาเฉลี่ยจาก 5 ก้อนตัวอย่าง คอนกรีตกัญชงที่อายุตัวอย่าง 7 และ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 2

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการรับแรงอัดของตัวอย่างที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน พบว่าสูตร HC08 มีอัตราส่วนการผสมของคอนกรีตผสมแกนกัญชงน้อย มีการรับกำลังอัดได้สูงกว่าตัวอย่าง

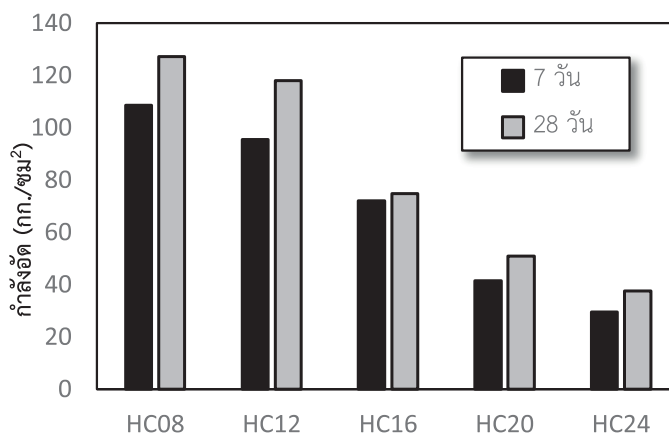
HC24 ซึ่งตัวอย่าง HC24 มีอัตราส่วนของแกนกัญชงมากกว่า HC08 ในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกันและกำลังอัดของคอนกรีตบ่มที่ อายุ 28 วัน มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่บ่มระยะเวลา 7 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการบ่ม มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต สอดคล้องกับงานของ Laurent และ Etienne [11] จากส่วนผสมตัวอย่าง HC20 และ HC24 ซึ่งผสมแกนกัญชงที่มีปริมาณมากกว่าตัวอย่างอื่น กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมแกนกัญชงเพียงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตาม เฉพาะส่วนผสมตัวอย่าง HC24 จะมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าส่วนผสมตัวอย่างอื่น

อย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการใช้อัตราส่วนผสมแกนกัญชงที่มากเกินไป ส่งผลให้คอนกรีตมีความเป็นพรุนสูง ขึ้นอยู่กับการเลือกสมบัติและวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ในงานนั้น

ส่วนการนำไปใช้งานตัวอย่างที่ HC24 นั้นสมบัติของตัวอย่างจะมีน้ำหนักเบาเหมาะกับการใช้ในงานกักเก็บเสียงได้เป็นอย่างดี เช่น ผนังคอนกรีต หรือ คอนกรีตบล็อก [10]

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงอัดของคอนกรีตกัญชง

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม ²)	
	7 วัน	28 วัน
HC08	108.52	127.24
HC12	95.54	117.98
HC16	72.11	74.85
HC20	41.52	50.82
HC24	29.51	37.66



รูปที่ 2 กราฟแสดงการรับกำลังอัดของ

3.2 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตกัญชง

การทดสอบกำลังดัด ได้หล่อตัวอย่างที่มีขนาดแผ่น 35x10x2 เซนติเมตร นำมาเฉลี่ยจาก 5 ชิ้นตัวอย่าง ที่อายุ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 3

รูปที่ 3 แสดงกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตกัญชงพบว่ากำลังรับแรงดัดลดลงตามปริมาณการใช้แกนกัญชงในส่วนผสมที่มากขึ้น ดังตัวอย่างที่ HC08 สามารถรับกำลังดัดได้มาก อีกทั้งยังสามารถรับแรงกดช่วงกึ่งกลางคานได้ดีเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่

ผสมแกนกัญชงในปริมาณมากดังตัวอย่าง HC24 พบว่าการรับแรงดัดจะรับแรงได้น้อยกว่าตัวอย่างอื่นๆอย่างชัดเจน เนื่องจากการใช้แกนกัญชงในปริมาณมาก ส่งผลให้คอนกรีตมีความหนาแน่นต่ำแต่มีความเป็นพรุนสูง ทำให้การรับแรงดัดมีค่าที่ต่ำคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Vincent และ คณะ [6] โดยผลการทดสอบที่ได้จะมีความสอดคล้องกับผลกำลังอัดของคอนกรีตกัญชง

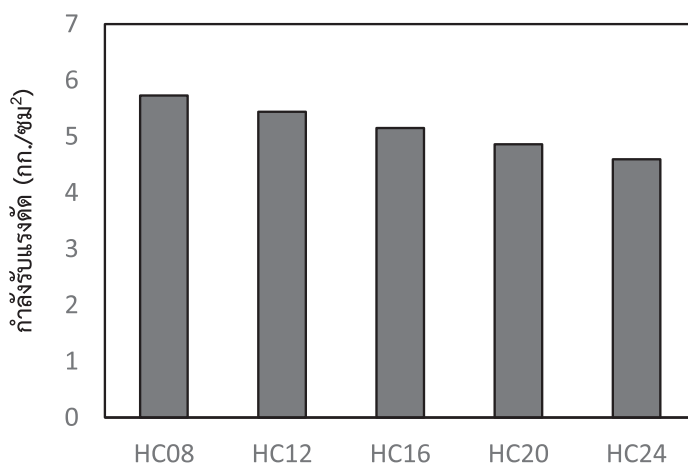
รูปที่ 4 แสดงการโก่งตัวของคอนกรีตกัญชง จากผลการ

ทดสอบพบว่า การโก่งตัวของคอนกรีตกัญชงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณแกนกัญชงที่ใช้ ดังตัวอย่าง HC24 ที่มีการใช้แกนกัญชงที่มากที่สุด พบว่าคอนกรีตกัญชงมีการโก่งตัวที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ เนื่องจากแกนกัญชงเป็นวัสดุที่มีความเหนียว และมีความยืดหยุ่น ส่งผลให้คอนกรีตมีความยืดหยุ่นสามารถทนทานต่อแรงดัดได้เป็นอย่างดี [9] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ

