



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Engineering Journal
Chiang Mai University

Volume 26(2)2019 May - August 2019
ISSN 0857-2178

Content

การปรับปรุงนโยบายการจัดเก็บสินค้าคงคลังของกันชนหน้า สำหรับผู้จำหน่ายชิ้นส่วนอะไหล่ยานยนต์แห่งหนึ่ง..... (Front Bumpers Inventory Policy Improvement for an Automotive Spare Parts Distributor) อาทิตย์ยา เท่งตระกูล และ นระเกณท์ พุ่มชูศรี	1-14
การสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในน้ำพลาสมาด้วยระบบพลาสมาโกลดิ้งอาร์ค..... (Synthesis of Hydroxyl Radical in Plasma-activated Water by Gliding Arc Plasma) พฤตพงศ์ พงศ์กัลป์ และ คมกฤต เล็กสกุล	15-27
การศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของชั้นเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมโดยการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์.... (The Study of Wear Behavior of Hardfacing layer on 3.5% Cr steel by Flux Cored Wire Arc Welding Process) ธีรโชติ ตีระเกีร์ และ ประภาศ เมืองจันทร์บุรี	28-35
สัดส่วนที่เหมาะสมของหินปูนในคอนกรีตผสมเสร็จโดยวิธีซิกซ์ซิกมา..... (Appropriate Proportion of Dust Rock in Ready Mix Concrete by Six Sigma) วีระชัย อาริรักษ์ และ จิรพัฒน์ เงาประเสริฐวงศ์	36-46
การวิเคราะห์ความสูญเสียช่วงขาเข้าระบบบ่อนอากาศที่ใช้เผาไหม้ของโรงไฟฟ้าถ่านหินด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ..... (Analysis Loss in Combustion System Suction Duct of a Coal-Fired Power Plant by CFD) ภาควัฒน์ คำเครื่อง และ ยศธนา คุณาทร	47-65
การจำลองการไหลของน้ำใต้ดินและการรุกตัวของน้ำเค็มรอบบ่อเก็บน้ำ จังหวัดพังงา..... (Simulation of Groundwater Flow and Saltwater Intrusion around a Storage Pond in Phang-Nga Province) พรชวรณ บุญยรัตพันธุ์ สุรชัย ลิปิวัฒนาการ ชัยวัฒน์ ชัยนการนาวิ และ พรณพิมพ์ พุทธรักษา มะเปี่ยม	66-79
การวิเคราะห์ประเภทของวัสดุที่มีผลต่อค่าความเข้มของเสียงที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่เสียง..... (Analysis a material effecting to intensity of sound under variable of frequencies) อานนท์ อิศรมงคลรักษ์ และ รัฐกุล วุฑฒวิภาต	80-85
ผลกระทบของปัจจัยในกระบวนการบรรจุที่มีต่อปริมาตรเครื่องดื่มที่มีส่วนผสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์..... (Effects of factors in packaging process on volume of Carbon dioxide mixed beverage) ชานิดา กัมพลานนท์ และ นกัสนวงศ์ ไชยสถิตศิลป์	86-98
ผลกระทบของเครื่องมือตรวจวัดต่อการตรวจวัดการถ่ายแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้การรับแรงในแนวแกน..... (Effects of Instrumentation Devices on Load Transfer Measurement of Deep Cement Mixing Piles under Axial Loading) ธนภูมิ ไลน์จ่อหอ พรเกษม จงประดิษฐ์ และ ศิริวรรณ ไวยชิตา	99-106
การพัฒนาแบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย กรณีศึกษา อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย... (Development of a Decision Support System for Weir Sluice Gate Level Adjustment Case Study: Mae Chan, Chiang Rai) เบญญา สุนทรานนท์ สมรวิ อร่ามกุล ภาสกร แซ่มประเสริฐ ชูโชค อายุพงศ์ และ มานพ แก้วไมราเจริญ	107-120

Note for Authors

Paper submitted for publication in Engineering Journal CMU should consist of the following sections: Titles, Authors Names and Address, Abstract, Introduction, Materials and Methods, Results and Discussion, Conclusion, Acknowledgements (if any), Reference, and Appendix (if any). Articles should be as concise as possible and must be written in either Thai or English. Authors are requested to follow the Journal's style and format and should refer to current issues as a guide. Electronic template of manuscript in Thai or in English may be downloaded from <www.eng.cmu.ac.th>. Details of style and format of the required manuscript are;

Text format: The manuscript should be prepared using a word processing software such as Microsoft Word or Latex. A4 size paper is conventionally accepted. Margins in page set up must be set as follows;

Top Margin	3.0	cm.	Bottom Margin	3.0	cm.
Left Margin	2.5	cm.	Right Margin	2.5	cm.

There should be 3 sections. The first and the third sections are single column format for Titles, Authors Names and Address, Abstract and References. The second is two 7.6 cm wide columns formatted with section separation of 0.8 cm. for the remainder of the paper.

Font, Font Size & Typeface Angsana UPC font type is required for Thai text and Times New Roman font type is required for English text. Font size [Pica] for various text functions are tabulated as follows.

Text functions	English Manuscript Font = Times New Roman		Thai Manuscript Font = Angsana UPC	
	pica Size ++	Typeface	pica Size ++	Typeface
Title	20[CT]	Bold	26[CT]	Bold
Author and Co-authors	11[CT]	Bold	14[CT]	Bold
Address of Correspondence	11[CT]	Normal	14[CT]	Normal
Abstract & Reference Heading	12[CT]	Bold	16[LRJ]	Bold
Section Heading & Number	12[LJ]	Bold	16[LJ]	Bold
Subsection Heading & Number	11[LJ]	Bold	14[LJ]	Bold
Abstract & Main Texts	11[LRJ]	Normal	14[LJ]	Normal

+ CT = Central Text, LJ = Left Justified, LRJ = Left & Right Justified

Text flow: To ease manuscript preparation, some general comments are described here. Paper should not exceed 16 pages in length, including figures and tables. Charts, photographs, graphs, diagrams and tables should be of good quality and sharp. All lettering, graph lines and points on graphs should be sufficiently large. Photos should be put into a text stream using a high resolution scanner. All illustrations should be provided in camera ready form and numbered consecutively. Tables should not duplicate results presented elsewhere in the manuscript, (e.g. in graphs). Equations and complex expressions should be carefully prepared.

Units: The SI system should be used for all scientific and laboratory data. If it is necessary to quote other units, these should be added in parentheses.

Reference: Only reference cited in the text should be listed in the reference section and should be presented in a list of references following the text of the manuscript (list by sequence of appearance). The full reference should be given in a numerical list at the end of the paper. In the text, authors should refer to references by a number in square brackets on the line (e.g. Terdtoon et al [1]). Reference should be given as follows;

- [1] Ma, F., Hanna, M.A. Biodiesel production: a review. *Bioresource technology*, 1999; 70: 1-15
- [2] Tippayawong, N., Kundhawiorn, N., Jompakdee, W. Long term durability tests of small engines fueled with bio-ethano/gasoline blends. International Symposium on Renewable Energy, 14-17 September, Kuala Lumpur, Malaysia, 2003.
- [3] Suksamai, S. Particulate contamination control using filtration technique. MEng Thesis, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, 2003.
- [4] Heywood, J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill, Singapore, 1988.

All correspondence should be addressed directly to Editor.



การปรับปรุงนโยบายการจัดเก็บสินค้าคงคลังของกันชนหน้า สำหรับผู้จำหน่ายชิ้นส่วนอะไหล่ยานยนต์แห่งหนึ่ง Front Bumpers Inventory Policy Improvement for an Automotive Spare Parts Distributor

อาทิตยา เท่งตระกูล* และ นรเกณท์ พุ่มชูศรี

Artitaya Tengtragul* and Naragain Phumchusri

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, 10330, Thailand

*E-mail: artitaya.teng@gmail.com, Tel.: 08-6371-2072

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงนโยบายการจัดเก็บสินค้าคงคลังของกันชนหน้าสำหรับผู้จำหน่ายชิ้นส่วนอะไหล่ยานยนต์แห่งหนึ่งให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งปัจจุบันบริษัทกรณีศึกษาประสบปัญหาสินค้าคงคลังมากเกินไปในสินค้าบางรายการจนเกิดต้นทุนจม แต่สินค้าบางรายการกลับมีคงคลังน้อยเกินไปจนทำให้สินค้าขาดมือไปบางช่วงเวลา ส่งผลให้ระดับความพึงพอใจของลูกค้าลดลง ปัญหาเหล่านี้เกิดจากการมีปริมาณของสินค้าคงคลังไม่เหมาะสมกับความต้องการ จากการสำรวจพบว่าบริษัทกรณีศึกษาใช้วิธีการพยากรณ์แบบนาอิว ซึ่งมีความผิดพลาดสูง (MAPE 38%) และมีการจัดเก็บสินค้าคงคลังสำรอง (Safety Stock) ที่ไม่คำนึงถึงความแปรปรวนหรือการกระจายของอุปสงค์ ทำให้ปริมาณสินค้าคงคลังที่ต้องจัดเก็บ (Inventory Target) เมื่อเทียบกับความต้องการใช้ต่อเดือนสูงถึง 5.2 เท่า

งานวิจัยฉบับนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกได้มุ่งเน้นความแม่นยำของการพยากรณ์ โดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีการปัจจุบันกับวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย วิธีปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลแบบไฮลท์ และวิธีบอซ-เจนกินส์ ส่วนที่สองเป็นการปรับปรุงนโยบายสินค้าคงคลังให้มีความเหมาะสม โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะของสินค้า รูปแบบของอุปสงค์และอุปทาน รวมถึงจุดอ่อนของนโยบายปัจจุบันที่ควรปรับปรุง โดยใช้ปริมาณของสินค้าคงคลังที่ต้องจัดเก็บ (Inventory Target) และความสามารถในการจัดส่งสินค้าให้แก่ลูกค้า (% Allocation) เป็นตัววัดประสิทธิภาพของวิธีการทั้งก่อนและหลังการปรับปรุง โดยเปรียบเทียบกับยอดขายจริงย้อนหลังตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม 2559

ผลการวิจัยพบว่าการพยากรณ์ด้วยวิธีการบอซ-เจนกินส์ หรือ ARIMA ด้วยตัวแบบที่ต่างกันและจำนวนเดือนของข้อมูลยอดขายที่ใช้แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของอุปสงค์ ทำให้สินค้าทุกรายการที่เลือกใช้เป็นตัวแทนมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดย $MAPE \leq 20\%$ และได้ค้นพบนโยบายคงคลังที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น คือ นโยบาย Base Stock Level ซึ่งทำให้ปริมาณสินค้าคงคลังที่ต้องจัดเก็บลดลง โดยมีปริมาณสินค้าคงคลังที่ต้องจัดเก็บลดลงจาก 5.2 เหลือ 4.0 เดือน และรักษาความสามารถในการจัดส่งสินค้าให้แก่ลูกค้าโดยเฉลี่ยแต่ละเดือนอยู่ระหว่าง 81-100%

ABSTRACT

The purpose of this study is to improve the “Front Bumpers” inventory policy for an automotive spare parts distributor. Currently, this company has many items with too much inventory which lead to sunk cost and some items with insufficient stocks and inventory shortages, leading to low customer satisfaction. The current policy has to be improved and we have found that the Naïve forecasting method that the company currently uses has a very high error of 38% MAPE. In addition, the company’s Safety Stock is not taken into account of demand variance. Thus, the company’s Inventory Target is currently as high as 5.2 times of monthly demand.

This research is divided into 2 parts. The first part is to identify the forecast method that can provide accurate result. Moving average method, Holt’s exponential smoothing method and ARIMA are compared. The second part is to improve inventory policy by analyzing product demand and supply patterns. The result of the research is evaluated by comparing inventory stock and percent allocation (i.e., the ability to satisfy customer’s demand by company’s stock), before and after implementation of the new policy, using the real demand from January to December 2016.

The result shows the Box–Jenkins (ARIMA) provides the lowest and acceptable error ($MAPE \leq 20\%$). The inventory policy that is most suitable is the Base Stock Level which can reduce the inventory stock from 5.2 to 4.0 times monthly demand, and can still provide acceptable % allocation of 81-100% for all products considered in this research.

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

บริษัทกรณศึกษาเป็นผู้จัดจำหน่ายชิ้นส่วนอะไหล่ยานยนต์ (ศูนย์กระจายสินค้า) ให้แก่ศูนย์บริการทั่วประเทศ ซึ่งตามข้อตกลงผู้ผลิตรถยนต์ต้องให้บริการอะไหล่เป็นระยะเวลา 20 ปี เนื่องจากเงื่อนไขของเวลาและลักษณะการใช้งาน ชิ้นส่วนอะไหล่จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่นำมาเปลี่ยนแทนชิ้นส่วนเดิมที่เสียหรือสึกหรอเพื่อให้สามารถใช้งานต่อไปได้ตามปกติ ดังนั้นจึงต้องมีสินค้าคงคลังเตรียมพร้อมเพื่อให้บริการแก่ลูกค้าอยู่เสมอ ซึ่งเป็นชิ้นส่วนอะไหล่สำเร็จรูปพร้อมใช้งาน เพื่อให้ลูกค้าได้รับการบริการที่สะดวกและรวดเร็ว โดยกันชนหน้าเป็นอะไหล่ที่มีปัญหาคงคลังมากที่สุด เพราะบางรายการสามารถจัดส่งให้ลูกค้าได้ตามความต้องการ เพราะมีสินค้าคงคลังปริมาณมากเกินความจำเป็น ในบางรายการมีสินค้าคงคลังปริมาณน้อยเกินไปทำให้เสียโอกาสทางการค้าในกรณีสินค้าขาดมือและส่งผลกระทบต่อระดับความพึงพอใจของลูกค้าอีกด้วย จากการนำกันชนหน้าทั้งหมด 84 รายการ มาจำแนกตามลักษณะของปัญหาคงคลังในปัจจุบันพบว่า กันชนหน้าจำนวน 14 รายการมีสินค้าคงคลังต่ำกว่าเป้าหมายที่บริษัทกำหนด (Low) และอีก 70 รายการ มีคงคลังสูงกว่าเป้าหมาย (High) และจะเห็นว่า

ไม่มีกันชนหน้ารายการใดที่สามารถบรรลุได้ตามเป้าหมายของบริษัท (Achieved) ปัญหาเหล่านี้แสดงถึงการมีปริมาณสินค้าคงคลังที่ไม่เหมาะสม รายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำแนกสินค้าตามสภาพปัญหาคงคลัง

Stock Level (month)		
Achieved	Low	High
0	0	21
0	6	14
0	6	15
0	2	20
0	14	70

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- เพื่อปรับปรุงตัวแบบการพยากรณ์ยอดขายของกันชนหน้า สำหรับผู้จัดจำหน่ายชิ้นส่วนอะไหล่ยานยนต์กรณศึกษา ให้มีความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 20%
- เพื่อพัฒนารูปแบบนโยบายในการจัดเก็บสินค้าคงคลังให้มีประสิทธิภาพ และสามารถทำให้ปริมาณสินค้าคงคลังที่ต้องจัดเก็บ (Inventory Target) ลดลงได้ โดยยังสามารถรักษาระดับการให้บริการลูกค้า (% Allocation) ได้ตามเป้าหมายโดยมากกว่า 80%

1.3 ขอบเขตในการทำวิจัย

1. เลือกตัวแทนกันชนหน้าที่มีปัญหาสินค้าคงคลังมากที่สุดและปัญหาระดับการให้บริการลูกค้าต่ำที่สุดจากแต่ละ Class (A, B, C และ D ซึ่งถูกแบ่งตามความถี่ในการเคลื่อนไหว) รวม 8 ชุดข้อมูล จากกันชนหน้าทั้งหมด 84 รายการ

2. ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นข้อมูลยอดขายกันชนหน้ารายเดือนของบริษัทกรณีศึกษา ตั้งแต่เดือนมกราคม 2554 ถึงสิ้นเดือนธันวาคม 2559 รวม 72 เดือน โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ช่วง คือ

2.1 ข้อมูลที่ใช้ในการหาตัวแปรเพื่อสร้างสมการพยากรณ์สำหรับข้อมูลยอดขายกันชนหน้ารายเดือนของแต่ละรายการ ใช้ข้อมูลตั้งแต่ต้นเดือนมกราคม 2554 ถึงสิ้นเดือนธันวาคม 2558 รวมทั้ง 60 เดือน โดยจะพิจารณาจำนวนเดือนของข้อมูลยอดขายที่ใช้ในการหาตัวแปรของกันชนหน้าแต่ละ Class ให้มีความเหมาะสม

2.2 ข้อมูลที่ใช้ทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์แต่ละตัวแบบ ตั้งแต่ต้นเดือนมกราคม 2559 ถึงสิ้นเดือนธันวาคม 2559 รวมทั้ง 12 เดือน

3. เทคนิคการพยากรณ์ที่ใช้ศึกษาเป็นการพยากรณ์เชิงปริมาณแบบอนุกรมเวลา ได้แก่ การพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ การพยากรณ์แบบปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลแบบโฮลท์ และการพยากรณ์แบบบอซ-เจนกินส์ โดยนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการพยากรณ์แบบนาอิว ที่บริษัทกรณีศึกษาใช้อยู่ในปัจจุบัน

4. วิธีการทางสถิติที่ใช้ทดสอบการแจกแจงลักษณะของข้อมูลปริมาณความต้องการ เพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ กำหนดระดับความเชื่อมั่น (Confidence Level) 95% และระดับนัยสำคัญ (Level of Significant) หรือ $\alpha = 0.05$

5. การหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) ใช้ข้อมูลยอดขายย้อนหลังชุดเดียวกับที่ใช้ในการหาตัวแบบการพยากรณ์

6. ความเหมาะสมของตัวแบบการพยากรณ์ วัดจากค่าความคลาดเคลื่อนของตัวแบบหรือสมการการพยากรณ์

โดยใช้ค่าร้อยละของค่าสัมบูรณ์ของค่าคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับค่าจริงโดยเฉลี่ย (The Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ในการเปรียบเทียบผล

7. การวิเคราะห์นโยบายปัจจุบันของบริษัทเพื่อหา นโยบายคงคลังที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น จากข้อมูลยอดขายจริงตั้งแต่ต้นเดือนมกราคม ถึงสิ้นเดือนธันวาคม 2559 รวม 12 เดือน โดยใช้ Inventory Target และ %Allocation เป็นตัววัดประสิทธิภาพของนโยบาย ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานการวิจัย

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพยากรณ์ และขั้นตอนการพยากรณ์ของแต่ละเทคนิคที่เลือกใช้ในงานวิจัย รวมทั้งศึกษาวิธีการคิดและวิเคราะห์ปัญหาของสินค้าคงคลังเพื่อนำไปออกแบบรูปแบบในการแก้ปัญหา

2. ศึกษาวิธีการประมาณการยอดขายที่ใช้อยู่ ณ ปัจจุบันของบริษัทกรณีศึกษา

3. ศึกษาสภาพปัญหาสำหรับนโยบายคงคลังในปัจจุบันของกันชนหน้า และเลือกรายการสินค้าที่ใช้เป็นตัวแทนจำนวน 8 รายการ

4. รวบรวมข้อมูลยอดขายรายเดือนของตัวแทนกันชนหน้าทั้ง 8 รายการ ตั้งแต่ต้นเดือนมกราคม 2554 ถึงสิ้นเดือนธันวาคม 2558 รวมทั้ง 60 เดือน เพื่อพิจารณาจำนวนเดือนของข้อมูลยอดขายที่เหมาะสมในการใช้หาตัวแปรเพื่อสร้างตัวแบบหรือสมการพยากรณ์ยอดขายสินค้าแต่ละ Class ของบริษัทกรณีศึกษา

5. ทดสอบสมมติฐานว่า ข้อมูลยอดขายกันชนหน้า มีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ โดยใช้วิธีการทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และกำหนดระดับนัยสำคัญ 0.05

6. หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) จากข้อมูลยอดขายของรายการที่ถูกเลือกเป็นตัวแทนกันชนหน้าจำนวน 8 ชุดข้อมูล

7. ศึกษาลักษณะการเคลื่อนไหวของข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ลักษณะของข้อมูลยอดขายรายเดือนของสินค้าแต่ละรายการของบริษัทกรณีศึกษาว่ามีลักษณะข้อมูล

เป็นประเภทย่อย โดยพิจารณาจากกราฟของยอดขายรายเดือนแทนด้วย Y_t ตามด้วยลำดับเวลาแทนด้วย t และวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบออโต (Auto Correlation Function: ACF)