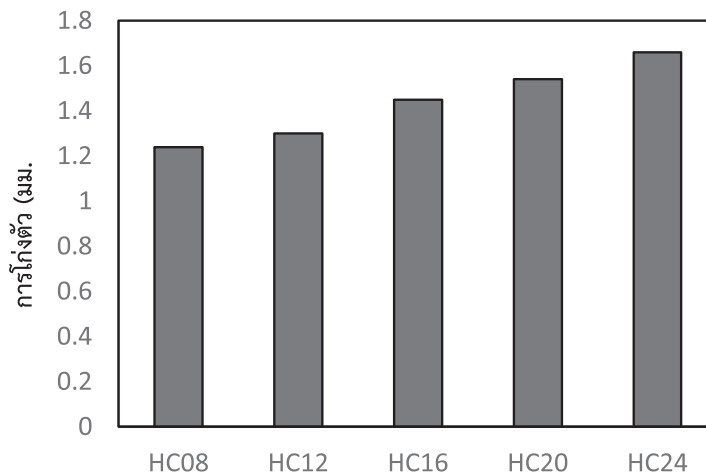
สัดส่วนการผสม รวมถึงขนาดคละและการเชื่อมประสานของคอนกรีตกับแกนกัญชงที่เหมาะสม ซึ่งจะมีผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางด้านกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามคอนกรีตโดยปกติทั่วไปที่ไม่มีการเสริมวัสดุเส้นใยสังเคราะห์จะพบว่ามีประวัติแบบทันทีทันใด เช่นเดียวกับคอนกรีตกัญชง

ตารางที่ 3 ผลทดสอบการรับกำลังแรงดัด

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงดัด (กก./ซม ²)	การโก่งตัว (มม.)
HC08	5.73	1.24
HC12	5.44	1.30
HC16	5.15	1.45
HC20	4.86	1.54
HC24	4.60	1.66



รูปที่ 3 กราฟแสดงกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตกัญชงที่อายุตัวอย่าง 28 วัน



รูปที่ 4 กราฟแสดงการโก่งตัวของคอนกรีตถักยุง

3.3 สมบัติในการนำความร้อนของคอนกรีตถักยุง

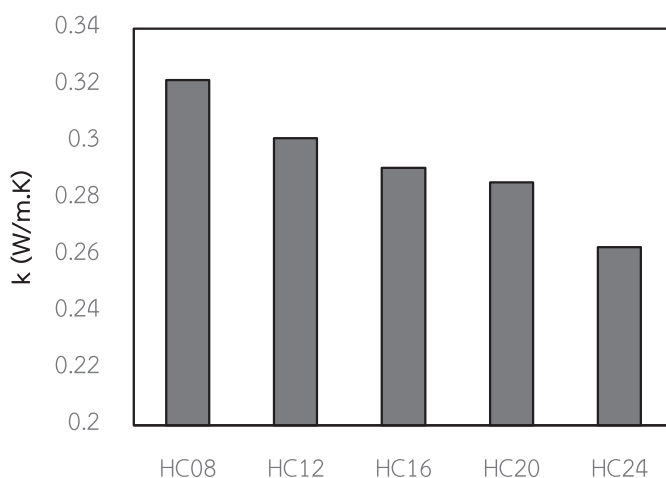
การทดสอบหาค่าสภาพนำความร้อนและค่าความต้านทานความร้อนของฉนวนกันความร้อนแบบ Heat flow meter ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C518 [12] โดยใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อน คือพลังงานความร้อนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตถักยุงที่อายุ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 4

รูปที่ 5 แสดงกราฟการนำความร้อนของคอนกรีตถักยุง พบว่าตัวอย่าง HC24 ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของแกนถักยุงที่มากที่สุดนั้น มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ที่ต่ำ การนำพา

ความร้อนต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ จะมีค่าการนำความร้อนที่ 0.2628 W/m.K พบว่าค่าการนำความร้อนนั้น เมื่อนำแกนถักยุงมาผสมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการนำความร้อนลดลง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตถักยุง โดยเฉพาะค่าความหนาแน่นที่แปรผันตรงกับค่า โดยผลการทดสอบที่ได้มีความคล้ายคลึงกับงานของ Pongsak และคณะ [13] จากผลการทดสอบของคอนกรีตถักยุงทั้ง 5 ตัวอย่างนั้น พบว่ามีผลใกล้เคียงกับค่าของไม้อัดซีเมนต์ (อ้างอิง: กระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1999 พ.ศ.2537) ซึ่งสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี ดังนั้นคอนกรีตถักยุงสามารถนำมาใช้งานเป็นฉนวนกันความร้อนได้

ตารางที่ 4 ผลทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตถักยุง

ตัวอย่าง	ความหนา (ซม.)	ค่า k (W/m.K)
HC08	2.21	0.3218 ± 0.004
HC12	2.21	0.3014 ± 0.004
HC16	2.18	0.2908 ± 0.012
HC20	2.67	0.2857 ± 0.002
HC24	2.57	0.2628 ± 0.016



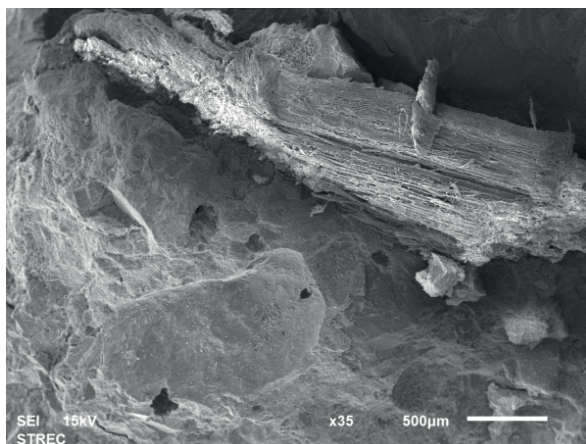
รูปที่ 5 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตกัญชงที่อายุ 28 วัน

3.4 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตกัญชง

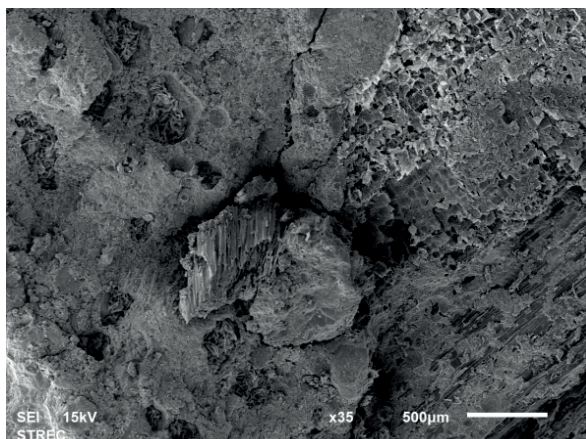
การทดสอบทางด้านโครงสร้างจุลภาค โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เตรียมชิ้นตัวอย่างของคอนกรีตกัญชงแต่ละตัวอย่างที่อายุ 28 วัน นำมาตัดชิ้นส่วนให้มีขนาดประมาณ 1-2 เซนติเมตร แล้วนำไปเข้าเครื่องเคลือบทองก่อนเพื่อให้เกิดการเหนียวนำไฟฟ้า จากนั้นจึงนำไปทดสอบเข้าเครื่อง SEM โดยใช้กำลังอัตราขยายที่ 35 เท่า

จากรูปภาพที่ 6-10 เป็นภาพถ่ายจากเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 35 เท่า ของคอนกรีตกัญชง ตัวอย่าง HC08 HC12 HC16 HC20 และ HC24 ตามลำดับ จากภาพถ่ายพบว่าโพรงในคอนกรีตกัญชงเป็นโพรงอากาศมีรูปร่างทรงกลมสีดำตามภาพ ซึ่งเป็นโพรงแบบปิด โดยระหว่างโพรงอากาศจะเป็นเนื้อซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กที่มีการกระจายตัวอย่างต่อเนื่อง โดยมีผลต่อการซึม

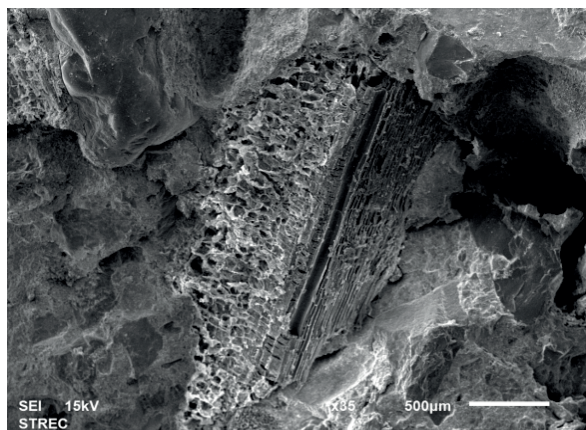
ผ่านของน้ำ เมื่อพิจารณาจากรูปภาพที่ 6-10 ของคอนกรีตกัญชงตามลำดับ พบว่าโครงสร้างโพรงของคอนกรีตกัญชงมีลักษณะการกระจายตัวของโพรงอากาศที่ดี ดังรูปภาพที่ 10 ตัวอย่าง HC24 มีความพรุนมากกว่าตัวอย่างอื่นๆ เนื่องจากมีการใช้แกนกัญชงที่มีสัดส่วนมากกว่าตัวอย่างอื่นๆ ทำให้เกิดความพรุนที่มากกว่า ส่งผลให้คอนกรีตมีความเป็นรูพรุนสูงทำให้ค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าที่ลดลง [14] โดยจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Saksith และคณะ [7] ที่พบว่าแกนกัญชงนั้นมีขึ้นลักษณะตัวอย่างโครงสร้างมีความพรุนสูง และจากงานวิจัยของ Seng และคณะ [8] พบว่าเมื่อมีการใช้แกนกัญชงในปริมาณที่มากก็ส่งผลให้ชิ้นตัวอย่างมีความเป็นรูพรุนที่สูง อัตราความพรุนจะแปรผันตามปริมาณการใช้ของแกนกัญชง ซึ่งผลการทดสอบทางด้านโครงสร้างจุลภาคที่ได้ พบว่าสอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกัญชง



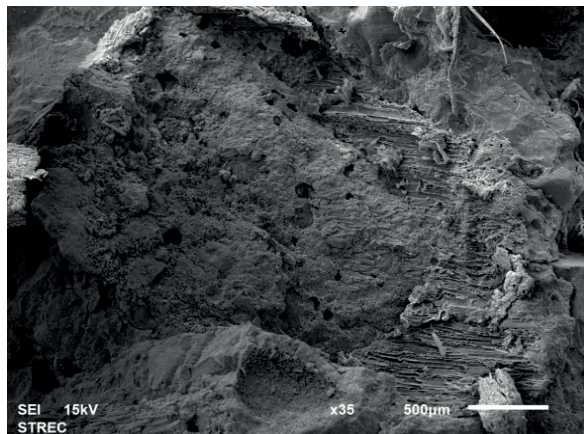
รูปที่ 6 ตัวอย่าง HC08 ที่กำลังขยาย 35 เท่า



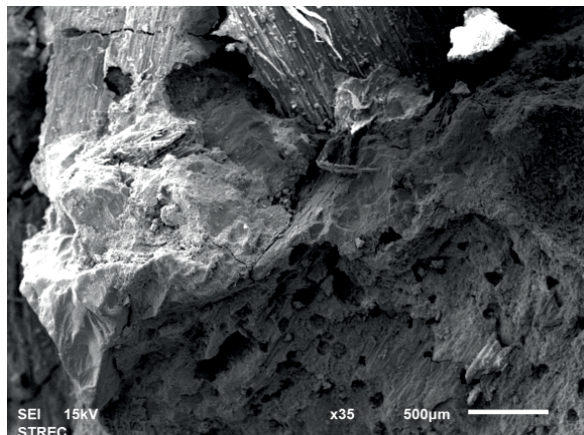
รูปที่ 7 ตัวอย่าง HC12 ที่กำลังขยาย 35 เท่า