8. วิเคราะห์หาเทคนิคการพยากรณ์ที่เหมาะสมกับข้อมูลสินค้าแต่ละรายการ และทำการพยากรณ์

9. เก็บข้อมูลยอดขายรายเดือนช่วงที่ 2 ตั้งแต่ต้นเดือนมกราคมถึงสิ้นเดือนธันวาคม 2559 รวม 12 เดือน

10. ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบพยากรณ์ที่ได้ โดยใช้ค่า MAPE เป็นดัชนีชี้วัดว่าความผิดพลาดของรูปแบบการพยากรณ์ใดให้ค่าที่น้อยที่สุด

11. วิเคราะห์วิธีการปัจจุบันที่บริษัทกรณีศึกษาใช้คำนวณปริมาณสินค้าคงคลังที่ต้องจัดเก็บของกันชนหน้าเพื่อทำการปรับปรุงและหานโยบายในการจัดเก็บสินค้าคงคลังที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

12. เปรียบเทียบปริมาณสินค้าคงคลังที่จัดเก็บด้วยนโยบายปัจจุบันของบริษัท และนโยบายที่ทำการปรับปรุงโดยทำการทดสอบจากงานวิจัยนี้พบว่า วิธีการบริหารจัดการคลังสินค้ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยเปรียบเทียบจากยอดขายจริงตั้งแต่ต้นเดือนมกราคมถึงสิ้นเดือนธันวาคม 2559 และทำการวิเคราะห์ผลการศึกษาโดยใช้ Inventory Target และ % Allocation เป็นตัววัดผล

13. รวบรวมผลการวิจัยและสรุปผลการศึกษา

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ปริมาณสินค้าคงคลังของกันชนหน้าลดลง และสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ตามเป้าหมาย

2. ได้ตัวแบบการพยากรณ์ยอดขายที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เพื่อใช้ในการพยากรณ์ยอดขายกันชนหน้าของบริษัทกรณีศึกษา

3. ได้นโยบายในการจัดเก็บสินค้าคงคลังของกันชนหน้าที่เหมาะสม โดยทำการทดสอบจากงานวิจัยนี้

จนพบว่า วิธีการบริหารจัดการคลังสินค้ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ข้อมูลการพยากรณ์ยอดขายที่แม่นยำจะช่วยให้การวางแผนการขายและการวางแผนการสั่งซื้อมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังลดความน่าจะเป็นที่สินค้าจะขาดมือ

2. ได้ข้อมูลการพยากรณ์ยอดขายที่น่าเชื่อถือมากขึ้น เพื่อใช้ในการตัดสินใจวางแผนการดำเนินงานของผู้บริหารในอนาคต

3. บริษัทกรณีศึกษามีนโยบายในการควบคุมสินค้าคงคลังที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยปราศจากภาวะสินค้าขาดมือ และช่วยลดสินค้าคงคลังที่เดิมอาจมากเกินไป ความจำเป็น สามารถรักษาระดับการให้บริการลูกค้าได้ตามเป้าหมาย ทั้งยังมีต้นทุนรวมของสินค้าคงคลังลดลง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคนิคการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลา

มีการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบบอซ-เจนกินส์ หรือ ARIMA อย่างแพร่หลาย โดยอ้างอิงจากงานวิจัยหลายฉบับ ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า เทคนิคการพยากรณ์แบบ ARIMA ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และให้ผลที่แม่นยำกว่าการพยากรณ์แบบอื่น ๆ โดยส่วนมากจะมีการวัดประสิทธิภาพของตัวแบบการพยากรณ์จากค่า MAPE เช่น [4] ใช้พยากรณ์ราคาทองคำ [5] ใช้พยากรณ์ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าเหล็กแผ่นรีดร้อนของประเทศไทยด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป [10] ศึกษาการประยุกต์ใช้ในการพยากรณ์ราคาปศุสัตว์หลักทรัพย์สินรายวันของตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย โดยเปรียบเทียบกับวิธีการพยากรณ์แบบเคลื่อนที่ที่ช้า 2 ครั้ง [15] ใช้ในการพยากรณ์ปริมาณจำนวนสายเข้าในธุรกิจขายตรงผ่านโทรศัพท์ โดยเปรียบเทียบกับเทคนิคการปรับให้เรียบเอกซ์โพเนนเชียลแบบไฮลท์ และ [18] ใช้พยากรณ์ปริมาณการส่งออกของประเทศไทยได้ หวัน เพื่อศึกษาหา

ตัวแบบการพยากรณ์ที่เหมาะสมกับปริมาณการส่งออกของประเทศได้หวั่นเปรียบเทียบกับการพยากรณ์โดยใช้เทคนิค Fuzzy time series พบว่า การพยากรณ์แบบบอซซ์-เจนกินส์ ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าเมื่อข้อมูลนำเข้ามีมากเพียงพอ และเทคนิค Fuzzy time series จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าเมื่อข้อมูลนำเข้ามีจำนวนจำกัดในปริมาณน้อย ๆ

งานวิจัยของ [12] ได้ศึกษาเทคนิคการพยากรณ์ที่หลากหลายมากขึ้น โดยศึกษาทั้งหมด 4 เทคนิค คือ วิธีการของบอซซ์-เจนกินส์ วิธีการปรับเรียบแบบเลขชี้กำลัง วิธีการแยกองค์ประกอบ และวิธีการวิเคราะห์การถดถอย เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับเทคนิคปัจจุบันที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้พยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าของหน่วยงานและประชากร จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบทุกเทคนิคการพยากรณ์นั้นพบว่า เทคนิคการพยากรณ์ด้วยวิธีการของบอซซ์-เจนกินส์ ก็ยังเป็นวิธีการที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

การพยากรณ์แบบบอซซ์-เจนกินส์ นอกจากจะช่วยให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดและแม่นยำกว่าการพยากรณ์แบบอื่นแล้ว ยังช่วยให้การบริหารคลังสินค้ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยอ้างอิงจากหลายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการสินค้าคงคลังมักจะข้อมีจำกัดเสมอว่า การพยากรณ์ความต้องการยิ่งแม่นยำมากเท่าใด จะส่งผลให้การบริหารจัดการคลังมีประสิทธิภาพมากขึ้นตามไปด้วย มีงานวิจัยหลายฉบับที่ศึกษาแล้วพบว่า การพยากรณ์แบบบอซซ์-เจนกินส์ ช่วยให้ต้นทุนลดลง เช่น [8] ได้ใช้พยากรณ์ความต้องการเหล็กกล้าของประเทศไทยเพื่อนำไปใช้ในการวางแผนและควบคุมการผลิต การหาวิธีสั่งซื้อ และหาวิธีการผลิตที่ประหยัดที่สุด พบว่าสามารถลดต้นทุนจากการสั่งซื้อสินค้าเพิ่มขึ้นถึงเฉลี่ยร้อยละ 23 นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ [14] ที่ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคการพยากรณ์ด้วยวิธีบอซซ์-เจนกินส์ เพื่อใช้ในการปรับปรุงสินค้าคงคลังของบริษัทตัวอย่าง โดยใช้ตัวแบบพยากรณ์ ARIMA (0,1,1) พบว่าสามารถปรับปรุงสินค้าคงคลังของบริษัทตัวอย่างให้มี

ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึง 8.3% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ได้นำเทคนิคการพยากรณ์มาใช้

2.2 การบริหารสินค้าคงคลังมาประยุกต์ใช้

การกำหนดนโยบายการจัดการสินค้าคงคลังเป็นเรื่องที่ส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนในการบริหารจัดการ ดังนั้นควรเลือกให้เหมาะสมกับปัจจัยแวดล้อมและประเภทของสินค้าคงคลังเฉพาะอย่าง ดังงานวิจัยของ [2] ที่ได้ศึกษากระบวนการพยากรณ์ที่รวมวิธีการพยากรณ์เชิงปริมาณเข้ากับวิธีการเชิงคุณภาพและนโยบายการควบคุมสินค้าสำเร็จรูปคงคลังสำหรับสินค้ารายการสำคัญ เพราะมีลักษณะของอุปสงค์ที่แตกต่างกับสินค้ารายการทั่วไป โดยใช้ระบบการควบคุมแบบจุดสั่งซื้อ-ปริมาณสั่งซื้อ (s, Q) โดยใช้การคำนวณหาค่าตัวคูณเผื่อ (Safety Factor, k) และปริมาณสั่งซื้อ (Q) พร้อมกันเพื่อหาจุดสั่งซื้อและปริมาณสั่งซื้อที่เหมาะสม ดังที่งานวิจัย [16] กล่าวว่าในการจัดการสินค้าคงคลังต้องทำการหาคำตอบของ 3 คำถามสำคัญ คือ จะสั่งสินค้าอะไร เมื่อไรจึงจะทำการสั่งสินค้า และจะสั่งสินค้าเป็นจำนวนเท่าใด ซึ่งวิธีการหาคำตอบของปัญหาเหล่านี้ขึ้นอยู่กับลักษณะอุปสงค์ของสินค้าและระบบที่ใช้ในการจัดการสินค้าคงคลัง

การกำหนดระดับสินค้าคงคลังที่เหมาะสมจะช่วยให้ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นมีความเหมาะสม ดังงานวิจัยของ [4] ได้ศึกษาการปรับปรุงระบบการควบคุมสินค้าคงคลังขององค์กรโทรศัพทแห่งประเทศไทย โดยทำการพิจารณาระดับสินค้าคงคลังที่เหมาะสม โดยรวบรวมข้อมูลสินค้าออกและสินค้าเข้า จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสะสมสินค้าเข้าและออก กับเวลาที่อยู่ในคลังสินค้า เพื่อหาระดับสินค้าคงคลังที่เหมาะสมซึ่งได้จากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายของสินค้าคงคลังรวม เช่น ค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อสินค้า ค่าใช้จ่ายในการถือสินค้าต่ำที่สุด ปริมาณการสั่งซื้อ เป็นต้น และการกำหนดระดับสินค้าคงคลังที่เหมาะสมนั้น ต้องสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ในระดับที่ดี ดังงานวิจัยของ [11] ได้กล่าวถึงในมุมมองของการตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่มีความจำเป็นในการ

เก็บสินค้าคงคลังตามแนวคิดในรูปแบบดั้งเดิม นั้น จะมีการเก็บสินค้าคงคลังแบบหลักการ Right Place & Right Time กล่าวคือ องค์กรจะต้องมีการเก็บสินค้าคงคลังไว้ทุกประเภทในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้าที่จะมาถึงในทุก ๆ รูปแบบ

หากกำหนดระดับสินค้าคงคลังที่ไม่เหมาะสม ปัญหาที่เกิดขึ้นคือความไม่สมดุลของสินค้าคงคลัง ที่บางรายการมีจำนวนมากเกินไปจนความจำเป็น ในขณะที่บางรายการมีไม่เพียงพอต่อความต้องการ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่การจัดการสินค้าคงคลังไม่มีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ [1] ได้ศึกษาการปรับปรุงระบบบริหารสินค้าคงคลังสำหรับสินค้าสำเร็จรูปของบริษัทจัดจำหน่ายอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งผู้วิจัยได้ปรับปรุงนโยบายสินค้าคงคลังด้วยการนำเสนอระบบการสั่งซื้อแบบรอบเวลาคงที่หรือระบบ P เพราะเป็นการสั่งซื้อสินค้าหลายรายการจากผู้ผลิตรายเดียวกัน โดยมีการกำหนดปริมาณสินค้าคงคลังสูงสุด ปริมาณสินค้าคงคลังสำรองและปริมาณสั่งซื้อสินค้าในแต่ละรอบ โดยผลที่ได้พบว่า เมื่อมีการดำเนินการบริหารจัดการสินค้าคงคลังภายใต้วิธีการปรับปรุงที่เสนอแนะ ทำให้สามารถลดต้นทุนการสั่งซื้อสินค้าลงได้ 43.73% ลดต้นทุนในการเก็บรักษาสินค้าคงคลังได้ 31.48% และลดต้นทุนในการขาดแคลนสินค้าลงได้ 60.66% ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนรวมลงไปได้ 39.02% รวมทั้งยังสามารถรักษาระดับการให้บริการไว้ได้ที่ 95% อีกด้วย และงานวิจัยของ [13] ได้ศึกษาการพัฒนากระบวนการจัดการคลังสินค้าสำหรับผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ขนาดเล็ก พบปัญหาการถือครองวัตถุดิบคงคลังมากเกินไปจนความจำเป็น ซึ่งส่งผลต่อสภาพคล่องทางการเงินของบริษัท ผู้วิจัยจึงได้เลือกสินค้าที่มียอดจำหน่ายมากที่สุด 5 รายการมาศึกษาการบริหารจัดการวัตถุดิบคงคลัง โดยมีการวิเคราะห์ยอดขายในอดีตพร้อมทั้งคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด (Economic Order Quantity) จุดสั่งซื้อสินค้า (Reorder Point) และปริมาณสินค้าคงคลังสำรอง (Safety Stock) ผลการศึกษาพบว่า เมื่อนำการบริหารจัดการสินค้าคงคลังที่เสนอแนะมาใช้ ทำให้มีการ

วางแผนสั่งซื้อสินค้าและจัดการสินค้าคงคลังได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้ต้นทุนในการจัดเก็บสินค้าคงคลังลดลงไปได้ 65% ในขณะที่ต้นทุนในการสั่งซื้อสินค้าเพิ่มขึ้นเพียง 1% ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนรวมทั้งหมดลดลงไป 88,007 บาทหรือคิดเป็น 63%

ปัญหาการจัดการเก็บสินค้าคงคลังที่มากเกินไปจนความจำเป็น สาเหตุหนึ่งมาจากการใช้วิจารณ์ของผู้นับถือสินค้าคงคลังในการประมาณปริมาณการสั่งซื้อสินค้า เช่น งานวิจัยของ [7] ศึกษาสินค้าคงคลังที่เป็นชิ้นส่วนประกอบเครื่องยนต์เพื่อการเกษตร เกิดปัญหาพื้นที่ในการจัดเก็บสินค้าคงคลังไม่เพียงพอ จึงได้ทำการแก้ปัญหาโดยวิเคราะห์รูปแบบของความต้องการสินค้า พร้อมทั้งปรับปรุงและพัฒนาการจัดการสินค้าคงคลังโดยใช้ระบบจุดสั่งซื้อสินค้า ซึ่งมีการกำหนดปริมาณการสั่งซื้อสินค้าที่ประหยัดและจุดสั่งซื้อสินค้า นอกจากนั้นยังมีการใช้ระบบช่วงสั่งซื้อและระดับสั่งซื้อสินค้า โดยกำหนดช่วงเวลาในการสั่งซื้อสินค้าและปริมาณสินค้าคงคลังสูงสุด จากผลการศึกษาเมื่อได้มีการปรับปรุงปริมาณสั่งซื้อสินค้า พบว่ามีปริมาณสินค้าคงคลังที่จัดเก็บไว้ลดลง ส่งผลให้ต้นทุนในการจัดเก็บสินค้าคงคลังลดลง 36.18% ซึ่งจากเดิมมีต้นทุนจัดเก็บสินค้าคงคลังคิดเป็นเงิน 13,488,241.53 บาท และหลังจากการปรับปรุงปริมาณสั่งซื้อสินค้า ต้นทุนจัดเก็บสินค้าคงคลังคิดเป็น 6,490,818.26 บาท นอกจากนั้นปริมาณสินค้าคงคลังที่จัดเก็บลดลงส่งผลให้อัตราการหมุนเวียนของสินค้าคงคลัง (Inventory Turnover) มีการปรับตัวสูงขึ้น ซึ่งจากเดิมคิดเป็น 1.25 หลังจากที่มีการปรับปรุงคิดเป็น 4.22 และงานวิจัยของ [3] ได้ศึกษาการพัฒนากระบวนการบริหารสินค้าคงคลังสำหรับสินค้าแฟชั่น ที่จะต้องสั่งซื้อสินค้าจากผู้ผลิต ซึ่งในอดีตมีเพียงการวางแผนโดยใช้วิจารณ์ของพนักงานขายแต่ละคน ทำให้เกิดปัญหาความไม่สมดุลกันของระดับสินค้าคงคลัง คือ ในบางเดือนมีสินค้าคงคลังมากเกินไปจนความต้องการทำให้ต้นทุนโดยรวมสูงขึ้น และในขณะที่บางเดือนกลับมีสินค้าไม่เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า ทำให้ไม่สามารถส่งมอบสินค้าให้กับ

ลูกค้าได้ในเวลาที่ต้องการ ผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาระบบบริหารสินค้าคงคลังเพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้มากที่สุดด้วยต้นทุนสินค้าคงคลังที่ต่ำที่สุด โดยในส่วนของ การปรับปรุงนโยบายสินค้าคงคลัง ได้ทำการพัฒนานโยบายการสั่งซื้อ การหาปริมาณสินค้าเพื่อขาดและการหาจุดสั่งซื้อใหม่ที่เหมาะสม จากนั้นทำการทดสอบแบบจำลองดังกล่าวเพื่อตรวจสอบว่าการปรับปรุงและพัฒนา ระบบสินค้าคงคลังที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่นั้นสามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาที่ต้องการได้หรือไม่ ผลการทดสอบที่ได้พบว่าการใช้ระบบบริหารสินค้าคงคลังตามวิธีที่เสนอแนะ ทำให้ต้นทุนสินค้าคงคลังโดยรวมลดลงได้มากกว่า 60% ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแข่งขันกับคู่แข่ง รวมทั้งประสิทธิภาพในการตอบสนองความต้องการของลูกค้าดีขึ้นด้วย

2.3 แนวคิดที่ได้รับจากการศึกษา

จากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาและค้นคว้าทั้งหมดนั้น ทำให้ทราบถึงข้อดี-ข้อด้อยของแต่ละงานวิจัย ซึ่งช่วยให้ผู้ทำวิจัยเล็งเห็นถึงผลที่คาดว่าจะได้รับจากการนำวิธีการพยากรณ์ต่าง ๆ ไปประยุกต์ใช้ โดยทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการพยากรณ์และสามารถนำไปพัฒนาปรับปรุงงานวิจัยที่ต้องการหาตัวแบบการพยากรณ์ยอดขายเพื่อลดปริมาณสินค้าคงคลังสำหรับผู้จัดจำหน่ายชิ้นส่วนอะไหล่ยานยนต์ ซึ่งพบว่าการพยากรณ์โดยใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบบอซ-เจนกินส์ ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การพยากรณ์ด้วยอนุกรมเวลาทั่วไป สำหรับผลประโยชน์เบื้องต้นที่ได้คือตัวแบบการพยากรณ์ที่แม่นยำซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้การตัดสินใจที่เกี่ยวข้องมีความผิดพลาดน้อยที่สุด เช่น การบริหารจัดการสินค้าคงคลังจะมีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยอ้างอิงจากหลายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการสินค้าคงคลัง มักจะมีข้อจำกัดเสมอว่า การพยากรณ์ความต้องการยังแม่นยำมากเท่าใด จะส่งผลให้การบริหารจัดการคงคลังมีประสิทธิภาพมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการจะศึกษาหา รูปแบบการพยากรณ์ที่เหมาะสมกับข้อมูลยอดขายอะไหล่ยานยนต์ และเพื่อเป็นการเพิ่ม

ประสิทธิภาพในการบริหารจัดการสินค้าคงคลังให้สูงขึ้น ผู้วิจัยจึงได้นำทฤษฎีการบริหารจัดการสินค้าคงคลังมาใช้ในการวิเคราะห์และปรับปรุงนโยบายสินค้าคงคลังของบริษัทกรณีศึกษา เพื่อหาปริมาณการจัดเก็บสินค้าคงคลังที่เหมาะสมกับลักษณะของอุปสงค์ อุปทานและรูปแบบของธุรกิจ โดยมีต้นทุนที่ลดลงแต่ยังคงรักษาระดับการให้บริการลูกค้าได้ตามเป้าหมาย โดยผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

แนวคิดในการปรับปรุงนโยบายการจัดเก็บสินค้ากันชนหน้า สำหรับผู้จัดจำหน่ายชิ้นส่วนอะไหล่ยานยนต์ จึงแบ่งเป็น 2 ประเด็น คือ

- การปรับปรุงวิธีการพยากรณ์ยอดขายให้มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดย $MAPE \leq 20\%$
- การหาวิธีการกำหนดปริมาณสินค้าคงคลังให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น เพื่อให้ต้นทุนลดลงแต่ยังคงรักษาระดับการให้บริการลูกค้าได้ตามเป้าหมายของบริษัท โดยใช้ Inventory Target และ %Allocation เป็นตัววัดประสิทธิภาพของนโยบายทั้งก่อนและหลังการปรับปรุง ผู้วิจัยจึงทำการปรับปรุงตามกรอบแนวคิดและวิธีการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์และการเลือกใช้ข้อมูลในการศึกษา