รูปที่ 8 ตัวอย่าง HC16 ที่กำลังขยาย 35 เท่า



รูปที่ 9 ตัวอย่าง HC20 ที่กำลังขยาย 35 เท่า



รูปที่ 10 ตัวอย่าง HC24 ที่กำลังขยาย 35 เท่า

4. สรุปผลการทดลอง

1. กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกัญชงที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน พบว่าระยะเวลาการบ่ม มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยอัตราส่วนการผสมของคอนกรีตที่ผสมแกนกัญชงที่น้อยนั้น (HC08) มีการรับกำลังอัดที่สูงกว่าอัตราส่วนผสมของแกนกัญชงที่มากกว่า (HC24) ทั้งที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน

2. กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตกัญชง พบว่าแนวโน้มมีความสอดคล้องกับผลกำลังอัด เห็นได้ว่าตัวอย่าง HC08 สามารถรับแรงดัดได้มากที่สุดแต่มีการโก่งตัวที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ ซึ่งตัวอย่าง HC08 มีความเหมาะสมใช้งานในการรับแรงดัด ส่วนตัวอย่าง HC24 ที่มีการโก่งตัวที่มากนั้นเหมาะสม

ใช้กับงานที่ทนรับแรงได้เป็นอย่างดี

3. การนำความร้อนของตัวอย่างคอนกรีตกัญชงทั้ง 5 ตัวอย่าง มีผลใกล้เคียงกับค่าของไม้อัดซีเมนต์ โดยตัวอย่าง HC24 ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของแกนกัญชงที่มากที่สุดนั้น จะมีการนำพาความร้อนที่ต่ำมีความเป็นฉนวนที่สูง อีกทั้งยังมีความหนาแน่นที่สูง ซึ่งสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานเป็นฉนวนกันความร้อนแทนไม้อัดซีเมนต์ได้

4. การทดสอบทางด้านโครงสร้างจุลภาค พบว่าการเกิดช่องว่างระหว่างแกนคอนกรีตกัญชง เป็นผลมาจากแกนกัญชงที่มีความเหลี่ยมคม และมีขนาดหลากหลาย เป็นส่วนที่ทำให้เกิดโพรง โดยคอนกรีตกัญชงจะมีความพรุนและช่องว่างที่อยู่

ภายในตัวอย่างทดสอบจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการใช้แกน
กัญชงในสัดส่วนผสมของคอนกรีตกัญชง เช่น ตัวอย่าง HC24
มีความพรุนมากกว่าตัวอย่างอื่นๆ ส่งผลให้คอนกรีตมีความ
พรุนสูงทำให้ค่ากำลังอัดที่ได้จะมีค่าที่ลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลตะวันออก คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรม-
ศาสตร์ วิทยาเขตอุเทนถวาย สาขาวิศวกรรมโยธา ที่อนุเคราะห์
วัสดุและเครื่องมือทดสอบในการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

1. Netinger Grubeša, I., Marković, B., Gojević, A. and Brdarić, J., 2018, "Effect of Hemp Fibers on Fire Resistance of Concrete," *Construction and Building Materials*, 184, pp. 473-484.
2. Çomak, B., Bideci, A. and Salli Bideci, Ö., 2018, "Effects of Hemp Fibers on Characteristics of Cement Based Mortar," *Construction and Building Materials*, 169, pp. 794-799.
3. Ramadan, R., Saad, G., Awwad, E., Khatib, H. and Mabsout, M., 2017, "Short-Term Durability of Hemp Fibers," *Procedia Engineering*, 200, pp. 120-127.
4. Wadi, H., Amziane, S., Toussaint, E. and Taazount, M., 2019, "Lateral Load-Carrying Capacity of Hemp Concrete as a Natural Infill Material in Timber Frame Walls," *Engineering Structures*, 180, pp. 264-273.
5. Seng, B., Magniont, C. and Lorente, S., 2019, "Characterization of a Precast Hemp Concrete Block Part II: Hygric Properties," *Journal of Building Engineering*, 24, pp. 546-568.
6. Dubois, V., Wirquin, E., Flament, C. and Sloma, P., 2016, "Fresh and Hardened State Properties of Hemp Concrete Made up of a Large Proportion of Quarry Fines for the Production of Blocks," *Construction and Building Materials*, 102, pp. 84-93.
7. Pantawee, S., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C. and Chindaprasirt, P., 2017, "Utilization of Hemp Concrete Using Hemp Shiv as Coarse Aggregate with Aluminium Sulfate $[Al_2(SO_4)_3]$ and Hydrated Lime $[Ca(OH)_2]$ Treatment," *Construction and Building Materials*, 156, pp. 435-442.
8. Seng, B., Magniont, C. and Lorente, S., 2019, "Characterization of a Precast Hemp Concrete. Part I: Physical and thermal properties," *Journal of Building Engineering*, 24, pp. 346-356.
9. Niyigena, C., Amziane, S. and Chateauneuf, A., 2019, "Assessing the Impact of Calculation Methods on the Variability of Young's Modulus for Hemp Concrete Material," *Construction and Building Materials*, 198, pp. 332-344.
10. Gourlay, E., Glé, P., Marceau, S., Foy, C. and Moscardelli, S., 2017, "Effect of Water Content on the Acoustical and Thermal Properties of Hemp Concretes," *Construction and Building Materials*, 139, pp. 513-523.
11. Arnaud, L. and Gourlay, E., 2012, "Experimental Study of Parameters Influencing Mechanical Properties of Hemp Concretes," *Construction and Building Materials*, 28 (1), pp. 50-56.
12. American Society for Testing and Material, 2012, "ASTM C518 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus," *Annual Book of ASTM Standard*, Philadelphia.
13. Jittabut, P., 2019, "The Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Concrete Block from Agricultural Wastes," *The Journal of KMUTNB*, 29 (2), pp. 342-351.
14. Sanawung, W., Tangchirapat, W. and Jaturapitakkul, C., 2018, "Strength, Abrasion Resistance, and Chloride Ion Penetration of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash," *KMUTT Research and Development Journal*, 41 (1), pp. 83-96.