ดังที่กล่าวข้างต้น เนื่องจากจำนวนรุ่นรถที่หลากหลายมากขึ้น และการให้บริการอะไหล่ด้วยระยะเวลาที่ยาวนานถึง 20 ปี แน่นอนว่าจำนวนรายการสินค้าและปริมาณการจัดเก็บต้องมากขึ้น ซึ่งหากทำการศึกษาแบบจำลองให้เหมาะสมกับกันชนหน้าทั้ง 84 รายการ ต้องใช้ระยะเวลาศึกษานาน จึงทำการคัดเลือกข้อมูลเพื่อนำมาใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาหาแบบจำลองการพยากรณ์ โดย

- 1) นำข้อมูลปริมาณสินค้าคงคลังของกันชนหน้าทุกรายการมาพิจารณา
- 2) เลือกตัวแทนจากกันชนหน้าทั้งหมด 84 รายการ โดยเลือกรายการที่มี Stock Level สูงที่สุด และรายการ

ที่มี %Allocation (ความสามารถในจัดส่งสินค้าให้แก่ลูกค้า) ต่ำที่สุด จากแต่ละ Class (A, B, C และ D) เพื่อสร้างตัวแบบการพยากรณ์ให้เหมาะสมกับกันชนหน้าแต่ละ Class

3) รายการที่เลือกมามีทั้งหมด 8 ชุดข้อมูล ได้แก่ สินค้า Class A รหัส 1SWAAA01 และ 1SWE00ZZ สินค้า Class B รหัส 5TG000ZZ และ 5TC001ZK สินค้า Class C รหัส 1S9AA000 และ 5SDE20ZZ สินค้า Class D รหัส 5S9E20ZZ และ 1S9E40ZZ

4) ข้อมูลที่ใช้ในการหาตัวแปรในการสร้างสมการพยากรณ์สำหรับข้อมูลยอดขายกันชนหน้ารายเดือนของแต่ละรายการ ตั้งแต่ต้นเดือนมกราคม 2554 ถึงสิ้นเดือนธันวาคม 2558 รวมทั้งหมด 60 เดือน ได้ทดสอบแล้วว่าข้อมูลยอดขายกันชนหน้าทั้ง 8 รายการที่ใช้เป็นตัวแทนมีการแจกแจงแบบปกติ ทดสอบโดยใช้วิธีการทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น (Confidence Level) 95% และกำหนดระดับนัยสำคัญ (Level of Significant) หรือ $\alpha = 0.05$

5) ข้อมูลที่ใช้ในการหาตัวแปรเพื่อสร้างสมการพยากรณ์สำหรับข้อมูลยอดขายกันชนหน้ารายเดือนของแต่ละรายการ ตั้งแต่ต้นเดือนมกราคม 2554 ถึงสิ้นเดือนธันวาคม 2558 รวมทั้งหมด 60 เดือน มีลักษณะเป็นแนวโน้ม โดยไม่มีอิทธิพลของฤดูกาลเข้ามาเกี่ยวข้อง

3.2 การทดสอบความนิ่งของข้อมูล

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบออโต (ACF) และการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบออโตบางส่วน (PACF) เป็นขั้นตอนแรกสำหรับการวิเคราะห์อนุกรมเวลาที่มีสมบัตินิ่ง โดยการนำอนุกรมเวลาที่ต้องการหาค่าพยากรณ์มาคำนวณหาค่า ACF และ PACF เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดรูปแบบหรือใช้ในการเลือกตัวแบบ ซึ่งจะบอกถึงลำดับหรือจำนวนเทอมของข้อมูลที่ต้องพิจารณาย้อนหลังที่มีค่าสังเกต N เทคนิคการพยากรณ์เชิงปริมาณ โดยเทคนิคทางสถิติผู้พยากรณ์ต้องแน่ใจว่าข้อมูลที่นำมาพยากรณ์เหมาะสมที่จะใช้วิเคราะห์เพียงใด จึงควรวิเคราะห์รูปแบบข้อมูลก่อน

ว่าข้อมูลดังกล่าวมีลักษณะใด มีส่วนประกอบใดอยู่ในข้อมูล เพื่อที่จะเลือกวิธีการพยากรณ์ได้อย่างเหมาะสม เพราะหากข้อมูลที่นำมาใช้ไม่มีความถูกต้องตั้งแต่เริ่มต้น แม้ว่าขั้นตอนการพยากรณ์จะถูกต้องก็ตาม แต่ไม่อาจทำให้ค่าพยากรณ์ที่ได้นั้นมีความแม่นยำสูงเท่าที่ควร

3.3 การศึกษาแบบจำลองการพยากรณ์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

เทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving average method) เป็นวิธีการหาค่าเฉลี่ยจากการปรับความผันผวนของข้อมูลที่เกิดขึ้นในระยะสั้น โดยการหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของข้อมูลจริงในอดีต ซึ่งวิธีการหาค่าเฉลี่ยอย่างง่าย เป็นการนำค่าเฉลี่ยทุก ๆ ตัวมาใช้ในการพยากรณ์ โดยกำหนดค่า n ที่ใช้เฉลี่ยต่อครั้ง หากสนใจข้อมูลในระยะเวลาที่ไกลออกไปจากข้อมูลปัจจุบัน สามารถใช้เทคนิคนี้ในการคำนวณจากสมการ 2.1 ดังนี้

$$F_{t+1} = \frac{(A_t + A_{t-1} + A_{t-2} + \dots + A_{t-n+1})}{n} \quad (2.1)$$

โดยที่

A_t เป็นข้อมูลจริง ณ เวลา t

$F_{(t+1)}$ เป็นค่าพยากรณ์ 1 ช่วงเวลาล่วงหน้า

n เป็นจำนวนข้อมูลที่ใช้เฉลี่ยต่อครั้ง

3.4 การศึกษาแบบจำลองการพยากรณ์ด้วยวิธีการปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลแบบโฮลท์

เทคนิคการปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลแบบโฮลท์ (Holt's exponential smoothing method) สามารถวิเคราะห์ข้อมูลทั้งที่มีแนวโน้ม (Trend) จากสมการ 2.3 นอกจากนี้ยังมีสมการ 2.2 ที่ใช้ปรับเรียบข้อมูลด้วย จึงเป็นวิธีที่ให้ความสำคัญกับข้อมูลในปัจจุบันและแนวโน้มของเวลาเข้ามามีอิทธิพลกับการพยากรณ์มากขึ้น ทำให้วิธีนี้มีค่าคงที่ในการปรับเรียบทั้งหมด 2 ค่า ได้แก่ α (Alpha) และ β (Beta) โดยไม่มีอิทธิพลของฤดูกาลเข้ามาเกี่ยวข้อง สำหรับสมการที่ใช้ในการพยากรณ์ตามวิธีของ Holt สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.4

สมการค่าปรับเรียบ

$$S_t = \alpha \frac{A_t}{I_{t-L}} + [(1 - \alpha)(S_{t-1} + T_{t-1})] \quad (2.2)$$

สมการประมาณค่าแนวโน้ม

$$T_t = \beta(S_t - S_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \quad (2.3)$$

สมการการพยากรณ์

$$F_{t+p} = (S_t - T_t p)I_{t-L+p} \quad (2.4)$$

โดยที่

S_t = ค่าปรับเรียบ

α = ค่าคงที่ปรับเรียบ ($0 < \alpha < 1$)

A_t = ค่าจริงในเวลา t

β = ค่าคงที่ปรับเรียบของแนวโน้ม ($0 < \beta < 1$)

T_t = ตัวประมาณแนวโน้ม

p = จำนวนช่วงที่ต้องการพยากรณ์ล่วงหน้า

F_{t+p} = ค่าพยากรณ์ข้อมูลที่เวลา p

3.5 การศึกษาแบบจำลองการพยากรณ์ด้วยวิธีการบอซ-เจนกินส์ หรือ ARIMA

วิธีการวิเคราะห์อนุกรมเวลาของบอซ-เจนกินส์ หรือ ARIMA ด้วยการใช้ความสัมพันธ์ของข้อมูลในอดีตเพื่อแสดงพฤติกรรมของข้อมูล และนำมาเป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาค่าพยากรณ์เพื่อแสดงพฤติกรรมของข้อมูลในอนาคต เทคนิคนี้จะผู้พยากรณ์ต้องมีข้อมูลในอดีตจำนวนมากพอสมควร โดยจะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสังเกต Y และเวลาตำแหน่ง t ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าสังเกตในช่วงเวลาอดีตระหว่าง Y_t กับ Y_{t-1} และนำมาใช้พยากรณ์ค่าในอนาคต Y_{t+1} ได้แบบจำลอง ARIMA มักนำมาใช้พยากรณ์ข้อมูลระยะสั้นหรือปานกลางเท่านั้น ไม่นิยมนำมาใช้พยากรณ์ในระยะยาว โดยแบบจำลอง ARIMA มีสมมติฐานว่าค่าสังเกตปัจจุบันมีความสัมพันธ์เป็นกระบวนการเชิงเส้นระหว่างค่าสังเกตและค่าความคลาดเคลื่อนในอดีต

3.6 การศึกษาแบบจำลองเพื่อกำหนดปริมาณสินค้าคงคลังให้มีความเหมาะสม

3.6.1 การตัดสินใจเกี่ยวกับการจัดการสินค้าคงคลัง

- ✓ ควรสั่งซื้อสินค้าเมื่อไร บ่อยแค่ไหน (ความถี่) และแต่ละครั้งห่างกันเท่าไร (Timing)
- ✓ ควรสั่งซื้อสินค้าครั้งละเท่าไร (Quantity)
- ✓ ควรมีสินค้าคงคลังสำรองไว้บ้างหรือไม่ ด้วยจำนวนเท่าใด (Safety Stock)

3.6.2 การกำหนดปริมาณสินค้าคงคลังสำรอง (Safety Stock)

- ความถูกต้องในการพยากรณ์ (Forecast Accuracy) ถ้าความถูกต้องในการพยากรณ์มากจะช่วยให้ปริมาณ Safety Stock มีความเหมาะสม สามารถบรรลุเป้าหมายขององค์กรได้

- เป้าหมายการบริการลูกค้า (Target Service Level) ถ้าเราตั้งเป้าหมายในการบริการลูกค้าไว้สูง จะต้องเก็บ Safety Stock ในปริมาณมากขึ้น

- ความถี่ในการเติมเต็ม (Replenishment Frequency) ถ้าเราสามารถเติมเต็มสินค้าคงคลังได้บ่อย ๆ จะสามารถลดปริมาณ Safety Stock ลงได้ เนื่องจากเรามีโอกาสถี่ขึ้นที่จะสั่งซื้อสินค้าเข้ามาเพิ่ม

- เวลานำ (Lead Time) ถ้าเวลานำในการเติมเต็มสินค้าคงคลังลดลง เราสามารถลดปริมาณ Safety Stock ลงได้ เนื่องจากเราสามารถสั่งซื้อสินค้ามาเพิ่มได้โดยใช้เวลาน้อยลงในการรอคอย

3.6.3 ความถูกต้องในการพยากรณ์

ภายใต้วัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาตัวแบบการพยากรณ์ยอดขายกันชนหน้าที่มีความแม่นยำ และมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งจะช่วยลดเวลานำลดลงจาก 2 เดือน เหลือเพียง 1 เดือน จากนั้นขั้นตอนต่อไปคือ การพิจารณาหาวิธีการกำหนดปริมาณสินค้าคงคลังของกันชนหน้าที่ให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นด้วยการเปรียบเทียบ Inventory Target ที่ได้จากการจัดเก็บด้วยวิธีการปัจจุบันของบริษัทกรณีศึกษา กับวิธีการที่ทำการปรับปรุงและทดสอบจากงานวิจัยฉบับนี้ เพื่อให้

ต้นทุนลดลงแต่ยังคงรักษาระดับการให้บริการลูกค้าได้ตามเป้าหมายของบริษัท

3.6.4 การวิเคราะห์สภาพปัญหาสำหรับนโยบายคงคลังในปัจจุบันของกันชนหน้า

สำหรับรายการสินค้าที่ใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาในงานวิจัยนี้ มีทั้งหมด 8 รายการ ซึ่งตามข้อตกลงระหว่างบริษัทกับ Vendor จะมีการสั่งซื้อเป็นรายเดือน ในทุก ๆ วันที่ 15 ของแต่ละเดือน จึงมีการพิจารณาระดับสินค้าคงคลังแบบ Periodic Review คือ ระบบที่มีการพิจารณาระดับสินค้าเป็นช่วงๆ และมีนโยบายการสั่งซื้อแบบรอบการสั่งคงที่ (Periodic Order Quantity: POQ)

ปัญหานโยบายของบริษัทกรณีศึกษาในปัจจุบัน คือ

(1) ระดับสินค้าคงคลังสำรอง (Safety Stock) มีการจัดเก็บเป็นหน่วยของระยะเวลา โดยกันชนหน้าทุกรายการจะมีสินค้าคงคลังสำรองจำนวน 2 เดือนเท่ากันหมด ซึ่งในความเป็นจริงกันชนหน้าแต่ละรายการมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุปสงค์ในแต่ละเดือนแตกต่างกัน เห็นได้ว่าวิธีการดังกล่าวไม่สามารถรองรับระดับการให้บริการลูกค้าซึ่งเป็นเป้าหมายหลักของบริษัทได้ หรือในทางกลับกันบริษัทอาจต้องเก็บสินค้าคงคลังปริมาณมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น

(2) ระดับสินค้าคงคลังตามเป้าหมาย (Inventory Target) พนักงานส่วนมากนำอุปสงค์ของเดือนล่าสุดมาใช้เป็นอุปสงค์ต่อเดือน ซึ่งหากนำค่าอุปสงค์ที่ไม่มีคามแม่นยำมาใช้ ย่อมส่งผลให้มีการเก็บสินค้าคงคลังตามเป้าหมายมีปริมาณไม่เหมาะสม ปัจจุบันบริษัทมีการกำหนดปริมาณการสั่งซื้อในแต่ละรอบ โดยพิจารณาจากจำนวนสินค้าทั้งหมดในระบบที่สามารถนำมาส่งมอบให้ลูกค้าได้ (Total Availability: TA) และระดับสินค้าคงคลังตามเป้าหมาย (Inventory Target) จากรายละเอียดของบริษัทกรณีศึกษาที่อธิบายไว้ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า

- ✓ บริษัทต้องสั่งซื้อสินค้าทุก ๆ วันที่ 15 ของเดือน
- ✓ ปริมาณที่ควรสั่งซื้อสินค้า พิจารณาจากปริมาณสินค้าคงคลังที่ต้องจัดเก็บ—จำนวนสินค้า

ทั้งหมดในระบบที่สามารถนำมาส่งมอบให้ลูกค้าได้ หรือ

$$\text{Order Quantity} = \text{Inventory Target} - \text{TA}$$

✓ มีสินค้าคงคลังสำรองสำหรับสินค้าทุกรายการจำนวน 2 เดือนเท่ากัน โดยไม่พิจารณาถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุปสงค์ของกันชนหน้าในแต่ละ Class ในแต่ละเดือนแตกต่างกัน

ตารางที่ 2 วิธีการกำหนดปริมาณสินค้าคงคลังกันชนหน้าของบริษัทกรณีศึกษาที่ใช้ปัจจุบัน

สินค้าคงคลังสำรอง (Safety Stock)	เก็บจำนวน 2 เดือน เท่ากัน
สินค้าคงคลังตามเป้าหมาย (Stock Target)	$\text{Stock Target} = \text{Demand} \times (\text{Order cycle} + \text{Lead time} + 2)$

จากตารางวิธีการกำหนดปริมาณสินค้าคงคลังของบริษัทกรณีศึกษาที่ใช้ปัจจุบัน พบว่าวิธีการของบริษัทกรณีศึกษายังมีจุดด้อยของวิธีการจัดเก็บสินค้าคงคลังสำรอง (Safety Stock) ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อปริมาณสินค้าคงคลังทั้งหมด เพราะวิธีการของบริษัทไม่นำ Service Level และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: σ_d) ของอุปสงค์มาประกอบการคำนวณ ในปัจจุบันบริษัทกำหนด Safety Stock ของสินค้าทุกรายการจำนวน 2 เดือนเท่ากัน ทำให้ปริมาณสินค้าคงคลังที่จัดเก็บเพื่อรองรับ Service Level ยังมีปริมาณไม่เหมาะสมเท่าที่ควร ซึ่งอาจมากเกินไป และหากในอนาคตบริษัทมีนโยบายปรับเปลี่ยน Service Level ของสินค้าแต่ละ Class ไม่เท่ากัน จะส่งผลให้บริษัทไม่สามารถตัดสินใจปริมาณสินค้าคงคลังที่ต้องจัดเก็บให้มีความเหมาะสมได้ ทั้งยังไม่นำการกระจายหรือความแตกต่างของข้อมูลอุปสงค์ (σ_d) มาใช้ในการพิจารณา ซึ่งสินค้าในแต่ละ Class มีการกระจายของข้อมูลยอดขายในแต่ละเดือนแตกต่างกัน และหากอุปสงค์ในอนาคตมีการกระจายตัวเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลา จะทำให้ปริมาณสินค้าคงคลังที่จัดเก็บไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอในการรองรับอุปสงค์ในอนาคต

3.7 แนวทางการกำหนดปริมาณสินค้าคงคลังให้เหมาะสม

นำค่าพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบที่ดีที่สุดมาแทนค่าเพื่อหาวิธีการปรับปรุงนโยบายการจัดเก็บสินค้าคงคลังของบริษัทกรณีศึกษาให้มีความเหมาะสมมากขึ้น พร้อมทั้งนำนโยบายปัจจุบันและนโยบายที่เหมาะสมมากขึ้นจากการทดสอบในงานวิจัยนี้ มาวิเคราะห์หาสัดส่วนระหว่างปริมาณสินค้าคงคลังและยอดขายจริง โดยใช้ Inventory Target และ %Allocation เป็นตัววัดประสิทธิภาพของนโยบายทั้งก่อนและหลังการปรับปรุง จากนั้นทำการสรุปผลนโยบายการจัดเก็บสินค้าคงคลังของกันชนหน้าที่เหมาะสมสำหรับบริษัทกรณีศึกษา

ตารางที่ 3 นโยบายคงคลังก่อนและหลังปรับปรุง

สินค้าคงคลังสำรอง (Safety Stock)	บริษัทกรณีศึกษา	กันชนหน้าทุกรอบการเก็บจำนวน 2 เดือน เท่ากัน
	Base Stock Level	
	Policy	$Z(\sigma_d) \times \sqrt{T+LT}$
สินค้าคงคลังทั้งหมด (Inventory)	บริษัทกรณีศึกษา	Stock Target = Demand(T + LT + 2)
	Base Stock Level	
	Policy	$Base\ Stock = Demand(T + LT) + \frac{Z(\sigma_d) \times \sqrt{T+LT}}{2}$

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการนาอ็ฟ

ตารางที่ 4 MAPE ของการคำนวณโดยใช้วิธีนาอ็ฟ

Class	รายการสินค้า	MAPE %
A	1SWAAA01	12.45%
A	1SWE00ZZ	15.52%
B	5TG000ZZ	22.75%
B	5TC001ZK	34.34%
C	1S9AA000	19.54%
C	5SDE20ZZ	18.12%
D	5S9E20ZZ	29.46%
D	1S9E40ZZ	24.87%

ค่า MAPE ของสินค้าใน Class B และ D ทั้ง 2 รายการ สูงเกิน 20% ซึ่งในงานวิจัยนี้ถือว่าไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นวิธีการคำนวณโดยใช้สมการนาอ็ฟ จึงไม่สามารถถูกนำมาใช้เป็นวิธีการพยากรณ์ของบริษัทกรณีศึกษาได้ แม้ว่าค่า MAPE ของสินค้าใน Class A และ C ทั้ง 2 รายการ จะอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ก็ตาม

4.2 ผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย

ตารางที่ 5 MAPE ของการคำนวณโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่าย

Class	รายการสินค้า	MAPE %
A	1SWAAA01	10.19%
A	1SWE00ZZ	22.89%
B	5TG000ZZ	14.90%
B	5TC001ZK	17.81%
C	1S9AA000	11.70%
C	5SDE20ZZ	14.12%
D	5S9E20ZZ	24.74%
D	1S9E40ZZ	21.95%