แนวทางการประเมินหน่วยงานและบุคลากรวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการ

สมชาติ โสภณธนฤทธิ์¹ และ สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา^{2*}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

* Corresponding Author: sakamon.dev@kmutt.ac.th

¹ ศาสตราจารย์ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

² ศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 2 มีนาคม 2563

ตอบรับ : 20 มีนาคม 2563

คำสำคัญ :

การประเมินเชิงปริมาณ /
ความเป็นเลิศทางวิชาการ /
ดัชนีชี้วัด / บุคลากรวิจัย /
ผลงานที่มีการนำไปใช้ประโยชน์ /
หน่วยงานวิจัย

ปัจจุบัน การประเมินหน่วยงานและบุคลากรวิจัยใช้เกณฑ์ที่หลากหลาย นอกจากนี้ ดัชนีชี้วัดบางตัวยังมีลักษณะเป็นเชิงคุณภาพค่อนข้างมาก จึงควรมีแนวทางการประเมินที่ใช้ดัชนีชี้วัดเชิงปริมาณที่วัดได้ง่ายและชัดเจน บทความนี้นำเสนอแนวทางการประเมินหน่วยงานและบุคลากรวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการ โดยในส่วนของ การประเมินหน่วยงานวิจัย (โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หน่วยงานที่สังกัดมหาวิทยาลัย) อาจใช้ดัชนีชี้วัดดังต่อไปนี้ (1) จำนวนบทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารที่ปรากฏในฐานข้อมูล Scopus (หรือฐานข้อมูล TCI ในกรณีของหน่วยงานวิจัยด้านมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์) และจำนวนสิทธิบัตร (2) คุณภาพบทความวิจัย ซึ่งพิจารณาจากจำนวนครั้งการอ้างอิง ซึ่งสืบค้นจากฐานข้อมูล Scopus (3) งบประมาณจากแหล่งทุนภายนอก (4) จำนวนบัณฑิตระดับปริญญาโทและปริญญาเอกที่สำเร็จการศึกษา (5) ผลงานที่ใช้ประโยชน์ได้จริง สำหรับการประเมินบุคลากรวิจัย อาจใช้ดัชนีชี้วัดดังต่อไปนี้ (1) จำนวนบทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารที่ปรากฏในฐานข้อมูล Scopus โดยอาจพิจารณาทั้งจากจำนวนบทความรวม จำนวนบทความในวารสารที่อยู่ในควอร์ไทล์ที่ 1 และ 2 จำนวนบทความที่ผู้รับการประเมินเป็นผู้เขียนคนแรก และ/หรือเป็นผู้เขียนที่รับผิดชอบบทความ (2) จำนวนครั้งการอ้างอิง ซึ่งสืบค้นจากฐานข้อมูล Scopus (3) *h-index* ซึ่งคำนวณจากข้อมูลในฐานข้อมูล Scopus (4) จำนวนทุนวิจัย ทั้งจำนวนทุนรวม และเฉพาะที่เป็นหัวหน้าโครงการ (5) จำนวนผลงานที่มีการนำไปใช้ประโยชน์และผลกระทบแนวทางที่นำเสนอนี้สอดคล้องในบางส่วนกับเกณฑ์การประเมินมหาวิทยาลัยโลกของ QS และ Times Higher Education World University Rankings สามารถนำไปใช้ปฏิบัติได้อย่างรวดเร็ว และน่าจะเป็นที่ยอมรับ

A Guideline for Assessment of Research Units and Personnel to Achieve Academic Excellence

Somchart Soponronnarit¹ and Sakamon Devahastin^{2*}

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thung Khru, Bangkok 10140

* Corresponding Author: sakamon.dev@kmutt.ac.th

¹ Professor, School of Energy, Environment and Materials.

² Professor, Faculty of Engineering.

Article Info

Article History:

Received: March 2, 2020

Accepted: March 20, 2020

Keywords:

Academic Excellence /
Implemented Results /
Indicators /
Quantitative Assessment /
Research Personnel /
Research Unit

Abstract

Assessment of research units and personnel has widely been conducted using various different criteria. Since many of the utilized indicators are much qualitative in nature, a guideline that involves the use of clear and easily assessable quantitative indicators are desired. This article presents a guideline for assessment of research units and personnel to achieve academic excellence. In the case of research units (especially those affiliated with universities), the following indicators may be used: (1) number of publications in Scopus-indexed journals (or TCI-indexed journals in the cases of humanity- and social science-based research units) and number of granted patents; (2) quality of research publications as determined by the number of Scopus-based citations; (3) extramural grants; (4) number of master's and doctoral graduates and (5) results that have been practically implemented. In the case of research personnel, the following indicators may be used: (1) number of publications in Scopus-indexed journal – both the total number of publications and number of publications in first- and second-quartile journals may be considered; (2) number of Scopus-based citations; (3) *h*-index as calculated from Scopus-based citations; (4) number of extramural grants, both the total number of grants and number of grants served as principal investigators; (5) number of outputs that have been practically implemented along with their impact. The proposed guideline is partially in accordance with the criteria used by QS and Times Higher Education World University Rankings, so it should be readily implementable and well accepted.