ค่า MAPE ของสินค้าใน Class A จำนวน 1 รายการ และสินค้าใน Class D ทั้ง 2 รายการ สูงเกิน 20% ซึ่งในงานวิจัยนี้ถือว่าไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นการคำนวณโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่ายจึงไม่สามารถถูกนำมาใช้เป็นวิธีการพยากรณ์ของบริษัทกรณีศึกษาได้ แม้ว่าค่า MAPE ของสินค้าในรายการอื่น ๆ จะอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ก็ตาม

4.2 ผลการศึกษาจากการพยากรณ์โดยใช้วิธีปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลแบบไฮลท์

ตารางที่ 6 MAPE ของการคำนวณโดยใช้วิธีปรับเรียบเอกซ์โพเนนเชียลแบบไฮลท์

Class	รายการสินค้า	MAPE %
A	1SWAAA01	12.80%
A	1SWE00ZZ	20.25%
B	5TG000ZZ	14.20%
B	5TC001ZK	21.60%
C	1S9AA000	11.40%
C	5SDE20ZZ	13.29%
D	5S9E20ZZ	24.55%
D	1S9E40ZZ	17.21%

ค่า MAPE ของสินค้าใน Class A, B และ D จำนวน Class ละ 1 รายการ สูงเกิน 20% ซึ่งในงานวิจัยนี้

ถือว่าไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นการคำนวณโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่อย่างง่ายจึงไม่สามารถถูกนำมาใช้เป็น

วิธีการพยากรณ์ของบริษัทกรณีศึกษาได้ แม้ว่าค่า MAPE ของสินค้าในรายการอื่นๆ จะอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ก็ตาม

4.3 ผลการศึกษาจากการพยากรณ์ด้วยวิธีบอซซ์ – เจนกินส์ เป็นดังตารางที่ 4.4

เป็นดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 MAPE ของการคำนวณโดยใช้วิธีบอซซ์ – เจนกินส์

Class	รายการสินค้า	MAPE %				
		12 เดือน	24 เดือน	36 เดือน	48 เดือน	60 เดือน
A	1SWAA01	13.13%	15.39%	13.40%	14.43%	13.68%
A	1SWE00ZZ	16.85%	18.50%	23.63%	25.03%	22.11%
B	5TG000ZZ	15.48%	13.24%	13.52%	13.86%	13.32%
B	5TC001ZK	24.20%	18.46%	19.83%	19.73%	19.31%
C	1S9AA000	15.59%	15.56%	25.02%	27.01%	16.86%
C	5SDE20ZZ	21.58%	19.62%	20.60%	27.83%	26.26%
D	5S9E20ZZ	25.40%	21.37%	19.70%	19.70%	23.79%
D	1S9E40ZZ	18.40%	17.85%	17.85%	16.96%	18.71%

ค่า MAPE ของสินค้าทุกรายการอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ <20% โดยสินค้าแต่ละ Class นั้นใช้ข้อมูลยอดขายจริงในอดีตด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกัน เนื่องจากสินค้าในแต่ละ Class มีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงของอุปสงค์ที่ต่างกัน โดย Class A เป็นกลุ่มสินค้าที่มีการเคลื่อนไหวเร็ว (Fast Moving) และเป็น Model ล่าสุด ค่า MAPE ที่ยอมรับได้จึงได้จากข้อมูลยอดขายย้อนหลังเพียง 12 เดือน สำหรับ Class B และ C เป็นสินค้าที่มีการเคลื่อนไหวปานกลาง (Medium Moving) จึงได้จากข้อมูลยอดขายย้อนหลัง 24 เดือน และสินค้าใน Class D เป็นสินค้าที่มีการเคลื่อนไหวน้อย (Slow Moving) จึงได้จากข้อมูลยอดขายย้อนหลังระยะยาว นานถึง 48 เดือน

4.4 ผลการศึกษาจากการแบบจำลอง เพื่อหาแนวทางในการกำหนดปริมาณสินค้าคงคลังให้มีความเหมาะสม

นำค่าพยากรณ์ที่มีความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ ซึ่งได้จากการทดลองนี้ มาทดสอบโดยใช้ข้อมูลย้อนหลังเพื่อหาปริมาณของสินค้าคงคลังทั้งหมด แล้วนำมาเปรียบเทียบระหว่างนโยบายปัจจุบันของบริษัทและนโยบาย Base Stock ซึ่งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 8 ปริมาณสินค้าคงคลังที่ต้องจัดเก็บเมื่อเทียบกับความต้องการใช้งานจริงต่อเดือนของนโยบายก่อนและ

Month	Inventory	
	Current Policy	New Policy
Jan-16	5.4	4.3
Feb-16	5.1	4.3
Mar-16	5.3	4.4
Apr-16	5.1	4.0
May-16	5.4	4.2
Jun-16	5.1	3.8
Jul-16	5.2	3.9
Aug-16	4.9	3.7
Sep-16	5.3	3.9
Oct-16	5.1	3.8
Nov-16	5.8	4.4
Dec-16	4.7	3.6
Average	5.2	4.0

5. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากการศึกษา ทำให้ได้เทคนิคการพยากรณ์ยอดขายด้วยวิธีบอซซ์-เจนกินส์ และได้จำนวนเดือนของข้อมูลยอดขายที่ใช้ในการหาตัวแบบการพยากรณ์ที่มีความ

เหมาะสมกับสินค้าแต่ละกลุ่ม โดยสินค้าใน Class A ใช้ข้อมูลยอดขายย้อนหลัง 12 เดือน, Class B และ C 24 เดือน และ Class D 48 เดือน ทั้งยังได้นโยบาย Base Stock ที่มีความเหมาะสมกับบริษัทกรณีศึกษามากยิ่งขึ้น โดยความสามารถในการจัดส่งสินค้าเฉลี่ยในแต่ละเดือนมากกว่า 80% ซึ่งเป็นระดับที่องค์กรยอมรับได้ และปริมาณสินค้าคงคลังที่ต้องจัดเก็บเมื่อเทียบกับความต้องการใช้งานจริงต่อเดือน ลดลงจาก 5.2 เท่า เหลือ 4 เท่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากสินค้าที่ศึกษาเป็นกันชนหน้ารถยนต์ที่ต้องให้บริการนานถึง 20 ปี ทำให้กันชนหน้าแต่ละรายการต้องแบ่งตามความถี่ในการเคลื่อนไหว โดยในแต่ละ Class มีกันชนหน้าหลายรายการซึ่งก็มีลักษณะของอุปสงค์ที่ขึ้นอยู่กับจำนวนยอดขายรถยนต์ของบริษัทแม่และลักษณะการใช้งานของรถยนต์แต่ละรุ่น ดังนั้นเพื่อหา นโยบายที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น จึงควรศึกษากันชนหน้าทุกรายการเพื่อประสิทธิภาพสูงสุดของการจัดการสินค้าคงคลัง

เอกสารอ้างอิง

- [1] จิราพร เจตนาภิวัฒน์. การปรับปรุงระบบบริหารสินค้าคงคลังสำหรับสินค้าสำเร็จรูปของบริษัทจัดจำหน่ายสี่ล้อแบบไม่มี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาการจัดการด้านโลจิสติกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [2] จิราวรรณ ไตรนามคม. การปรับปรุงการควบคุมสินค้าสำเร็จรูปคงคลัง: กรณีศึกษาโรงงานผสมน้ำมันหล่อลื่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [3] ชุตินา วัชรสิทธิโชค. การพัฒนาระบบบริหารสินค้าคงคลังสำหรับสินค้าแฟชั่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาการจัดการด้านโลจิสติกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [4] ดวงแข เวชศาสตร์. การควบคุมพัสดุคงคลังและการออกแบบอุปกรณ์จัดเก็บ: กรณีศึกษาองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- [5] ถาวร พุทธคุณ และ วรนนท์ ปิยะโรจนานุกูล. การพยากรณ์ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าเหล็กแผ่นรีดร้อนของประเทศไทยโดยเทคนิคการวิเคราะห์อนุกรมเวลาด้วยวิธีการพยากรณ์ของบอซ-เจนกินส์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2545.
- [6] นริสา สมุทรสาคร. การพยากรณ์ราคาทองคำด้วยวิธี ARIMA หรือวิธีการของบอซ-เจนกินส์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, คณะเศรษฐศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2548.
- [7] มณฑิรา นุชภู. การปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบคลังพัสดุ: กรณีศึกษาโรงงานประกอบเครื่องยนตการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [8] วัชรินทร์ แสงมา และ พิษณุ ทองขาว. การวิเคราะห์ระบบอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าของไทย: กรณีศึกษาการวางแผนและควบคุมการผลิตโดยไม่คิดค่าใช้จ่ายสินค้าขาดมือในช่วงเวลาที่มีจำกัด. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2553.

- [9] ณัฐนารี สุขเสกสรร และ ศศิพร สร้อยระย้า. การกำหนดนโยบายวัตถุดิบคงคลังที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โล กรณีศึกษา บริษัทเคมีภัณฑ์ทำความสะอาดและเคมีภัณฑ์สำหรับระบบบำบัดน้ำ. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2559; 23(2).
- [10] สราวุฒิ จินตนาสุนทรศิริ. การใช้วิธีทางสถิติพยากรณ์ราคาปิดรายวันของหลักทรัพย์ในตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย. *วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 2548.
- [11] ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ. ระบบพัสดุคงคลัง. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [12] สุมิตรา อมรรวพัตร์. การเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในส่วนภูมิภาค. *วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาสถิติ คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2542.
- [13] หทัยรัตน์ ดั่งสูงเนิน. การพัฒนาระบบการจัดการคลังสินค้าสำหรับผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ขนาดเล็ก. *วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาการจัดการด้านโลจิสติกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2548.
- [14] Babai, M. Z., Ali, M. M. and Boylan, J. E. Forecasting and Inventory Performance in a Two-Stage Supply Chain with ARIMA (0,1,1) Demand: Theory and Empirical Analysis. *International Journal of Production Economics*, 2013, 143(2): 463-471.
- [15] Bianchi, L., Jarrett, J. and Hanumara, R. C. Improving Forecasting for Telemarketing Centers by ARIMA Modeling with Intervention. *International Journal of Forecasting*, 1998; 14(4): 497-504.
- [16] Mercado, Ed C. Hand-On Inventory Management. New York: Auerbach Publication, 2008.
- [17] Jaijit, S. and Sachakamol, P. Applied Methodologies of Work Study, Forecasting and Inventory Management Techniques for Pharmaceutical's Warehouse Management: Atlanta Medicare Co.,Ltd. *Engineering Journal*, Chiangmai University, 2016; 23(3): 33-43.
- [18] Wang, C. C. A Comparison Study between Fuzzy Time Series Model and ARIMA Model for Forecasting Taiwan Export. *Expert Systems with Applications*, 2011; 38(8): 9296-9304.



การสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในน้ำพลาสมา ด้วยระบบพลาสมาไกลดิงอาร์ค

Synthesis of Hydroxyl Radical in Plasma-activated Water by Gliding Arc Plasma

พฤติพงศ์ พฤติกุล* และ คมกฤต เล็กสกุล

Pruetipong Pruetikun* and Komkrit Leksakul

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 239 ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

Faculty of Engineering, Chiang Mai University, 239, Suthep, Muang, Chiang Mai, 50200, Thailand

*E-mail: piaro@windowslive.com, Tel.: 088-776-8646

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในรูปน้ำพลาสมาด้วยระบบพลาสมาไกลดิงอาร์ค โดยเบื้องต้นได้ทดลองสร้างสภาวะพลาสมา แล้วทำการวัดแสงพลาสมาด้วยเครื่องออปติคัลอิมิตชันสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อยืนยันการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิล จากนั้นจึงทดลองเปรียบเทียบการใช้น้ำกลั่นและไมโครบับเบิลเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิล รวมถึงศึกษาพฤติกรรมการคงอยู่ของอนุมูลไฮดรอกซิลในรูปไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ทำการศึกษาลำดับปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลโดยใช้แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน ผลการวัดแสงพลาสมาพบว่า มีค่าพีคที่ความยาวคลื่น 310 nm เกิดขึ้นสูง หมายถึง ระบบพลาสมาไกลดิงอาร์คสามารถสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลได้ และพบว่าการใช้ไมโครบับเบิลเป็นวัตถุดิบสามารถสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลได้ดีกว่าน้ำกลั่น โดยการคงอยู่ของอนุมูลไฮดรอกซิลในรูปไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มีแนวโน้มว่าความเข้มข้นลดลงตามเวลา ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลมีนัยสำคัญมีทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า อัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอน และอัตราส่วนการผสมก๊าซออกซิเจน

คำสำคัญ: อนุมูลไฮดรอกซิล ระบบพลาสมาไกลดิงอาร์ค น้ำพลาสมา ไมโครบับเบิล

ABSTRACT

This research aimed to study the synthesis of hydroxyl radicals in form of plasma-activated water by gliding arc plasma. Initially, plasma experiments were conducted to confirm the occurrence of hydroxyl radical by using optical emission spectrophotometer, and then compared the use of distilled water and microbubble as raw material for the synthesis of hydroxyl radicals. Then, the existence of hydroxyl radicals in the form of hydrogen peroxide was studied. Finally, the factors that affect the synthesis of hydroxyl radical from are investigated by using fractional factorial experiments. Plasma measurements show that the peak at 310 nm occurs, meaning that the gliding arc plasma can synthesize hydroxyl radicals. It was found that the use of microbubble as a raw material could better synthesize hydroxyl radicals than distilled water. In addition, the existence of hydroxyl radical in the form of hydrogen peroxide is likely to decrease with time. Finally, the factors that affect the synthesis of hydroxyl radicals are amount of sodium bicarbonate, gap between electrodes, argon flow rate, and oxygenation ratio.

Keyword: Hydroxyl Radical, Gliding Arc Plasma, Plasma-activated Water, Microbubble

Received 6 November 2017

Revised 20 July 2017

Accepted 25 December 2017

1. บทนำ

ในประเทศไทย ประชากรส่วนใหญ่ที่ประกอบอาชีพเกษตรกรรมใช้สารกำจัดศัตรูพืช โดยการใช้สารดังกล่าวจะทำให้การเพาะปลูกมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่การใช้สารดังกล่าวจะทำให้เกิดสารพิษที่ตกค้างบนผักผลไม้ซึ่งเมื่อบริโภคจะเกิดผลกระทบต่อสุขภาพทั้งในระยะสั้นและระยะยาว และยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยถูกบางประเทศกีดกันสินค้าที่มีสารพิษตกค้างเกินมาตรฐานทำให้ประเทศสูญเสียรายได้มหาศาล [1] ปัจจุบันการลดสารพิษตกค้างในระดับครัวเรือนสามารถทำได้โดยการล้างผักผลไม้ด้วยน้ำไหล หรือการแช่ในน้ำโดยเติมสารเคมีบางชนิด ได้แก่ น้ำส้มสายชู ค้างทับทิม ผงฟู น้ำเกลือ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งวิธีดังกล่าวสามารถลดสารพิษตกค้างได้ดี เมื่อมีการขจัดผิวและแช่ในระยะเวลาที่นานพอ [2] ซึ่งไม่เหมาะสมในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากใช้เวลานานและต้องใช้แรงงานในการขจัด ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อรูปลักษณะภายนอก ส่งผลให้มูลค่าและอายุในการเก็บรักษาของสินค้าลดลง

ในปัจจุบันมีการพัฒนาแนวคิดการกำจัดสารพิษตกค้างบนผักผลไม้แบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น คือการผลิตสารอนุพลอิสระ โดยเฉพาะอนุพลไฮดรอกซิลแล้วนำไปสลายโมเลกุลสารพิษตกค้างบนผิวผักผลไม้ให้กลายเป็นสารที่ไม่เป็นพิษ หรือเป็นพิษน้อยจนไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค [3] ซึ่งอนุพลดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้รวดเร็ว ไม่ทำให้สี หรือคุณสมบัติภายในของผักหรือผลไม้เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้อนุพลไฮดรอกซิลยังมีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรคบางชนิดได้ [4]

สำหรับการสังเคราะห์อนุพลไฮดรอกซิลนั้นสามารถทำได้หลายวิธีการ เช่น วิธีการฉายรังสี วิธีปฏิกิริยาของเพนตัน วิธีปฏิกิริยาการเร่งปฏิกิริยาดังแสง วิธีไอโซนออกซิเดชัน วิธีออกซิเดชันแบบเปียก วิธีการฉายคลื่นความถี่สูง และวิธีพลาสมาอนุพลต่ำ เป็นต้น [5] โดยแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อจำกัดต่าง ๆ ซึ่งเหมาะกับการใช้ประโยชน์ในแต่ละด้าน โดยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบวิธีการการสังเคราะห์อนุพลไฮดรอกซิล

วิธีการ	ข้อดี - ข้อจำกัด
วิธีการฉายรังสี	ข้อดี - ไม่ใช้สารเคมีอันตราย ข้อจำกัด - ประสิทธิภาพต่ำ
วิธีปฏิกิริยาของเพนตัน	ข้อดี - ใช้พลังงานจากภายนอกน้อย ข้อจำกัด - กระบวนการไม่ต่อเนื่อง และต้องควบคุมสภาพความเป็นกรดของสารละลาย
วิธีปฏิกิริยาการเร่งปฏิกิริยาดังแสง	ข้อดี - มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคและลดสารตกค้างในน้ำ ข้อจำกัด - กระบวนการมีการผลิตสารเคมีอันตราย และไม่เหมาะกับวัตถุที่มีพื้นผิวซับซ้อน
วิธีไอโซนออกซิเดชัน	ข้อดี - ไม่ใช้สารเคมีอันตราย ข้อจำกัด - เกิดก๊าซไอโซนส่งผลกระทบต่อระบบหายใจ และมีประสิทธิภาพที่ต่ำเมื่อใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น
วิธีออกซิเดชันแบบเปียก	ข้อดี - ไม่ใช้สารเคมีอันตราย ข้อจำกัด - อุณหภูมิสารละลายสูง 173-375°C
วิธีการฉายคลื่นความถี่สูง	ข้อดี - ไม่ใช้สารเคมีอันตราย, มีประสิทธิภาพ ข้อจำกัด - อุปกรณ์มีค่าใช้จ่ายสูง และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างสูง
วิธีพลาสมาอนุพลต่ำ	ข้อดี - ไม่ใช้สารเคมีอันตราย และ มีประสิทธิภาพ ข้อจำกัด - ใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างสูง

จากตารางพบว่าพลาสมาอนุพลต่ำเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถสังเคราะห์อนุพลไฮดรอกซิลได้มีประสิทธิภาพ สะอาด และไม่ก่อให้เกิดสารตกค้างชนิดใหม่ [6] โดยที่สามารถควบคุมอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ได้ วิธีดังกล่าวจึงน่าจะเหมาะกับการใช้ลดสารพิษตกค้างบนผิวผลผลิตทางการเกษตร

สำหรับเทคโนโลยีพลาสมาอนุพลต่ำนั้น แต่เดิมได้มีการศึกษาและพัฒนา นำมาใช้ในวงการต่าง ๆ ทั้งด้านการบำบัดน้ำเสียที่จะเกี่ยวข้องกับสารสังเคราะห์อนุพลไฮดรอกซิล เพื่อมาสลายโมเลกุลสารเคมีที่มีความซับซ้อน

เช่น สีย้อม ให้โมเลกุลมีความซับซ้อนน้อยลง [7] หรือด้านการพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ให้มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น นำไฟฟ้าได้ดี น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง โดยจะเกี่ยวกับการสลายโมเลกุลให้มีขนาดเล็กลง เช่น การสังเคราะห์อนุภาคนาโนคาร์บอน [8] หรือด้านการแพทย์ที่มักจะเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์อนุโมลของไฮดรอกซิลและไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ เพื่อนำมาฆ่าเชื้อแบคทีเรีย [9] หรือทำลายเซลล์มะเร็ง [10] ในปัจจุบันนักวิจัยเริ่มขยายขอบเขตการศึกษา โดยนำเทคโนโลยีพลาสมาอุณหภูมิต่ำมาประยุกต์ใช้ในการเกษตรโดยจะสังเคราะห์อนุโมลไฮดรอกซิลในรูปของเหลวที่เรียกว่า น้ำพลาสมา มาใช้ประโยชน์ เช่น การฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus* บนผิวสตรอเบอรี่ [11] หรือเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราบางชนิดในเห็ด [4] และยังมีมีการสังเคราะห์อนุโมลไฮดรอกซิลเพื่อสลายโมเลกุลของยาฆ่าแมลง เช่น ไดคลอโรวอส มาลาโทออน และเอนโดซัลแฟน [12] เป็นต้น

โดยพลาสมาอุณหภูมิต่ำสามารถออกแบบระบบได้หลายรูปแบบ ซึ่งพลาสมาไกลดิงอาร์กเป็นรูปแบบหนึ่งที่สามารถสังเคราะห์อนุโมลไฮดรอกซิลในรูปน้ำพลาสมาได้ โดยมีจุดเด่น คือ สามารถสังเคราะห์อนุโมลไฮดรอกซิลที่มีความเข้มข้นสูง โดยที่ใช้อุปกรณ์ราคาไม่แพงนัก และใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่า รวมถึงสามารถพัฒนาเข้ากับระบบอุตสาหกรรมได้ง่ายกว่ารูปแบบอื่น [13] โดยปกติจะใช้น้ำกลั่นเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์อนุโมลไฮดรอกซิลในรูปน้ำพลาสมา อย่างไรก็ตามได้มีการนำไมโครบับเบิลมาใช้เป็นวัตถุดิบแทน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อ *Escherichia coli* ซึ่งพบว่าไมโครบับเบิลมีส่วนช่วยเสริมประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย อีกทั้งยังช่วยลดการใช้พลังงานในการผลิตน้ำพลาสมาด้วย [14]

แม้ว่าเทคโนโลยีพลาสมาอุณหภูมิต่ำจะมีการศึกษามานานครอบคลุมหลากหลายสาขา แต่การศึกษการใช้เทคโนโลยีพลาสมาอุณหภูมิต่ำทางด้านการเกษตรเป็นสิ่งใหม่สำหรับวงการพลาสมาอุณหภูมิต่ำ และกำลังเป็นที่

สนใจในปัจจุบัน ซึ่งการศึกษานำวิธีพลาสมาไกลดิงอาร์กมาใช้ร่วมกับไมโครบับเบิล เพื่อสังเคราะห์อนุโมลไฮดรอกซิลยังมีไม่มาก และยังไม่ได้มีการศึกษาหาปัจจัยของระบบที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์อนุโมลไฮดรอกซิลอย่างจริงจัง

ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาเพื่อพัฒนาการสังเคราะห์อนุโมลไฮดรอกซิลด้วยระบบดังกล่าวให้ดีขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปใช้ลดสารพิษตกค้างบนพืชผลการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ และทราบแนวทางการพัฒนาในอนาคตได้

2. ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 พลาสมาอุณหภูมิต่ำ (Non-Thermal Plasma)

พลาสมา คือ สถานะที่ 4 ของสสารซึ่งอยู่ในรูปของก๊าซมีประจุ เพียงบางส่วนหรือทั้งหมด ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ พลาสมาชนิดอุณหภูมิสูง และพลาสมาชนิดอุณหภูมิต่ำ [6, 15, 16] สำหรับกระบวนการที่ต้องการสร้างอนุโมลอิสระเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ จะนิยมสร้างจากพลาสมาชนิดอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากสามารถควบคุมปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นได้ โดยไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการการดับ และมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงกว่าพลาสมาชนิดอุณหภูมิสูง [17]

เทคโนโลยีพลาสมาชนิดอุณหภูมิต่ำจะเกี่ยวข้องกับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงดันสูงไปยังขั้วไฟฟ้า โดยกระทำผ่านตัวกลาง ซึ่งอาจเป็นก๊าซหรือของเหลวชนิดต่าง ๆ เพื่อให้เกิดการคายประจุ จนสสารตัวกลางได้รับพลังงานเกิดการก่อตัวเป็นสปิชีส์ ซึ่งหมายถึงสสารในสถานะพลาสมาชนิดต่าง ๆ เช่น อิเล็กตรอน โฟตอน ไอออน โมเลกุล และอนุโมลอิสระ [18]

ปัจจุบันมีการนำพลาสมาชนิดอุณหภูมิต่ำมากระทำกับของเหลว ในรูปแบบการคายประจุจะลงน้ำหรือไอของของเหลว โดยมีข้อดีคือมีอัตราการแพร่ของสปิชีส์ลงสู่ของเหลวได้ดีขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสถานะก๊าซและของเหลวมาก และช่วยลดการใช้พลังงานลง [18] โดยการคายประจุรูปแบบดังกล่าวได้แก่วิธีพลาสมา-

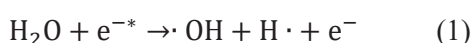
โกลดิงอาร์ก ซึ่งมีจุดเด่น คือ ได้พลาสมาที่มีความหนาแน่นของสปีชีส์สูง ซึ่งทำให้เกิดสปีชีส์หลายชนิด และระบบไม่ซับซ้อน อุปกรณ์ราคาไม่แพง [13, 19] ระบบพลาสมาโกลดิงอาร์กมีหลักการ คือ การจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงดันสูงไปยังขั้วไฟฟ้าที่อยู่ห่างจากกันให้เกิดการอาร์กที่จุดที่แคบที่สุดของช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และเปลวอาร์กจะเคลื่อนไปตามการไหลของก๊าซ ซึ่งจะยาวขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น โดยพลาสมาบริเวณดังกล่าวจะเป็นพลาสมาชนิดอุณหภูมิสูงจนถึงบริเวณ ๆ หนึ่งเป็นเส้นแบ่งระหว่างพลาสมาชนิดอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ โดยจะเกิดการสูญเสียความร้อนและความไม่สมดุลด้านอุณหภูมิ บริเวณที่เป็นพลาสมาชนิดอุณหภูมิต่ำ ก๊าซที่ไหลอย่างต่อเนื่องจะผลัดเปลี่ยนให้มีความยาวมากขึ้น ทำให้ระบบต้องการกำลังไฟฟ้ามากขึ้นเพื่อให้มีความเสถียร เมื่อความยาวเปลวยาวจนสุดความสามารถของแหล่งจ่ายจนไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ได้ กำลังไฟฟ้าจะมีค่าลดลงและเปลวหดตัว และค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบจะลดลงกลับมายังจุดแบ่งที่เริ่มเกิดเป็นพลาสมาชนิดอุณหภูมิต่ำ ซึ่งกระบวนการจะเกิดแบบพัลส์ ซึ่งใช้ระยะเวลาในการเกิด 10 ms ต่อหนึ่งรอบ [13, 17, 19]

2.2 กลไกการเกิดอนุมูลของไฮดรอกซิล

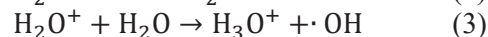
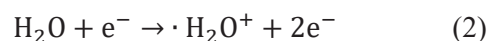
อนุมูลไฮดรอกซิล คือ รูปที่ไร้ประจุของไฮดรอกไซด์ไอออน โดยอนุมูลไฮดรอกซิลถือเป็นสารที่มีความไวในการเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์สูงมาก โดยมีฤทธิ์รบกวนจากฟลูออรีน แต่มีประสิทธิภาพสูงกว่าไฮดรอกซิล สามารถนำไปประโยชน์ในทางวิทยาศาสตร์หลายด้าน เช่น การบำบัดน้ำเสีย การทำให้พื้นผิวไร้เชื้อ การสลายโมเลกุลสารอินทรีย์ [5]

อนุมูลไฮดรอกซิลเกิดขึ้นจากการเติมโมเลกุลของน้ำในกระบวนการดิสซาร์จ ทำให้ไอเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงไปชนโมเลกุลของน้ำ จนเกิดการแตกตัว เกิดการไอออนไนเซชัน [20] และการกระตุ้นแบบสั่นหรือแบบหมุน [18] ดังสมการที่ 1-7

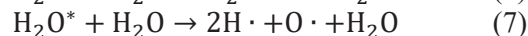
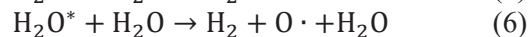
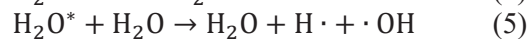
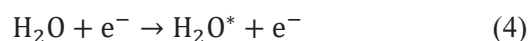
ปฏิกิริยาการแตกตัว



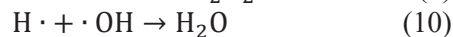
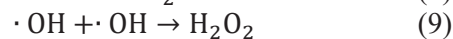
ปฏิกิริยาการเกิดไอออน



ปฏิกิริยาการกระตุ้นแบบสั่นหรือแบบหมุน

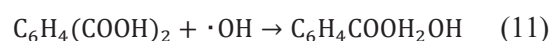


อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากันเอง เพื่อให้กลับสู่รูปแบบที่เสถียรหรือมีครึ่งชีวิตที่ยาวกว่า เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ 8-10



อนุมูลไฮดรอกซิลมีกลไกการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ คือ การดึงอะตอมของไฮโดรเจนออกจากโมเลกุลสารอินทรีย์เพื่อสร้างโมเลกุลน้ำ และอนุมูลสารอินทรีย์ชนิดอื่น การจับกับโมเลกุลนำไฟฟ้า กลายเป็นโมเลกุลที่มีพันธะที่ไม่อิ่มตัว และการปล่อยพลังงานโดยคายประจุอิเล็กตรอน จากรูปอนุมูลไฮดรอกซิลกลายเป็นไฮดรอกไซด์ด้วยการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ [18]

การตรวจสอบยืนยันการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลสามารถทำได้จากการวัดแสงจากเปลวพลาสมาโดยวิธีออปติคัลมิสชันสเปกโตรมิเตอร์ แต่การวัดความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกซิลโดยตรงค่อนข้างซับซ้อนกว่าเนื่องจากเครื่องมือมีราคาแพง และต้องมีความเชี่ยวชาญในการใช้เครื่องมือ วิธีการที่ได้รับความนิยมจึงเป็นวิธีการวัดทางอ้อมด้วยการดักจับอนุมูล [21] ซึ่งจะเป็นการประมาณอนุมูลไฮดรอกซิลด้วยความเข้มข้นสารเคมีที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลไฮดรอกซิลกับสารที่มีความไวในการทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลสูง แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับอนุมูลชนิดอื่น เช่น กรดเทรฟทาสิก โดยเมื่อเติมสารดังกล่าวไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิลแล้วจะได้กรดไฮดรอกซิลเทรฟทาสิก [22] ดังสมการที่ 11



ซึ่งสารประกอบดังกล่าวมีฤทธิ์ดูดกลืนแสงยูวีที่ความยาวคลื่น 310 nm ตามปริมาณความเข้มข้นที่มีในสารละลาย [23]

2.3 ไมโครบับเบิล (Microbubble)

ไมโครบับเบิล คือ ฟองอากาศขนาดจุลภาค ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละฟองน้อยกว่า 100 ไมครอน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวกลางที่ช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาเคมีมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากไมโครบับเบิลช่วยเพิ่มอัตราส่วนพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสถานะของเหลวและก๊าซต่อปริมาตรสูง ทำให้สามารถขนถ่ายมวลสารและความร้อนได้ดี ก่อให้เกิดผลลัพธ์ เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน และการเกิดอนุมูลอิสระ โดยไมโครบับเบิลจะมีขนาดเล็กถึงจางหายไป จุดเด่นของไมโครบับเบิลอีกอย่างหนึ่ง คือ มีความเร็วการลอยตัวขึ้นสู่ผิวของเหลวต่ำ ทำให้มีเวลาสำหรับการขนถ่ายมวลสารนานกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ จึงเป็นเหตุผลว่าการผลิตไมโครบับเบิลให้มีขนาดยิ่งเล็กลงยิ่งดี [24-26]

2.4 การออกแบบการทดลอง

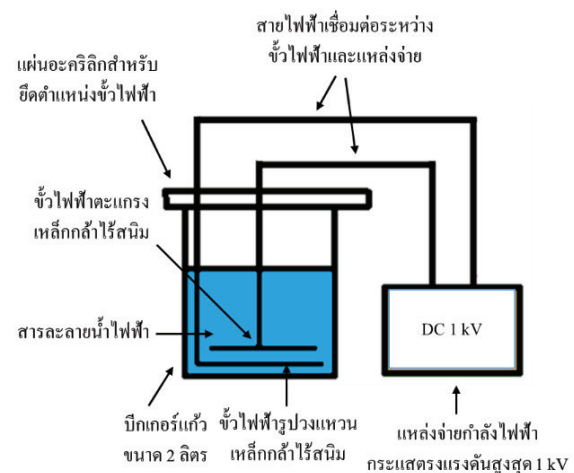
การออกแบบแผนการทดลอง คือ เทคนิคทางด้านสถิติรูปแบบหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนการทดลอง โดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของปัจจัยที่สนใจ แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางสถิติเพื่อที่จะให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม ในกรณีที่ศึกษาปัจจัยจำนวนมากจะนิยมใช้การทดลองแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบปัจจัยมากกว่า 2 ปัจจัย แต่ไม่ทำการทดลองครบทุกกรณี โดยมีข้อดีคือช่วยลดการใช้ทรัพยากรได้อย่างมหาศาล ในขณะที่ยังคงแปลผลการทดลองได้มีประสิทธิภาพ [27]

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการพลาสมา ซึ่งตั้งอยู่ที่ชั้น 1 อาคารวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งเป็นห้องทดลองปิดที่มีการควบคุมห้อง 25 องศาเซลเซียส และ

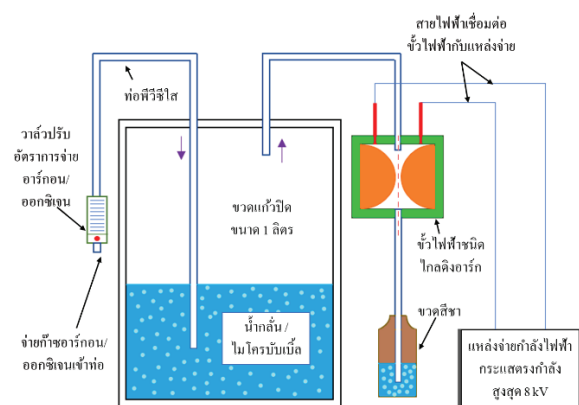
ความชื้นสัมพัทธ์ 50% แต่การวัดผลด้วยวิธีการดักจับอนุมูลจะนำสารละลายไปกระทำที่ภาควิชาจุลชีววิทยา ชั้น 8 อาคาร SCB2 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยระบบการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลที่ทีมนักวิจัยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นนั้นประกอบด้วย 2 ระบบ คือ ระบบการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า และระบบพลาสมาโกลดิงอาร์ค ดังนี้

ระบบการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า เป็นส่วนหนึ่งของระบบบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้า โดยจะเติมสารบางชนิดที่ทำหน้าที่ช่วยรวบรวมตะกอนที่ไม่ชอบน้ำ แล้วใช้พลังงานไฟฟ้าดิสชาร์จน้ำเสียให้เกิดฟองก๊าซขนาดไมครอนไปจับกับตะกอน ทำให้ตะกอนลอยตัวเพื่อคัดแยกทางกายภาพต่อไป [28] ซึ่งทางทีมผู้วิจัยอาศัยประโยชน์จากจุดนี้นำส่วนหนึ่งของระบบมาประยุกต์ในการผลิตไมโครบับเบิล เพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิล ซึ่งระบบประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ตั้งไว้ห่างกันในระยะห่างที่เหมาะสมในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายนำไฟฟ้า และต่อสายไฟเข้ากับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 1 kV (ยี่ห้อ EN Technologies รุ่น IDP-1010S ผลิตในประเทศเกาหลีใต้) ดังรูปที่ 1 เมื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสม จะทำให้เกิดฟองอากาศในสารละลายปริมาณมากจนกลายเป็นไมโครบับเบิล

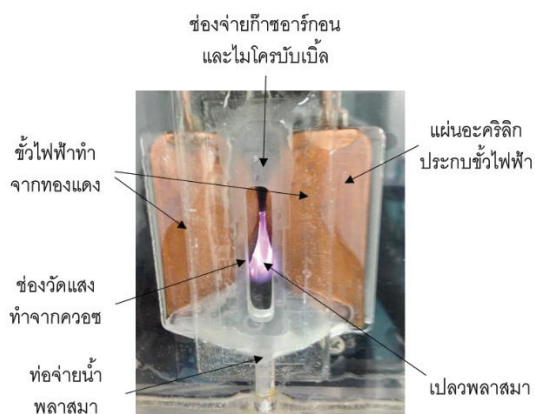


รูปที่ 1 ระบบการผลิตไมโครบับเบิลด้วยวิธีการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า

ระบบพลาสมาโกลดิงอาร์กที่แสดงดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยส่วนวาล์วปรับก๊าซ ซึ่งเมื่อจ่ายก๊าซอาร์กอน ก๊าซอาร์กอนจะไหลไปตามท่อลงไปในขวดแก้วปิด ซึ่งอาจบรรจุน้ำกลั่นหรือไม่โครบับเบิลไว้ด้วยแรงดันและการระเหยจะทำให้ละอองน้ำไหลออกไปยังขั้วไฟฟ้า โกลดิงอาร์กที่ต่อกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสุด 8 kV (ยี่ห้อ F/ART รุ่น IP44 ผลิตในประเทศอิตาลี)



รูปที่ 2 ระบบพลาสมาโกลดิงอาร์ก



รูปที่ 3 ขั้วไฟฟ้าโกลดิงอาร์ก

สำหรับขั้วไฟฟ้าในรูปที่ 3 ประกอบด้วยแผ่นขั้วทองแดงรูปทรงโค้ง 2 ขั้ว วางคู่กันโดยจุดที่ใกล้ที่สุดมีระยะห่าง 3 mm โดยมีแผ่นอะคริลิกประกบกันเพื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้า และให้ขั้วไฟฟ้าเป็นระบบปิดให้ก๊าซไหลผ่านได้เท่านั้น โดยเมื่อเปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้า จะเกิดการอาร์กที่บริเวณส่วนที่แคบที่สุดของขั้ว เมื่อก๊าซไหลผ่านจะทำให้เปลวมีขนาดยาวเกิดขึ้นเป็นพลาสมาโซน

เมื่อละอองน้ำไหลผ่านบริเวณดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นน้ำพลาสมาไหลออกมา ซึ่งสามารถนำวัสดุสีขามารองรับได้

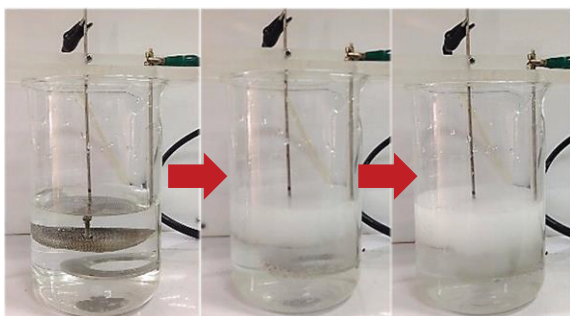
สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย การทดลองหลายส่วน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การศึกษาการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในรูปน้ำพลาสมาเบื้องต้น

ส่วนแรกของการทดลองเบื้องต้นผู้วิจัยต้องการยืนยันผลว่าระบบพลาสมาโกลดิงอาร์กที่พัฒนามานี้สามารถสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลได้จริง จึงได้ทดลองสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลโดยใช้ น้ำกลั่น (ยี่ห้อ โพลสตาร์ ผลิตในประเทศไทย) เป็นวัตถุดิบเดิมในขวดแก้วปริมาณ 600 mL โดยจะกำหนดค่ากำลังไฟฟ้า 460 W และปรับอัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอนที่อัตรา 10 L/min แล้ววัดผลการทดลองด้วยเครื่องออปติคัลอิมิตชันสเปกโตรมิเตอร์ (ยี่ห้อ Avantes รุ่น AvaSpec-ULS2048CL-EVO ผลิตในประเทศเนเธอร์แลนด์) วัดแสงจากเปลวพลาสมาที่เกิดขึ้น โดยสามารถระบุปียส์ที่เกิดขึ้นในสภาวะพลาสมาได้ จึงเป็นวิธีที่ใช้ยืนยันการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลที่ง่ายและสะดวก [29] โดยในระหว่างการเดินเครื่องพลาสมาโกลดิงอาร์ก ผู้วิจัยได้วัดแสงจากเปลวพลาสมาโดยต่อหัวโพรบรับแสงที่บริเวณช่องระหว่างขั้วไฟฟ้า กำหนดระยะเวลาการรวมแสงที่ 5 s และบันทึกค่าที่ได้