บทนำ

การประเมินหน่วยงานและบุคลากรวิจัยเป็นกิจกรรมที่มีความสำคัญ และมีการดำเนินการอย่างต่อเนื่อง ทั้งโดยหน่วยงานให้ทุน หน่วยงานที่มีหน้าที่ (หรือให้ความสนใจ) ในการประเมินมหาวิทยาลัยทั้งในระดับชาติและนานาชาติ ตลอดจนหน่วยงานหรือองค์กรที่มอบรางวัลแก่หน่วยงานและ/หรือบุคลากรวิจัย นอกจากหน่วยงานหรือองค์กรที่มีพันธกิจต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว มหาวิทยาลัยหลายแห่งในประเทศไทย (และในต่างประเทศ) ก็ยังให้ความสำคัญแก่การประเมินหน่วยงานและบุคลากรวิจัยของตนด้วยเหตุผลต่างๆ อาทิเช่น ต้องการทราบศักยภาพของหน่วยงานภายในเพื่อประโยชน์ในแง่ของการสนับสนุนงบประมาณ เพื่อเสริมสร้างความเข้มแข็งของหน่วยงานในมิติต่างๆ เพื่อให้สามารถแข่งขันขอรับการสนับสนุนทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก ตลอดจนเพื่อเชิดชูบุคลากรที่มีความสามารถสูงของมหาวิทยาลัย เพื่อให้เป็นตัวอย่างการทำงานแก่บุคลากรอื่นในองค์กร

แม้การประเมินหน่วยงานและบุคลากรวิจัยจะเป็นกิจกรรมที่มีความสำคัญยิ่ง แต่การประเมินดังกล่าวในปัจจุบันยังคงใช้

เกณฑ์ที่หลากหลาย นอกจากนี้ ดัชนีชี้วัดบางตัวที่ใช้ก็ยังเป็นดัชนีเชิงคุณภาพค่อนข้างมาก จึงอาจทำให้ผลลัพธ์ของการประเมินที่ได้ไม่น่าเชื่อถือ นำไปสู่คำถามหรือข้อร้องเรียนต่างๆ ได้ ด้วยเหตุนี้ จึงควรมีแนวทางการประเมินที่ใช้ดัชนีชี้วัดเชิงปริมาณที่วัดได้ง่ายและชัดเจนในการดำเนินกิจกรรมที่สำคัญยิ่งขึ้น

บทความนี้นำเสนอแนวทางการประเมินหน่วยงานและบุคลากรวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการ โดยนำเสนอดัชนีชี้วัด 2 ชุดที่สามารถนำไปใช้ในการประเมินหน่วยงานและใช้ในการประเมินบุคลากรวิจัย ดัชนีชี้วัดดังกล่าวได้จากประสบการณ์ของผู้เขียนที่ได้รับหน้าที่ประเมินหน่วยงานวิจัย (ทางด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพ/เทคโนโลยี และมนุษยศาสตร์/สังคมศาสตร์) ของมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่ง และได้ระดมสมองกับผู้บริหารและกรรมการประเมินที่มหาวิทยาลัยแต่งตั้ง ทั้งนี้ ได้ทดสอบดัชนีชี้วัดทั้ง 2 ชุดกับข้อมูลด้านต่างๆ ในช่วง พ.ศ. 2558 – 2560

เกณฑ์การประเมินหน่วยงานวิจัย

ในการประเมินหน่วยงานวิจัย กำหนดเกณฑ์การประเมินตามดัชนีชี้วัด 5 ด้าน ดังต่อไปนี้ (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 เกณฑ์การประเมินหน่วยงานวิจัยที่นำเสนอ

ดัชนีชี้วัด	รายละเอียด (นับข้อมูล พ.ศ. 2558 – 2560)	กลุ่ม วิทยาศาสตร์ สุขภาพ/ เทคโนโลยี	กลุ่ม มนุษยศาสตร์ และ สังคมศาสตร์
1. บทความวิจัย ในวารสารและ สิทธิบัตร	การตีพิมพ์ระดับนานาชาติ - บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารที่ปรากฏในฐานข้อมูล Scopus (ไม่นับบทความในรายงานหลังการประชุมทางวิชาการ (proceedings) และสิ่งตีพิมพ์ที่รวบรวมบทความจากการประชุมที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับวารสาร) ที่มีการอ้างอิงชื่อหน่วยงานวิจัยใน affiliation หรือ acknowledgements	✓	✓
	การตีพิมพ์ระดับชาติ - บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารที่ปรากฏอยู่ในฐานข้อมูล TCI (กลุ่ม 1 และกลุ่ม 2) ที่มีการอ้างอิงชื่อหน่วยงานวิจัยใน affiliation หรือ acknowledgements	-	✓
	- รายงานบทความที่ตีพิมพ์ในหนังสือที่มีบรรณาธิการและเป็นที่ยอมรับในวงวิชาการ	-	✓
	- สิทธิบัตรที่มีเลขที่คำขอ ในช่วงปีปฏิทินที่ประเมิน	✓	✓

ตารางที่ 1 เกณฑ์การประเมินหน่วยงานวิจัยที่นำเสนอ (ต่อ)

ดัชนีชี้วัด	รายละเอียด (นับข้อมูล พ.ศ. 2558 – 2560)	กลุ่ม วิทยาศาสตร์ สุขภาพ/ เทคโนโลยี	กลุ่ม มนุษยศาสตร์ และ สังคมศาสตร์
2. จำนวนการ อ้างอิง	- สืบค้นข้อมูลจากฐาน Scopus โดยใช้ชื่อหน่วยงานวิจัย	✓	✓
3. งบประมาณ จากแหล่งทุน ภายนอก	- จำนวนเงินจากโครงการวิจัยและโครงการบริการวิชาการที่มี ลักษณะเข้าข่ายงานวิจัย ที่นำเข้ามาหาวิทยาลัยในช่วงปีที่ประเมิน โดยนับตามปีปฏิทิน และนับตามโครงการที่สมาชิกหน่วยงาน วิจัยนั้นเป็นหัวหน้าโครงการ หรือเป็นผู้ร่วมโครงการ โดยให้ระบุ สัดส่วนการมีส่วนร่วมในการทำวิจัยตามที่ระบุไว้ในสัญญา กรณี ไม่ได้ระบุสัดส่วนไว้ ให้เฉลี่ยตามจำนวนนักวิจัย กรณีที่ผู้ร่วม โครงการวิจัยสังกัดหน่วยงานวิจัยมากกว่า 1 หน่วย ให้ระบุว่า จะรายงานจำนวนเงินนั้นภายใต้หน่วยงานวิจัยใด	✓	✓
4. การสร้าง บัณฑิตระดับ ปริญญาโทและ ปริญญาเอก	- บัณฑิตที่สำเร็จการศึกษาภายใต้การดูแลของหน่วยงานวิจัย ในช่วงปีปฏิทินที่ประเมิน โดยนับเฉพาะที่สมาชิกของหน่วยงาน วิจัยนั้นเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา หรืออาจารย์ที่ปรึกษาร่วมเท่านั้น	✓	✓
5. ผลงานที่ใช้ ประโยชน์ ได้จริง	- รายงานผลงานที่ใช้ประโยชน์ได้จริงใน 4 ด้าน ได้แก่ การใช้ ประโยชน์เชิงพาณิชย์ เชิงชุมชน เชิงสาธารณะ และเชิงนโยบาย ในช่วงปีปฏิทินที่ประเมิน โดยให้หน่วยงานวิจัยเขียนสรุปผลงานฯ ความยาวไม่เกิน 1 หน้าต่อผลงานฯ พร้อมแนบหลักฐานประกอบ เพื่อให้คณะกรรมการฯ พิจารณารับรอง	✓	✓

ทั้งนี้ กำหนดให้มีระดับการประเมินผลการดำเนินงานตามดัชนีชี้วัดต่างๆ ดังนี้

- จำนวนบทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารที่ปรากฏในฐานข้อมูล Scopus (จำนวนบทความต่อจำนวนสมาชิกต่อปี ในช่วง พ.ศ. 2558 – 2560)
 - ยังน้อย น้อยกว่า 0.5
 - ค่อนข้างดี เท่ากับ 0.5 – 1.0
 - ดี มากกว่า 1.0 แต่ไม่เกิน 1.5
 - ดีมาก มากกว่า 1.5
- คุณภาพบทความวิจัยฯ (จำนวนการอ้างอิงในช่วง พ.ศ. 2558 – เดือนมีนาคม พ.ศ. 2562 (เดือนที่ทำการประเมิน) ต่อบทความวิจัยฯ ที่ตีพิมพ์ในช่วง พ.ศ. 2558 – 2560)
 - ยังน้อย น้อยกว่า 1.0
 - ค่อนข้างดี เท่ากับ 1.0 – 2.0
 - ดี มากกว่า 2.0 แต่ไม่เกิน 4.0
 - ดีมาก มากกว่า 4.0

3. งบประมาณที่ได้รับจากแหล่งทุนภายนอกในช่วง พ.ศ. 2558 – 2560
- | | | |
|-----------|---------------------|---------------|
| • ผ่าน | มากกว่า หรือเท่ากับ | 1,000,000 บาท |
| • ไม่ผ่าน | น้อยกว่า | 1,000,000 บาท |
4. การสร้างบัณฑิตระดับปริญญาโทและปริญญาเอก (จำนวนบัณฑิตระดับปริญญาโทและปริญญาเอกที่สำเร็จการศึกษาต่อจำนวนสมาชิกต่อปี ในช่วง พ.ศ. 2558 – 2560)
- | | | |
|--------------|----------|--------------------|
| • ยังน้อย | น้อยกว่า | 0.5 |
| • ค่อนข้างดี | เท่ากับ | 0.5 – 1.0 |
| • ดี | มากกว่า | 1.0 แต่ไม่เกิน 1.5 |
| • ดีมาก | มากกว่า | 1.5 |

เมื่อนำดัชนีชี้วัดและระดับการประเมินผลข้างต้นไปประยุกต์กับข้อมูลของหน่วยงานวิจัย (สมมติชื่อเป็น หน่วยงาน ก) ได้ผล
 ดังแสดงเป็นตัวอย่างในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปผลการดำเนินงานหน่วยงานวิจัย ก						
ดัชนีชี้วัด	รายการ	ปีปฏิทิน			ผลงานรวม 3 ปี	ผลงานต่อสมาชิกต่อปี ในช่วง 3 ปี ที่ประเมิน
		2558	2559	2560		
จำนวนสมาชิก		23	23	23	-	-
1	1.1 จำนวนบทความวิจัยในวารสารฯ	12	15	29	56	-
	จำนวนบทความวิจัยต่อจำนวนสมาชิก	0.52	0.65	1.26	2.43	0.81
	1.2 จำนวนสิทธิบัตร	0	0	0	0	-
2	จำนวนการอ้างอิงต่อบทความ*	-	-	-	7.26	-
3	จำนวนเงินงบประมาณจากแหล่งทุนภายนอก	3,426,150	2,278,200	6,700,860	12,405,210	-
	จำนวนเงินงบประมาณต่อจำนวนสมาชิก	148,963	99,052	291,342	-	179,786
4	4.1 จำนวนบัณฑิตที่สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท	5	5	12	22	-
	จำนวนบัณฑิตที่สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท ต่อจำนวนสมาชิก	0.22	0.22	0.52	0.96	0.32
	4.2 จำนวนบัณฑิตที่สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก	1	3	10	14	-
	จำนวนบัณฑิตที่สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก ต่อจำนวนสมาชิก	0.04	0.13	0.43	0.61	0.20

ตารางที่ 2 สรุปผลการดำเนินงานหน่วยงานวิจัย ก (ต่อ)

	ผลงานที่ใช้ประโยชน์ได้จริง	0	1	2	3	-
5	ผลงานที่ใช้ประโยชน์ได้จริงที่คณะกรรมการฯ รับรอง **	0	N/A	N/A	N/A	-

* จำนวนการอ้างอิงในช่วง พ.ศ. 2558 – เดือนมีนาคม พ.ศ. 2562 ตอบบทความวิจัยฯ ที่ตีพิมพ์ในช่วง พ.ศ. 2558 – 2560

** ผลงานที่ใช้ประโยชน์ได้จริงจำนวน 3 เรื่องในช่วงปี พ.ศ. 2558 – 2560 แต่ไม่ได้ส่งเอกสาร/หลักฐาน ให้คณะกรรมการฯ พิจารณา

หมายเหตุ N/A ในตัวบ่งชี้ที่ 2 หมายถึง ไม่สามารถสืบค้นข้อมูลการอ้างอิงบทความได้จากฐาน Scopus

N/A ในตัวบ่งชี้ที่ 5 หมายถึง ไม่สามารถพิจารณาได้เนื่องจากหน่วยงานวิจัยฯ ไม่ได้ส่งเอกสารหรือหลักฐานให้คณะกรรมการฯ พิจารณา

สรุปภาพรวมของหน่วยงานวิจัย ก ได้ดังนี้

- จำนวนบทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารที่ปรากฏในฐานข้อมูล Scopus **ค่อนข้างดี** เมื่อเทียบกับจำนวนสมาชิก (0.81 เรื่องต่อสมาชิกต่อปีจากการรายงานของหน่วยงานวิจัยเอง แต่จากการสืบค้นฐานข้อมูลฯ พบว่ามีจำนวนมากกว่า)
- คุณภาพบทความวิจัยฯ อยู่ในระดับ **ดีมาก** (จำนวนการอ้างอิงในช่วงปี พ.ศ. 2558 – เดือนมีนาคม 2562 เท่ากับ 7.26 ครั้ง ตอบบทความวิจัยฯ ที่ตีพิมพ์ในช่วงปี พ.ศ. 2558 – 2560)
- งบประมาณจากแหล่งทุนภายนอกผ่านตามเกณฑ์ (12,405,210 บาท ในช่วงสามปีที่ประเมิน)
- จำนวนบัณฑิตระดับปริญญาโท (0.32 คน ต่อสมาชิกต่อปี) และปริญญาเอก (0.2 คน ต่อสมาชิกต่อปี) ที่สำเร็จการศึกษา **ค่อนข้างดี** เมื่อเทียบกับจำนวนสมาชิก

เกณฑ์การประเมินบุคลากรวิจัย

จากประสบการณ์การใช้ดัชนีชี้วัดทั้ง 5 ด้านในการประเมินหน่วยงานวิจัย ผู้เขียนจึงขอเสนอดัชนีชี้วัดที่คล้ายคลึงกันดังต่อไปนี้ในการประเมินบุคลากรวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ เป็นต้น

1. จำนวนบทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารที่ปรากฏในฐานข้อมูล Scopus (โดยอาจพิจารณาจากจำนวนบทความ รวมจำนวนบทความในวารสารที่อยู่ในควอร์ไทล์ (quartile) ที่ 1

และ 2 จำนวนบทความที่เป็นผู้เขียนคนแรก (first author) และ/หรือเป็นผู้เขียนที่รับผิดชอบบทความ (corresponding author)

2. จำนวนครั้งการอ้างอิง ซึ่งสืบค้นจากฐานข้อมูล Scopus
3. h-index ซึ่งคำนวณจากข้อมูลในฐานข้อมูล Scopus
4. จำนวนทุนวิจัย (จำนวนทุนรวมและเฉพาะที่เป็นหัวหน้าโครงการ)
5. จำนวนผลงานที่มีการนำไปใช้ประโยชน์และผลกระทบ
6. ในกรณีที่ เป็นบุคลากรวิจัยประเภทอาจารย์ อาจเพิ่มจำนวนบัณฑิตที่สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก

สำหรับระดับการประเมินตามดัชนีชี้วัดต่าง ๆ นั้น อาจเลือกใช้ได้แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์หรือเป้าหมายของการประเมิน และหากฐานข้อมูล TCI มีความพร้อมในการสืบค้นเช่นเดียวกับฐานข้อมูล Scopus ก็อาจข้อมูลในฐานดังกล่าวมาประกอบการพิจารณาด้วย

สรุปและข้อเสนอแนะ

บทความนี้นำเสนอแนวทางการประเมิน ทั้งสำหรับหน่วยงานและบุคลากรวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการ แนวทางที่นำเสนอสอดคล้องในบางส่วนกับเกณฑ์การประเมินมหาวิทยาลัยโลกของ QS และ Times Higher Education World University Rankings จึงน่าจะเป็นแนวทางที่สามารถนำไปใช้ปฏิบัติได้อย่าง

รวดเร็ว และเป็นที่ยอมรับ ทั้งนี้ จากการทดลองใช้ดัชนีชี้วัดและระดับการประเมินผลการดำเนินงานตามดัชนีชี้วัดต่างๆ ที่นำเสนอในบทความนี้ในการประเมินหน่วยงานวิจัยมากกว่า 20 หน่วยของมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่ง ไม่พบข้อโต้แย้งใดๆ แสดงให้เห็นได้เป็นอย่างดีว่าเกณฑ์การประเมินหน่วยงานวิจัยที่นำเสนอที่น่าจะเป็นที่ยอมรับได้ เกณฑ์การประเมินที่น่าเสนอนี้มีได้ครอบคลุมแต่เพียงประเด็นด้านวิชาการเท่านั้น แต่ยังครอบคลุมไปถึงประเด็นที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ของผลงาน ซึ่งเป็นประเด็นที่มีความสำคัญ และถือได้ว่าเป็นผลลัพธ์ (outcome) ที่แท้จริงของงานวิจัย

ในอนาคต อาจพิจารณาใช้เกณฑ์การประเมินบุคลากรวิจัย ข้อที่ 1 – 3 ในการคัดกรองบุคคลให้รับรางวัลด้านการวิจัยในขั้นต้น จากนั้นจึงนำเกณฑ์ข้อที่ 4 – 5 มาพิจารณาประกอบเพิ่มเติมหลังจากการคัดกรองในรอบแรกผ่านพ้นไปแล้ว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการประเมินสถานวิจัยเพื่อความ เป็นเลิศทางวิชาการ มหาวิทยาลัยนเรศวร ประจำปี 2562 ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็น และแนวคิดอันเป็นประโยชน์ ซึ่งเป็นที่มาของแนวทางการประเมินที่น่าเสนอนี้