หลังจากยืนยันผลแล้ว ส่วนถัดมาผู้วิจัยต้องการทราบว่า การใช้ไมโครบับเบิลเป็นวัตถุดิบแทนน้ำกลั่น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลหรือไม่ และจะมีการคงอยู่ของอนุมูลเป็นอย่างไร ผู้วิจัยจึงทดลองเปรียบเทียบความแตกต่างกรณีใช้น้ำกลั่น และไมโครบับเบิลเป็นวัตถุดิบ โดยในการผลิตไมโครบับเบิลจะใช้วิธีการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีการผลิตไมโครบับเบิลที่สะดวกรวดเร็ว แต่จำเป็นต้องใช้สารละลายที่นำไฟฟ้าในการผลิต [28] ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้สารโซเดียมไบคาร์บอเนต (ยี่ห้อ Mcgarrett ผลิตในประเทศไทย) ซึ่งเป็นสารเจือปนอาหารในการทำให้

น้ำกลั่นสามารถนำไฟฟ้าได้ โดยผู้วิจัยได้เติมสารโซเดียมไบคาร์บอเนต 4.2 g ลงในน้ำกลั่น 1 L หย่อนขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้วลงไปในสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต โดยกำหนดระยะห่างขั้ว 4 เซนติเมตร จากนั้นต่อสายไฟฟ้าและตรวจสอบความเรียบร้อยของอุปกรณ์ จากนั้นจึงทำการเปิดสวิตช์เครื่อง กำหนดแรงดันไฟฟ้าที่ 45 V โดยเดินเครื่องเป็นระยะเวลา 10 min โดยเมื่อเริ่มเดินเครื่องจะเกิดฟองอากาศขนาดจุลภาคจำนวนมากจนกลายเป็นไมโครบับเบิ้ลภายในปิกเกอร์ดังรูปที่ 4 เมื่อผลิตไมโครบับเบิ้ลเสร็จแล้วจึงนำไปผลิตน้ำพลาสมาเปรียบเทียบกับการใช้ น้ำกลั่น โดยจะกำหนดเงื่อนไขการทดลองไว้เท่ากันทั้งสองกรณี คือ กำลังไฟฟ้า 460 W อัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอน 10 L/min โดยทดลองซ้ำ 3 ครั้ง สำหรับการวัดผลการทดลองทั้ง 2 กรณี จะเปรียบเทียบด้วยการวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ด้วยชุดทดสอบเพอร์ออกไซด์ (ยี่ห้อ QUANTOFIX® รุ่น Peroxide 25) ซึ่งเป็นวิธีวัดทางอ้อม เนื่องจากอนุมูลไฮดรอกซิลเป็นสารที่ไม่เสถียร มีการสลายตัวอยู่ตลอดเวลา ซึ่งสารไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เป็นรูปที่เสถียรที่เกิดจากอนุมูลไฮดรอกซิลทำปฏิกิริยากันเอง ดังสมการที่ 9 จึงสามารถใช้ประมาณแนวโน้มอนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นได้ โดยหากจุ่มแผ่นทดสอบลงในน้ำพลาสมาที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ แผ่นทดสอบจะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีน้ำเงิน ยิ่งสีน้ำเงินเข้มหมายถึงมีความเข้มข้นไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์สูง โดยที่มีมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบที่ข้างบรรจุภัณฑ์



รูปที่ 4 การผลิตไมโครบับเบิ้ล
ด้วยวิธีการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า

หลังจากที่ทดลองเสร็จ ผู้วิจัยจึงเลือกวัตถุดิบมาทดลองสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลใหม่โดยใช้เงื่อนไขที่ดีกว่า ผลิตน้ำพลาสมาใส่ขวดแก้วประมาณ 5 mL แล้วตรวจวัดไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ทันทีที่ผลิตเสร็จ และตรวจวัดอย่างต่อเนื่องที่ระยะเวลา 2, 5, 10, 30, 60, 120 min โดยระหว่างการวัดซ้ำจะปิดฝาทุกครั้งหลังตรวจวัดเสร็จ และมีการบันทึกภาพแผ่นทดสอบด้วยทุกครั้ง

3.2 การทดลองเพื่อสมการทำนายความเข้มข้นของกรดไฮดรอกซิลเทรฟทาลิก

ก่อนการทดลองคัดกรองปัจจัยที่มีนัยสำคัญ จำเป็นต้องสร้างสมการสำหรับแปลงค่าการดูดกลืนแสงกรดไฮดรอกซิลเทรฟทาลิกที่วัดด้วยวิธีการดักจับอนุมูลกลับเป็นค่าความเข้มข้นของกรดไฮดรอกซิลเทรฟทาลิกในหน่วยหนึ่งส่วนในล้านส่วน (ppm) ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดลองเริ่มจากการเติมน้ำกลั่น 10 mL ลงในหลอดทดลองขนาดเล็ก แล้วเติมสารกรดไฮดรอกซิลเทรฟทาลิกสำเร็จรูปเกรดมาตรฐาน (ยี่ห้อ Sigma-Aldrich ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา) 1 mg ลงในหลอดทดลองดังกล่าว ซึ่งทำให้สารละลายกรดไฮดรอกซิลเทรฟทาลิกมีความเข้มข้น 100 ppm จากนั้นจึงดูดสารละลายใส่คิวเวท แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (ยี่ห้อ BOECO ผลิตในประเทศเยอรมัน) ที่ค่าความยาวคลื่น 310 nm โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นจึงทำการเจือจางสารละลายโดยการเติมน้ำกลั่น และทดลองซ้ำที่ความเข้มข้น 50, 25, 10, 5 ppm ตามลำดับ จากนั้นจึงนำค่าเฉลี่ยของค่าดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มาสร้างสมการ

3.3 การทดลองคัดกรองปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

ในการทดลองศึกษาเพื่อหาปัจจัยที่มีนัยสำคัญนั้น ผู้วิจัยคัดเลือกปัจจัยมาทดสอบจากระบวนการผลิตไมโครบับเบิ้ล 3 ปัจจัย คือ ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และระยะเวลาผลิต และเป็นปัจจัยจากระบบโกลดิงอาร์ก 3 ปัจจัย คือ กำลังไฟฟ้า อัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอน และอัตราส่วนการผสมก๊าซ

ออกซิเจน ผู้วิจัยใช้แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน ทดลองจริงหนึ่งในสี่ส่วนจากแฟกทอเรียลเต็มจำนวน โดยการทดลองมีทั้งสิ้น $2^{6-2} \times 2 = 32$ การทดลอง ซึ่งสามารถลดการใช้ทรัพยากรในการทดลองได้มาก ในขณะที่การวิเคราะห์ผลยังสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถแสดงรายละเอียดการทดลองและการกำหนดสัญลักษณ์ได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

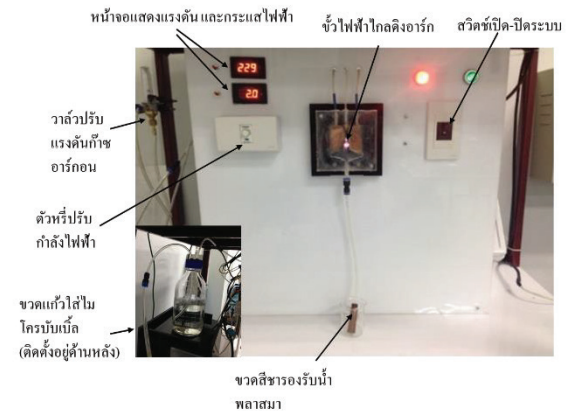
ปัจจัยที่สนใจศึกษา	ค่าพารามิเตอร์		หน่วย
	ค่าต่ำสุด (-)	ค่าสูงสุด (+)	
ระยะเวลา (A)	5	15	min
ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต (B)	2.1	4.2	g
ระยะห่างขั้วไฟฟ้า (C)	2	4	cm
อัตราการจ่ายอาร์กอน (D)	5	9	L/min
อัตราส่วนการผสมก๊าซออกซิเจน (E)	0	1	% Ar
กำลังไฟฟ้า (F)	270	460	W

ผู้วิจัยได้สร้างแผนการทดลองแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วนด้วยโปรแกรม MINITAB โดยได้ตัวเลขแสดงคุณสมบัติของตารางออกแบบการทดลอง คือ Resolution IV (2_{IV}^{6-2}) ซึ่งหมายถึงผลกระทบหลักจะปะปนกับผลกระทบร่วมสามทาง และผลกระทบร่วมสองทางจะปนกันเอง ลำดับของการทดลองเป็นแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ และการทดลองมีระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

การทดลองแต่ละเงื่อนไขเริ่มจากการเตรียมสารละลายกรดเทรฟทาลิก ซึ่งไม่ละลายน้ำแต่จะละลายในเบสแก่ โดยเติมน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์แก้ว 125 mL แล้วเติมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ยี่ห้อ RCI Labscan ผลิตในประเทศญี่ปุ่น) 5 g แล้วจึงค่อย ๆ เติมกรดเทรฟทาลิก (ยี่ห้อ Sigma-Aldrich ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา) 8.3 g จากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

จากนั้นจึงเตรียมตัวอย่างสำหรับใช้เทียบค่าดูดกลืนแสง โดยเติมน้ำกลั่นลงในบีกเกอร์แก้ว 1 L และเติมสารโซเดียมไบคาร์บอเนตตามเงื่อนไขการทดลองจนสารละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นใช้ไมโครปิเปตดูดสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตและสารละลายกรดเทรฟทาลิกมาใส่ในขวดสีชาในอัตราส่วน 1 : 1 ปิดฝาขวดและเขย่าให้เข้ากัน เก็บไว้ในที่พื้นแสง โดยทำการเตรียมตัวอย่างควบคุมจำนวน 5 ตัวอย่างต่อหนึ่งเงื่อนไข

ถัดมานำสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่เหลือมาผลิตไมโครบับเบิล โดยกำหนดแรงดันไฟฟ้าที่ 45 V และเดินเครื่องเป็นระยะเวลาตามที่เงื่อนไขการทดลองกำหนดไว้ เสร็จแล้วจึงไมโครบับเบิลลงในขวดแก้วปริมาณ 750 mL และนำไปต่อฟุ้งกับระบบพลาสมา-ไกลดิงอาร์ก แล้วจึงเปิดวาล์วที่จ่ายก๊าซอาร์กอนและออกซิเจน โดยปรับอัตราการจ่ายก๊าซตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้แล้วจึงทำการเปิดสวิตช์เครื่อง และปรับค่ากำลังไฟฟ้าตามเงื่อนไขการทดลอง โดยจะทำการอุ่นเครื่อง 5 min เมื่อครบเวลาแล้วจะนำท่อน้ำออกต่อกับขวดสีชา ผลิตจนได้ประมาณ 40% ของขวด จึงทำการปิดเครื่องและเขย่าสารให้เข้ากัน จากนั้นทำการทดสอบเพอร์ออกไซด์โดยการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในรูปน้ำพลาสมาสามารถแสดงกระบวนการได้รูปที่ 5 เสร็จแล้วจึงดูดน้ำพลาสมาจากขวดสีชาขวดเดิมใส่ขวดสีชาขวดใหม่ 3 mL และดูดสารละลายกรดเทรฟทาลิกใส่ขวดสีชา 3 mL ปิดฝาและเขย่าให้เข้ากัน จากนั้นเขียนฉลากติดขวดและนำไปเก็บในกล่อง และนำอุปกรณ์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น แล้วเช็ดด้วยแอลกอฮอล์ เพื่อให้พร้อมใช้งานในการทดลองเงื่อนไขถัดไป



รูปที่ 5 การสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในรูปน้ำพลาสติกด้วยวิธีพลาสติกโกลดิงอาร์ก

เมื่อทดลองเสร็จจึงนำตัวอย่างไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ภาควิชาจุลชีววิทยา ชั้น 8 อาคาร SCB2 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยในการวัดผู้วิจัยใช้วิธีวัดซ้ำ 1 เงื่อนไขเทียบกับ 5 ตัวอย่างควบคุม และการวัดเทียบกับสารละลายควบคุมจะวัดสารละลายครั้งละ 3 mL 2 ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะทำการวัดซ้ำ 2 รอบ โดยสรุปแล้ว 1 เงื่อนไขการทดลองจะได้ค่าวัดทั้งหมด $5 \times 2 \times 2 = 20$ ค่า ซึ่งจะนำค่าทั้ง 20 ค่านี้นมาเฉลี่ยให้กลายเป็นค่าเดียว

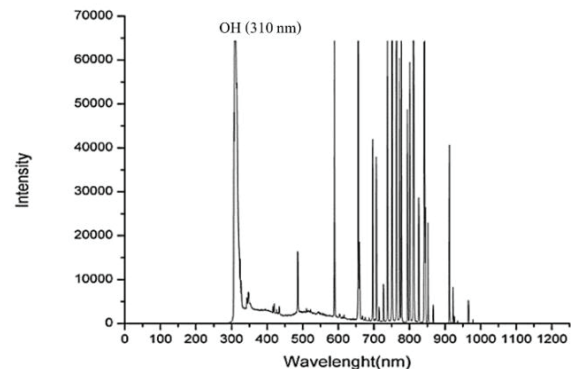
หลังจากวัดค่าดูดกลืนแสงครบทุกเงื่อนไข จึงนำค่าวัดดังกล่าวไปหาค่าเฉลี่ย แล้วนำค่าเฉลี่ยของแต่ละเงื่อนไขไปแทนค่า y ในสมการ $y = 0.0148x$ แล้วแก้สมการหาค่า x ออกมาเป็นความเข้มข้นของกรดไฮดรอกซิลเทรฟ-ทาลิกในหน่วย ppm เสร็จแล้วจึงนำผลลัพธ์ที่ได้ไปกรอกในโปรแกรม MINITAB เพื่อวิเคราะห์ผล

4. ผลการศึกษาวิจัย

4.1 ผลการศึกษาการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในรูปน้ำพลาสติกเบื้องต้น

ผลการทดลองในส่วนแรกหลังจากได้วัดความเข้มแสงที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องออปติคัลอิมมิตชันสเปกโตรมิเตอร์ สามารถแสดงผลการวัดได้ดังรูปที่ 6 พบว่าในการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลโดยจ่ายก๊าซอาร์กอนที่อัตรา 10 L/min มีค่าความเข้มแสงที่ความยาวคลื่น 310 nm

เกิดขึ้นสูง ซึ่งค่าพิกัดดังกล่าวแสดงถึงการเกิดอนุมูลไฮดรอกซิลในสถานะพลาสมาปริมาณมาก [29]



รูปที่ 6 ผลการวัดแสงพลาสมาด้วยออปติคัลอิมมิตชันสเปกโตรมิเตอร์

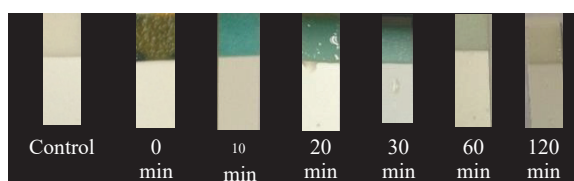
ดังนั้นจึงหมายความว่า ระบบพลาสติกโกลดิงอาร์กสามารถสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลได้จริง

ผลการทดลองในส่วนถัดมา พบว่าในกรณีที่ใช้น้ำกลั่นเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลจะได้ค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ประมาณ 25 ppm แต่เมื่อนำไมโครบับเบิลมาใช้พบว่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่า 25 ppm โดยสังเกตจากสีของแผ่นทดสอบดังรูปที่ 7 ทั้งนี้ผลการทดลองได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ [25] ที่กล่าวว่าไมโครบับเบิลจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวที่ผิวร่วมระหว่างสถานะของเหลวและก๊าซ ช่วยให้อนุมูลไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นในพลาสมาก๊าซสามารถละลายลงน้ำพลาสติก ซึ่งเป็นของเหลวได้ดีขึ้น นอกจากนี้ตัวไมโครบับเบิลเองสามารถสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลได้ด้วยกลไกการสลายตัวเอง ดังนั้นการใช้ไมโครบับเบิลจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลทั้งทางตรงและทางอ้อม



รูปที่ 7 การทดสอบเพอร์ออกไซด์ในน้ำกลั่น (ซ้าย) และใช้ไมโครบับเบิล (ขวา) เป็นตัวดูดซับ

ผลการทดลองในส่วนสุดท้าย พบว่าเมื่อใช้แผ่นทดสอบเพอร์ออกไซด์วัดน้ำพลาสติกที่ผลิตได้ แผ่นทดสอบมีสีเข้มมากกว่าที่แผ่นทดสอบรองรับได้ โดยแผ่นทดสอบสามารถตรวจวัดความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ได้ตั้งแต่ 0-25 ppm ดังนั้นหมายความว่า ในน้ำพลาสติกมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มากกว่า 25 ppm มาก ซึ่งต่อมาเมื่อวัดซ้ำที่ช่วงเวลา 10 min พบว่ามีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ 25 ppm และที่ 20 min เหลือเพียง 5 ppm และยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเมื่อผ่านไป 120 min ความเข้มข้นเหลือน้อยกว่า 0.1 ppm ดังรูปที่ 8 โดยการทดลองทั้ง 3 ครั้งภายใต้เงื่อนไขเดิมให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่าการสังเคราะห์อนุภาคไฮดรอกซิลภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวอนุภาคไฮดรอกซิลที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์จะมีแนวโน้มความเข้มข้นลดลงและจะคงอยู่ในน้ำพลาสติกได้ประมาณ 120 min



รูปที่ 8 แผ่นทดสอบเพอร์ออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ

4.2 ผลการทดลองการสร้างความเข้มข้นของกรดไฮดรอกซิลเทรฟทาติก

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวัดมาเข้าสมการในโปรแกรม MS Excel พบว่าความสัมพันธ์ที่ได้นั้นมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นพบว่าสมการที่ได้คือ

$$y = 0.0148x \quad (12)$$

ซึ่ง X คือ ความเข้มข้นของกรดไฮดรอกซิลเทรฟทาติก ในหน่วย ppm และ y คือ ค่าการดูดกลืนแสง ผลทดสอบค่าความเชื่อมั่นของโมเดลพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R-Square เท่ากับ 99.62% ดังนั้น สมการนี้จึงสามารถนำไปใช้ทำนายได้

4.3 ผลการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

หลังจากทำการทดลองและวัดผลเสร็จสิ้นครบทั้ง 32 ตัวอย่าง แล้วจึงข้อมูลไปแทนในสมการที่ 12 พบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของกรดไฮดรอกซิลเทรฟทาติกมีค่าเท่ากับ 6.190 ppm โดยที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์แต่ละการทดลองมีค่าประมาณ 10-25 ppm จากนั้นจึงนำผลลัพธ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยโปรแกรม MINITAB โดยกำหนดผลตอบ คือ ค่าความเข้มข้นของกรดไฮดรอกซิลเทรฟทาติก ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ปัจจัยแฝง	F-Value	P-Value
L _A	0.23	0.637
L _B	28.55	0.000
L _C	36.70	0.000
L _D	91.79	0.000
L _E	5.40	0.034
L _F	4.24	0.056

ปัจจัยในตารางที่ 3 จะเป็นปัจจัยแฝงที่ประกอบด้วยปัจจัยชนิดอื่นปะปนกันอยู่ โดยสามารถระบุส่วนประกอบของปัจจัยแฝงได้จากโครงสร้างปัจจัยแฝง ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 โครงสร้างปัจจัยแฝง

ปัจจัยแฝง	โครงสร้างปัจจัยแฝง
L _A	A + BCE + DEF + ABCDEF
L _B	B + ACE + CDF + ABDEF
L _C	C + ABE + BDF + ACDEF
L _D	D + AEF + BCF + ABCDE
L _E	E + ABC + ADF + BCDEF
L _F	F + ADE + BCD + ABCEF

จากตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า ปัจจัยแฝง L_B , L_C , L_D , L_E มีค่า $P\text{-Value} < 0.05$ ดังนั้น ปัจจัยแฝงดังกล่าวจึงมีนัยสำคัญ ซึ่งเมื่อพิจารณาตารางที่ 4 พบว่าปัจจัยแฝงกลุ่มดังกล่าวประกอบด้วย การปนกันของ ผลกระทบระหว่างปัจจัยหลัก ปัจจัยร่วม 3 และ 5 ทาง ซึ่ง ปัจจัยที่มีนัยสำคัญนั้นจะมาจากปัจจัยอันดับต้น ซึ่งก็คือ ปัจจัยหลัก จึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการ สังเคราะห์ห่อนุมูลไฮดรอกซิลอย่างมีนัยสำคัญ คือ ปริมาณ โซเดียมไบคาร์บอเนต (B) ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (C) อัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอน (D) และอัตราส่วนการผสมก๊าซ ออกซิเจน (E)

5. สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการทดลองเพื่อศึกษาการ สังเคราะห์ห่อนุมูลไฮดรอกซิลในน้ำพลาสมาด้วยวิธี พลาสมาไกลดิงอาร์ก และหาปัจจัยที่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพของห่อนุมูลไฮดรอกซิลอย่างมีนัยสำคัญ โดยใน การทดลองจะเริ่มจากการศึกษาการสังเคราะห์ห่อนุมูล ไฮดรอกซิลที่เงื่อนไขต่างๆ และหาพฤติกรรมการคงอยู่ ของห่อนุมูลไฮดรอกซิล หลังจากนั้นจึงทำการทดลองเพื่อ คัดกรองปัจจัยที่มีนัยสำคัญ โดยพบว่ามี 4 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า อัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอน และอัตราส่วนการผสมก๊าซ ออกซิเจน

6. ข้อเสนอแนะ

ระบบการวัดห่อนุมูลไฮดรอกซิลในงานวิจัยนี้เป็นการ วัดทางอ้อม ซึ่งเป็นการประมาณห่อนุมูลไฮดรอกซิล โดย

อ้างอิงจากความเข้มข้นของกรดไฮดรอกซิลเทเลฟทาลิก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งไม่ได้วัดห่อนุมูลไฮดรอก- ซิลโดยตรง จึงทำให้ทราบเพียงแนวโน้มและปัจจัยที่ส่งผล เท่านั้น หากต้องการทราบความเข้มข้นของห่อนุมูลไฮดรอก- ซิลในน้ำพลาสมาโดยละเอียด จำเป็นต้องใช้วิธีอื่นในการวัด เพิ่มเติม และในการทดลองเมื่อสังเคราะห์ห่อนุมูลไฮดรอกซิล เสร็จควรวัดค่าทันที เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

ในอนาคตสามารถนำงานวิจัยนี้ไปศึกษาต่อได้อีก หลายรูปแบบ เช่น การศึกษาหาเงื่อนไขการทดลองที่ดีที่สุด ในการสังเคราะห์ห่อนุมูลไฮดรอกซิลในรูปน้ำพลาสมาด้วย วิธีพลาสมาไกลดิงอาร์กที่ใช้ไมโครบับเบิลที่ผลิตด้วย วิธีการทำให้ตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า หรือการศึกษา ผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ห่อนุมูลไฮดรอก- ซิลเมื่อใช้ไมโครบับเบิลที่ผลิตด้วยวิธีอื่นเป็นวัตถุดิบ เมื่อ ใช้ก๊าซชนิดอื่นจ่ายเข้าระบบ หรือเมื่อใช้แหล่งจ่าย กำลังไฟฟ้าชนิดอื่น หรือการปรับปรุงระบบให้มีกำลังการ ผลิตสูงขึ้น โดยที่ยังคงไว้ซึ่งคุณภาพของน้ำพลาสมา ซึ่งจะ เป็นการพัฒนาระบบพลาสมาให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นจน สามารถนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรมได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนงานวิจัย และขอขอบคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำแนะนำและเอื้อเพื่อ เครื่องมืออุปกรณ์ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Thai-Pan. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเพื่อเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืชประจำปี 2558. การประชุม วิชาการเพื่อเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืช: เครือข่ายเตือนภัยสารเคมีกำจัดศัตรูพืช, 2558.
- [2] สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดลำปาง. ล้างผักผลไม้ลดสารพิษตกค้าง. 2558.
- [3] Hu, Y., Bai, Y., Li, X. and Chen, J. Application of Dielectric Barrier Discharge Plasma for Degradation and Pathways of Dimethoate in Aqueous Solution. *Separation and Purification Technology*. 2013; 120: 191-7.

- [4] Xu, Y., Tian, Y., Ma, R., Liu, Q. and Zhang, J. Effect of Plasma Activated Water on the Postharvest Quality of Button Mushrooms, *Agaricus Bisporus*. *Food Chemistry*. 2016; 197(4): 36-44.
- [5] Cheng, M., Zeng, G., Huang, D., Lai, C., Xu, P., Zhang, C. and Liu, Y. Hydroxyl Radicals Based Advanced Oxidation Processes (Aops) for Remediation of Soils Contaminated with Organic Compounds: A Review. *Chemical Engineering Journal*. 2016; 284: 582-98.
- [6] Moreau, M., Orange, N. and Feuilleley, M.G.J. Non-Thermal Plasma Technologies: New Tools for Bio-Decontamination. *Biotechnology Advances*. 2008; 26(6): 610-7.
- [7] Li, X., Wang, T., Qu, G., Liang, D. and Hu, S. Enhanced Degradation of Azo Dye in Wastewater by Pulsed Discharge Plasma Coupled with Mwcnts-TiO₂/Γ-Al₂O₃ Composite Photocatalyst. *Journal of Environmental Management*. 2016; 172: 186-92.
- [8] Kang, J., Li, O.L. and Saito, N. Synthesis of Structure-Controlled Carbon Nano Spheres by Solution Plasma Process. *Carbon*. 2013; 60: 292-8.
- [9] Yamamoto, M., Nishioka, M. and Sadakata, M. Sterilization by H₂O₂ Droplets under Corona Discharge. *Journal of Electrostatics*. 2002; 55(2): 173-87.
- [10] Attri, P., Kim, Y.H., Park, D.H., Park, J.H., Hong, Y.J., Uhm, H.S., Kim, K.N., Fridman, A. and Choi, E.H. Generation Mechanism of Hydroxyl Radical Species and Its Lifetime Prediction During the Plasma-Initiated Ultraviolet (UV) Photolysis. *Scientific Reports*. 2015; 5: 9332.
- [11] Ma, R., Wang, G., Tian, Y., Wang, K., Zhang, J. and Fang, J. Non-Thermal Plasma-Activated Water Inactivation of Food-Borne Pathogen on Fresh Produce. *Journal of Hazardous Materials*. 2015; 300: 643-651.
- [12] Sarangapani, C., Misra, N.N., Milosavljevic, V., Bourke, P., O'Regan, F. and Cullen, P.J. Pesticide Degradation in Water Using Atmospheric Air Cold Plasma. *Journal of Water Process Engineering*. 2016; 9: 225-32.
- [13] El-Aragi, G.M. Gliding Arc Discharge (GAD) Experiment. 2009; [Online] Available: <https://www.ispc-conference.org/ispcproc/papers/3.pdf>
- [14] Kim, H.S., Cho, Y.I., Hwang, I.H., Lee, D.H., Cho, D.J., Rabinovich, A. and Fridman, A. Use of Plasma Gliding Arc Discharges on the Inactivation of E. Coli in Water. *Separation and Purification Technology*. 2013; 120: 423-8.
- [15] Scholtz, V., Pazlarova, J., Souskova, H., Khun, J. and Julak, J. Nonthermal Plasma - A Tool for Decontamination and Disinfection. *Biotechnology Advances*. 2015; 33(6, Part 2): 1108-1119.
- [16] Sun, S.R., Wang, H.X., Mei, D.H., Tu, X. and Bogaerts, A. CO₂ Conversion In A Gliding Arc Plasma: Performance Improvement Based on Chemical Reaction Modeling. *Journal of CO₂ Utilization*. 2017; 17: 220-34.
- [17] Fridman, A., Nester, S., Kennedy, L.A., Saveliev, A. and Muta-Yardimci, O. Gliding Arc Gas Discharge. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1999; 25(2): 211-231.
- [18] Jiang, B., Zheng, J., Qiu, S., Wu, M., Zhang, Q., Yan, Z. and Xue, Z. Review on Electrical Discharge Plasma Technology for Wastewater Remediation. *Chemical Engineering Journal*. 2014; 236: 348-368.
- [19] El-Zein, E., Talaat, M., El-Aragi, G. and El-Amawy, A. Experimental Model to Study the Characteristics of Gliding Arc Plasma Reactor with Argon/Nitrogen. *Journal of Electrical Engineering*, 2015; 15: 64-67
- [20] Kozáková, Z. Electric Discharges in Water Solutions. Brno: Brno University of Technology, 2011.
- [21] Lin, Z-R., Zhao, L. and Dong, Y-H. Quantitative Characterization of Hydroxyl Radical Generation in a Goethite-Catalyzed Fenton-Like Reaction. *Chemosphere*. 2015; 141: 7-12.
- [22] Keswani, M., Raghavan, S., Govindarajan, R. and Brown, I. Measurement of Hydroxyl Radicals in Wafer Cleaning Solutions Irradiated with Megasonic Waves. *Microelectronic Engineering*. 2014; 118: 61-5.
- [23] Hirakawa, T., Yawata, K. and Nosaka, Y. Photocatalytic Reactivity for O₂⁻ and OH Radical Formation in Anatase and Rutile TiO₂ Suspension as the Effect of H₂O₂ Addition. *Applied Catalysis A: General*. 2007; 325(1): 105-11.

- [24] Tesař, V. Microbubble Generation by Fluidics PART I: Development of the Oscillator. Colloquium FLUID DYNAMICS 2012, Institute of Thermomechanics AS CR, v.v.i., Prague, October 24 - 26, 2012.
- [25] Parmar, R. and Majumder, S.K. Microbubble Generation and Microbubble-Aided Transport Process Intensification - A State-of-the-Art Report. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2013; 64: 79-97.
- [26] Marui, T. An Introduction to Micro/Nano-Bubbles and their Applications. *SYSTEMICS, CYBERNETICS AND INFORMATICS*, 2013; 11(4): 68-73.
- [27] สุทัศน์ ณ อยุธยา, ป., เหลืองไพฑูริย์ พ. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลองลง. กรุงเทพฯ: ท้อป, 2551.
- [28] Kyzas, G.Z. and Matis, K.A. Electroflotation Process: A Review. *Journal of Molecular Liquids*. 2016; 220: 657-64.
- [29] Kanazawa, S. and Furuki, T. Measurement of OH Radicals in Aqueous Solution Produced by Atmospheric-pressure LF Plasma Jet. *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*, 2012; 6(2):166-171.



การศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของชั้นเชื่อมพอกแข็ง บนเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมโดยการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์

The Study of Wear Behavior of Hardfacing layer on 3.5% Cr steel by Flux Cored Wire Arc Welding Process

ธีรโชติ ตรีเกร์* และ ประภาศ เมืองจันทร์บุรี

Teerachod Treeparee* and Prapas Muangjunburee

*ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

*Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering,
Prince of Songkhla University, Hatyai, Songkhla, 90110

*E-mail: teerachod.t@gmail.com, mprapas@eng.psu.ac.th

บทคัดย่อ

การเชื่อมพอกแข็งเป็นเทคนิคหลักในการปรับปรุงและยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนในทางวิศวกรรม วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของชั้นพอกแข็งบนเหล็กกล้า 3.5% โครเมียม ที่เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ อันประกอบด้วยกระบวนการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติที่มีชั้นพอกแข็งจำนวน 1 ชั้น และ 3 ชั้น โดยใช้ลวดเชื่อมชนิดออสเทนนิติกสแตนเลสในการเชื่อมชั้นรองพื้นและลวดชนิดมาร์เทนซิติกในการเชื่อมชั้นพอกแข็ง จากผลการทดสอบพบว่า ไม่พบข้อบกพร่องในบริเวณกระทบร้อนและบริเวณอื่น ๆ การเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติมีความต้านทานการสึกหรอสูง การเชื่อมพอกแข็งแบบอัตโนมัติเนื่องจากมีปริมาณมาร์เทนไซด์มากกว่าจึงทำให้มีค่าความแข็งมากกว่า นอกจากนี้การเชื่อมพอกแข็งแบบ 3 ชั้นมีความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าการเชื่อมพอกแข็งแบบ 1 ชั้น เนื่องจากเกิดการเจือจางจากชั้นรองพื้นน้อยกว่า โดยงานวิจัยนี้สภาวะการเชื่อมพอกแข็งที่ดีที่สุดคือ การเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติที่มีจำนวนชั้นพอกแข็ง 3 ชั้น

คำสำคัญ: เหล็กกล้า 3.5% โครเมียม, การเชื่อมพอกแข็ง, การสึกหรอแบบขัดสี, กระบวนการเชื่อมด้วยลวดแกนฟลักซ์

ABSTRACT

Hardfacing weld is a technique which mainly improves and extends the useful life of engineering components. The purpose of this research is to study wear behavior of hardfacing layers on 3.5% Chromium cast steel by Flux Cored Wire Arc Welding (FCAW) process. The automatic welding process and semiautomatic welding process with one and three layers was performed. Austenitic stainless steel and martensitic hardfacing wire were chosen to weld as the buffer and hardfacing layer respectively. These results showed that there is no defect in the Heat Affected Zone (HAZ) and other regions. Semiautomatic process showed higher abrasive wear resistance than automatic process due to more martensite content and higher hardness. Moreover, the abrasive wear resistance of three layers hardfacing was better than one layer hardfacing because one layer hardfacing was more diluted from buffer layer than three layers hardfacing. The best condition in this research is semiautomatic process with three layers hardfacing.

Keyword: 3.5% Cr steel, Hardfacing, Abrasive wear, FCAW

Received 22 August 2017
Revised 27 December 2017
Accepted 4 January 2018

1. บทนำ

กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์เป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการเชื่อมซ่อมชิ้นส่วนทางวิศวกรรมในโรงงาน ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมที่นิยมในปัจจุบัน โดยมีข้อดีเมื่อเทียบกับกระบวนการเชื่อมอื่น ๆ เช่น มีอัตราการเดิมเนื้อเชื่อมที่สูงกว่าการเชื่อมมิกและทิก ใช้งานง่ายและไม่ซับซ้อน และมีกำลังการผลิตสูงกว่าการเชื่อมแบบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ [1]

การเชื่อมพอกแข็งใช้สำหรับการซ่อมแซมชิ้นส่วนทางเหมืองแร่ อุตสาหกรรมน้ำตาลและอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ชิ้นส่วนเกิดการสึกหรอทางกล เมื่อค่าความแข็งของชิ้นส่วนเพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นส่วนนั้นมีความต้านทานการสึกหรอสูงขึ้น เนื่องจากการสูญเสียเนื้อที่น้อยลง [2, 7] ลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ประกอบด้วยโลหะผสมลงไปฟลักซ์ เพื่อใช้ในการปรับปรุงแนวเชื่อม ทำให้การอาร์กมีความเสถียร และป้องกันบรรยากาศภายนอกเข้าสู่บ่อหลอม [3] การต้านทานการสึกหรอของการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ปริมาณความร้อนเข้าชิ้นของการเชื่อมพอกแข็ง และประเภทของแก๊สปกคลุม ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและเป็นตัวกำหนดสมบัติที่เกิดขึ้นด้วย [4] สำหรับสมบัติการต้านทานการสึกหรอ ความแข็งและความเหนียวของชิ้นงานเป็นสิ่งที่สำคัญ โดยควรประกอบด้วยโครงสร้างมาร์เทนไซต์สำหรับป้องกันการสึกหรอแบบขัดสี และโครงสร้างออสเทนไนต์สำหรับป้องกันการสึกหรอแบบกระแทก [5] นอกจากนี้การเชื่อมพอกแข็งที่มีการเจือจางที่สูง ทำให้ความต้านทานการสึกหรอของเนื้อเชื่อมพอกแข็งลดลง และสำหรับการเชื่อมพอกแข็งควรมีชั้นรองพื้นเพื่อป้องกันการแตกและช่วยลดความเค้นของชิ้นงานเชื่อม [6, 8]

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอและโครงสร้างของชั้นพอกแข็งบนเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมที่เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ที่มีชั้นพอกแข็งแตกต่างกัน เมื่อทำการเชื่อมกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและกระบวนการเชื่อม

วัสดุที่ใช้เป็นในงานวิจัยนี้คือ 3.5% โครเมียมซึ่งมีขนาด 250 มม. X 75 มม. X 20 มม. โดยมีส่วนผสมทางเคมีและค่าความแข็งแสดงอยู่ในตารางที่ 1 ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ลวดเชื่อมชนิดมาเทนซิดิกเกรด สำหรับการเชื่อมชั้นพอกแข็ง และลวดเชื่อมชนิดออสเทนไนติกเกรด สำหรับการเชื่อมชั้นรองพื้น โดยลวดเชื่อมแต่ละชนิดมีส่วนผสมทางเคมีและค่าความแข็งดังแสดงอยู่ในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ธาตุ	3.5%Cr
C	0.41
Si	0.68
Mn	0.66
Ni	0.17
Cr	3.10
Mo	0.28
Cu	0.15
Fe	Balance
Hardness	200 HV

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ธาตุ	ลวดชั้นพอกแข็ง	ลวดชั้นรองพื้น
C	0.5	0.1
Si	2.5	0.5
Mn	1.3	6
Cr	8.5	19
Ni	-	9
Fe	Balance	Balance
Hardness	680 HV	235 HV

ทำการเชื่อมรองพื้น (Buffer) ด้วยลวดเชื่อมจำนวน 1 ชั้น และตามด้วยการเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมด้วยกระบวนการเชื่อมแบบลวดเชื่อมแกนฟลักซ์ โดยใช้เครื่องเชื่อมขี้อัฟ Fronius รุ่น TransPlus Synergic 400 มีทั้งการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ และอัตโนมัติโดยการเชื่อมแบบอัตโนมัติใช้อุปกรณ์การเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งใช้เครื่องเชื่อมเดียวกับการเชื่อมกึ่งอัตโนมัติใช้เตาเดินรางในการจับหัวเชื่อมในการเชื่อม

มีสภาวะการเชื่อมพอกแข็งแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ อันได้แก่ 1) ใช้ลวดเชื่อมพอกแข็ง (1 ชั้น) ที่เชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ (1-S) 2) ใช้ลวดเชื่อมพอกแข็ง (3 ชั้น) ที่เชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ (3-S) 3) ใช้ลวดเชื่อมพอกแข็ง (1 ชั้น) ที่เชื่อมแบบอัตโนมัติ (1-A) และ 4) ใช้ลวดเชื่อมพอกแข็ง (3 ชั้น) ที่เชื่อมแบบอัตโนมัติ (3-S) ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และควบคุมอุณหภูมิระหว่างเชื่อมไม่ให้เกิน 300 องศาเซลเซียส โดยตารางที่ 3 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการเชื่อม

1 st Hardfacing
Buffer
Base metal

เชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ
(1-S)

1 st Hardfacing
Buffer
Base metal

เชื่อมแบบอัตโนมัติ
(1-A)

3 rd Hardfacing
2 nd Hardfacing
1 st Hardfacing
Buffer
Base metal

เชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ
(3-S)

3 rd Hardfacing
2 nd Hardfacing
1 st Hardfacing
Buffer
Base metal

เชื่อมแบบอัตโนมัติ
(3-A)

รูปที่ 1 แบบจำลองการทดลองในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2 อุปกรณ์การเชื่อมแบบอัตโนมัติ

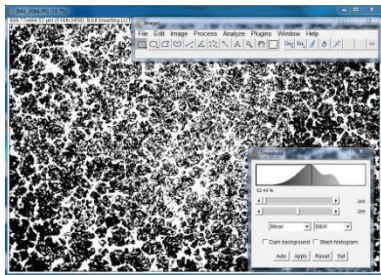
ตารางที่ 3 ค่าตัวแปรในการเชื่อมของแต่ละลวด

	ลวดชั้นรอง พื้น	ลวดพอก แข็ง
	EN14700: T Fe 8	EN14700: T Fe 10
ลวดเชื่อม (mm)	1.6	
ขั้วไฟฟ้า	DCEP	
กระแสไฟฟ้า (A)	190-210	200-220
แรงดันไฟฟ้า (V)	23-25	23-25
ความเร็วในการเชื่อม (cm/min)	35-40	35-40
ความร้อนเข้า (kJ/cm)	6.82	7.35
แก๊สปกคลุม	90% Ar + 10% CO ₂	
อัตราการไหลของ แก๊สปกคลุม (l/min)	10	
ระยะยื่นของลวด (mm)	5	
อุณหภูมิอุ่นชิ้นงาน ก่อนเชื่อม (°C)	300	

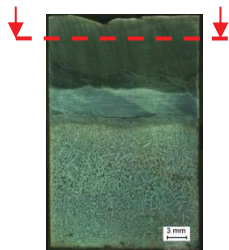
2.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค

หลังการเชื่อมนำชิ้นงานเชื่อมมาตัดเพื่อเตรียมผิวสำหรับตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาคในบริเวณพื้นที่ตามขวาง (Cross Section) และบริเวณผิวด้านบนชั้นพอกแข็ง (Top Surface) ดังรูปที่ 4 โดยทำการหล่อเรซิน (Mounting) แล้วทำการขัดหยาบด้วยกระดาษทราย และขัดละเอียด (Polishing) ด้วยอลูมินาขนาด 5 ไมครอน จากนั้นทำการกัดผิวหน้าชิ้นงาน (Etching) ด้วยไนตอล 2% (2% Nital) เป็นเวลา 6 วินาที สำหรับบริเวณเนื้อโลหะเดิมและบริเวณกระแทกร้อน และกรดวิเอร่า (Villera's reagent) เป็นเวลา 15-30 วินาที สำหรับบริเวณชั้นรองพื้น และชั้นพอกแข็ง หลังจากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องสเตอริโอ (Stereoscope) และวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคในแต่ละบริเวณของชิ้นงานเชื่อมด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (Optical Microscopy: OM) พร้อมทั้งทำการหาปริมาณเฟสมาร์เทนไซต์ในชั้นพอกแข็งด้วยโปรแกรม Image J

โดยแต่ละชิ้นงานมีการถ่ายรูปจำนวนทั้งหมด 5 ตำแหน่ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์มาร์เทนไซต์ สำหรับ ขั้นตอนการหาปริมาณมาร์เทนไซต์ก็นำรูปโครงสร้างจุลภาคของชิ้นพอกแข็งเข้าโปรแกรม Image J จากนั้น เปลี่ยนประเภทของภาพเป็นขนาด 8 bit ภาพจะเปลี่ยนเป็น ขาวกับดำถัดมาทำการเซ็คสเกลของภาพและทำการ วิเคราะห์ปริมาณมาร์เทนไซต์โดยเฟสค่าที่ปรากฏใน โปรแกรมจะเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 โปรแกรม Image J เพื่อหาปริมาณมาร์เทนไซต์



รูปที่ 4 ทิศทางการตัดผิวด้านบนของชิ้นพอกแข็ง

2.3 การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

ทำการทดสอบความแข็งในชิ้นงานเชื่อมด้วยเครื่อง ไมโครวิกเกอร์ส โดยใช้น้ำหนักกดเท่ากับ 200 gf เป็น เวลา 10 วินาที และระยะห่างแต่ละตำแหน่งของการ ทดสอบเท่ากับ 0.25 มิลลิเมตร โดยเริ่มกดจากบริเวณ เนื้อโลหะเดิมจนถึงบริเวณชิ้นพอกแข็งในชิ้นงานที่ตัดตาม ขวาง สำหรับชิ้นงานบริเวณผิวด้านบนชิ้นพอกแข็งได้ทำ การวัดความแข็งแบบสุ่มจำนวน 10 จุด

2.4 การทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive wear test)

ทำการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบการสึกหรอ แบบขัดสี โดยให้ชิ้นงานมีขนาด 12.7 ม.ม. x 25.4 ม.ม. x 74.6 ม.ม. ดังรูปที่ 5 จากนั้นทำการทดสอบการสึกหรอ

แบบขัดสีด้วยเครื่อง Dry Sand Rubber Wheel ตาม มาตรฐาน ASTM G65 ขั้นตอน A โดย สภาวะการ ทดสอบแสดงอยู่ในตารางที่ 4 โดยต้องมีการชั่งน้ำหนักทั้ง ก่อนและหลังการทดสอบเพื่อนำไปหาค่าการสูญเสีย เนื้อเชื่อม (Mass loss)



รูปที่ 5 ชิ้นงานก่อนการทดสอบการสึกหรอ

ตารางที่ 4 ตัวแปรในการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี

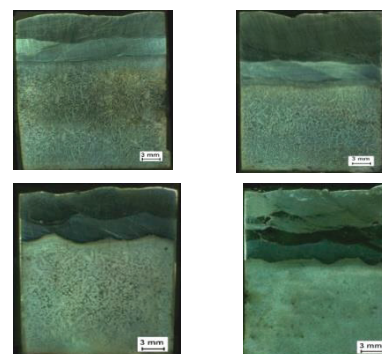
โหลด (N)	130
ขนาดทราย (ไมครอน)	212-300
อัตราไหลของทราย (กรัมต่อนาที)	300
ความเร็วของล้อยาง (รอบต่อนาที)	200
ขนาดล้อยาง (ม.ม.)	228.6
ระยะของการเคลื่อนที่ของล้อยาง (ม.)	4309

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

3.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและจุลภาค

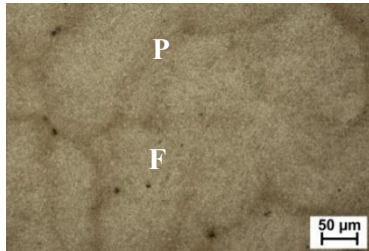
3.1.1 บริเวณพื้นที่ตามขวาง

จากการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคพบว่า ทุกชิ้นงานเชื่อมมีการหลอมลึกที่สมบูรณ์ และไม่พบ ข้อบกพร่องในบริเวณแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 6



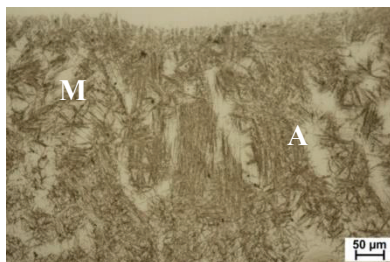
รูปที่ 6 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง

โครงสร้างจุลภาคของบริเวณเนื้อโลหะเดิมประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์ (F) และเพิร์ลไลต์ (P) ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเดิม

สำหรับบริเวณกระทบบร้อนพบว่าประกอบด้วยมาร์เทนไซต์ (M) ซึ่งมีรูปร่างคล้ายเข็มและออสเทนไนต์ตกค้าง (Retained Austenite (A)) ดังรูปที่ 8 อันเป็นผลมาจากในระหว่างการเชื่อมบริเวณนี้ได้รับความร้อนสูงจนเกิดเป็นออสเทนไนต์ และเกิดการเย็นตัวลงมาอย่างรวดเร็ว กลายมาเป็นมาร์เทนไซต์



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกระทบบร้อน

สำหรับบริเวณชั้นรองพื้นพบว่าประกอบด้วยออสเทนไนต์ที่มีเฟอร์ไรต์ตามขอบเกรน ดังตารางที่ 5 รูป ก1 ข1 ค1 และ ง1

สำหรับบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 พบว่าส่วนใหญ่ประกอบด้วยออสเทนไนต์และมาร์เทนไซต์บางส่วน ซึ่งโดยปกติแล้วเชื่อมพอกแข็งชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นมาร์เทนไซต์ แต่เนื่องจากเกิดการเจือจางจากชั้นรองพื้น จึงทำให้ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 มีออสเทนไนต์ในปริมาณมาก ดังแสดงในรูป ก2 ข2 ค2 และ ง2

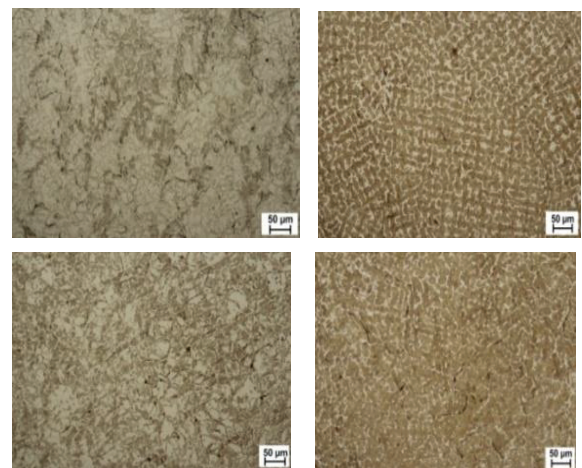
สำหรับบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 2 พบว่าประกอบด้วยออสเทนไนต์และมาร์เทนไซต์เช่นเดียวกับชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 แต่มีปริมาณของมาร์เทนไซต์มากกว่า เนื่องจากเกิดการเจือจางจากชั้นรองพื้นน้อยลง ดังแสดงในรูป ข3 และ ง3

สำหรับบริเวณชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 พบว่าประกอบด้วยโครงสร้างมาร์เทนไซต์ โดยชั้นนี้แทบไม่พบการเจือจางจากชั้นรองพื้น ดังแสดงในรูป ข4 และ ง4

3.1.2 บริเวณผิวด้านบนชั้นพอกแข็ง

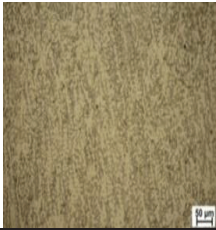
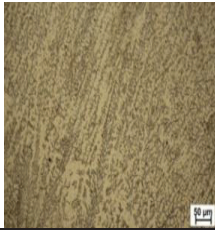
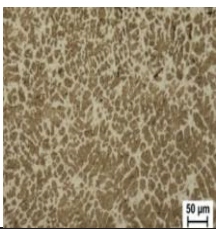
เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวด้านบนชั้นพอกแข็งพบว่าการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นประกอบด้วยกลุ่มก้อนของมาร์เทนไซต์ (Martensite Island) ในขณะที่การเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นส่วนใหญ่ประกอบด้วยออสเทนไนต์และมาร์เทนไซต์เพียงบางส่วนเท่านั้น อันเป็นผลมาจากการเจือจางจากชั้นรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 9

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นของทั้ง 2 วิธีการเชื่อมพบว่าการเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติมีกลุ่มก้อนของมาร์เทนไซต์มากกว่าการเชื่อมพอกแข็งแบบอัตโนมัติ ในขณะที่การเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นพบว่าทั้ง 2 วิธีมีกลุ่มก้อนมาร์เทนไซต์ที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 9 โครงสร้างบริเวณผิวด้านบนชั้นพอกแข็ง

ตารางที่ 5 โครงสร้างจุลภาค

ชั้นงาน	1-S	3-S	1-A	3-A
ชั้นรองพื้น	ก1 	ข1 	ก1 	ง1 
ชั้นพอกแข็ง ชั้นที่ 1	ก2 	ข2 	ก2 	ง2 
ชั้นพอกแข็ง ชั้นที่ 2		ข3 		ง3 
ชั้นพอกแข็ง ชั้นที่ 3		ข4 		ง4 

3.1.3 การวัดปริมาณมาร์เทนไซต์

เมื่อทำการวัดปริมาณมาร์เทนไซต์บริเวณชั้นพอกแข็งของทั้งในบริเวณพื้นที่ตามขวางและบริเวณผิวด้านบนชั้นพอกแข็ง พบว่าการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นมีปริมาณมาร์เทนไซต์มากกว่าการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น เนื่องจากการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นเกิดการเจือจางจากชั้นรองพื้นสูงกว่าการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ส่งผลให้ปริมาณมาร์เทนไซต์ในชั้นพอกแข็งลดลง และเมื่อทำการเปรียบเทียบวิธีการ

เชื่อม พบว่าการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติมีปริมาณมาร์เทนไซต์สูงกว่าการเชื่อมแบบอัตโนมัติ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ปริมาณของเฟสมาร์เทนไซต์ของชั้นพอกแข็ง

ชั้นงาน	ปริมาณมาร์เทนไซต์ (%)	
	Top Surface	Cross Section
1-S	41.37	42.06
3-S	54.25	49.47
1-A	38.45	41.01
3-A	52.01	48.21

3.2 ผลการทดสอบความแข็ง

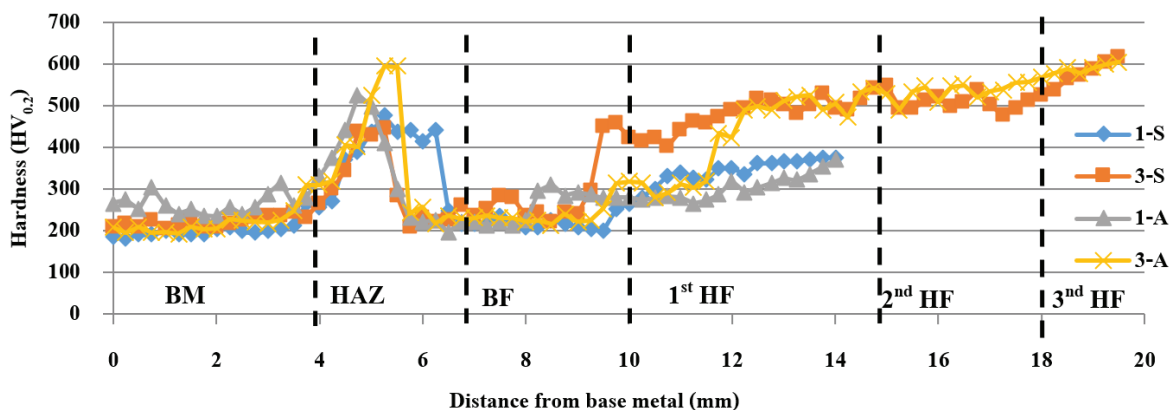
รูปที่ 10 แสดงค่าความแข็งในแต่ละบริเวณของชิ้นงานเชื่อมพอกแข็ง โดยบริเวณเนื้อโลหะเดิมมีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 200 HV เนื่องจากประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ สำหรับบริเวณกระทบบร้อนพบว่ามีความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 480 HV

เนื่องจากประกอบด้วยโครงสร้างมาร์เทนไซต์จากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในระหว่างการเชื่อม สำหรับบริเวณชั้นรองพื้นพบว่ามีความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 230 HV เนื่องจากประกอบด้วยโครงสร้างออสเทนไนต์ที่มีเฟอร์ไรต์ตามขอบเกรน

สำหรับการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น พบว่าชั้นพอกแข็งของการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ (350 HV) มีความแข็งสูงกว่าการเชื่อมแบบอัตโนมัติ (300 HV) เนื่องจากมีปริมาณมาร์เทนไซต์มากกว่า

สำหรับการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างชั้นพอกแข็งพบว่า ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 1 มีค่าความแข็งน้อยที่สุด (430 HV) อันเป็นผลมาจากการเจือจางจากชั้นรองพื้นสูง ในขณะที่ชั้นพอกแข็งชั้นที่ 3 มีค่าความแข็งสูงสุด (600 HV) เนื่องจากแทบไม่มีการเจือจางจากชั้นรองพื้น นอกจากนี้พบว่า การเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ (600 HV) มีความแข็งสูงกว่าการเชื่อมแบบอัตโนมัติ (570 HV) เช่นเดียวกับการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น เนื่องจากมีปริมาณมาร์เทนไซต์สูงกว่า

เมื่อทำการเปรียบเทียบจำนวนชั้นพอกแข็งพบว่า การเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นมีความแข็งสูงกว่าการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น เนื่องจากการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นเกิดการเจือจางจากชั้นรองพื้นสูงกว่า

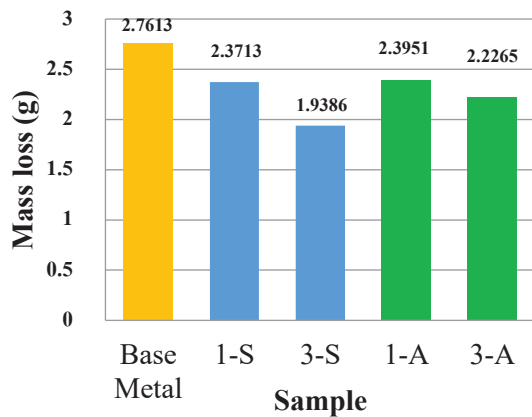


รูปที่ 10 ความแข็งของชิ้นงาน

3.3 ผลการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี

เมื่อทำการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสีแสดงดังรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานซึ่งมีการเชื่อมพอกแข็งมีการสูญเสียเนื้อต่ำกว่าเนื้อโลหะเดิม เนื่องจากบริเวณของชั้นพอกแข็งประกอบด้วยโครงสร้างมาร์เทนไซต์ ในขณะที่บริเวณเนื้อโลหะเดิมประกอบด้วยโครงสร้างเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ ดังนั้นการเชื่อมพอกแข็งมีความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่า

และพบว่า การเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติมีการสูญเสียเนื้อเชื่อมพอกแข็งต่ำกว่าการเชื่อมแบบอัตโนมัติ เนื่องจากมีปริมาณมาร์เทนไซต์มากกว่า จึงสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบจำนวนชั้นพอกแข็งพบว่า การเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นมีการสูญเสียเนื้อเชื่อมพอกแข็งต่ำกว่าการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น เนื่องจากการเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นแทบไม่พบการเจือจางจากชั้นรองพื้น จึงส่งผลให้ยังคงมีปริมาณมาร์เทนไซต์หลงเหลืออยู่มาก ทำให้สามารถต้านทานการสึกหรอได้ดี



รูปที่ 11 ผลการทดสอบการสึกหรอแบบขัดสี

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการวิจัยการเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้า 3.5% โครเมียมด้วยวิธีการเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติและอัตโนมัติ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติในบริเวณชั้นพอกแข็งมีค่าความแข็งและความต้านทานการ

สึกหรอแบบขัดสีสูงกว่าการเชื่อมพอกแข็งแบบอัตโนมัติ เนื่องจากมีปริมาณมาร์เทนไซต์มากกว่า

2. การเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น มีค่าความแข็งและความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสีสูงกว่าการเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น เนื่องจากแทบไม่พบการเงาจากชั้นรองพื้น
3. สำหรับงานวิจัยนี้สภาวะการเชื่อมพอกแข็งที่ดีที่สุดคือ การเชื่อมพอกแข็งแบบกึ่งอัตโนมัติที่มีจำนวนชั้นพอกแข็ง 3 ชั้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ผู้เขียนขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ ในการเอื้อเฟื้อ เครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำการทดลอง งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Syarul, A.M., Izatul, A.I., Amalina, A. and Abdul, G. The Effect of Flux Core Arc Welding Processes on Different Parameters. *Procedia Engineering*, 2012; 41: 1497-1501.
- [2] John, J., Holman, F. and Adolfo, L. The Effects of Welding Processes on Abrasive Wear Resistance for Hardfacing Deposits. *Tribology International*, 2009; 42: 745-49.
- [3] Katherasan, D., Elias, J.V., Sathiya, P. and Noorul Haq, A. Flux Cored Arc Welding Parameter Optimization Using Particle Swarm Optimization Algorithm. *Procedia Engineering*, 2012; 38: 3913-3926.
- [4] Agustin, G., Hernan, G. and Estela, S. Study of Abrasive Wear Resistance of Fe- Based Nanostructured Hardfacing. *Wear*, 2016; 360-361: 14-20.
- [5] Shafiee, A., Nili-Ahmadabadi, M., Ghasemi, H.M. and Hossein-Mirzaei, E. Wear Behavior of a Cr-Mo Steel with Different Microstructures, in Comparison with Austempered Ductile Iron (ADI). *International Journal of Material Forming*, 2009; 2(1): 237-241.
- [6] Repair and Maintenance Welding Handbook. second ed., ESAB.
- [7] Gualco, A., Svoboda, H.G., Surian, E.S. and De Vedia, L.A. Effect of Welding Procedure on Wear Behavior of Modified Martensitic Tool Steel Hardfacing Deposit. *Materials and Design*, 2010; 31: 4165-41173
- [8] Adamiak, M., Gorka, J. and kik, T. Comparison of Abrasion Resistance of Selected Constructional Materials. *Materials and manufacturing engineering*, 2009; 37(2): 375-380.



สัดส่วนที่เหมาะสมของหินฝุ่น ในคอนกรีตผสมเสร็จโดยวิธีซิกซ์ ซิกม่า Appropriate Proportion of Dust Rock In Ready Mix Concrete by Six sigma

วีระชัย อารีรักษ์* และ จีรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์

Weerachai Areerak* and Jeerapat Nagoprasertwong

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330 Thailand

*E-mail: tee_eng1@hotmail.com, jeerapat_n@chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของการใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยใช้แนวทางซิกซ์ ซิกม่า 5 ขั้นตอน วิธีการวิจัยเริ่มจากการกำหนดขอบเขตของปัญหา (Define) ก็คือ การหาแนวทางในการนำหินฝุ่นมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณภาพและลดต้นทุนการเพิ่มส่วนผสมปูนซีเมนต์ จากนั้นทำการวัดและรวบรวมข้อมูล (Measure) เพื่อวัดประสิทธิภาพของวัตถุดิบและระบบการชั่งตวงวัตถุดิบ จากนั้นขั้นตอนต่อมาได้ทำการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze) ด้วยการระดมสมองระหว่างผู้เกี่ยวข้อง เพื่อสร้างแผนภาพสาเหตุและผลและนำแต่ละปัจจัยมาสร้างแผนภูมิพาเรโต ทำให้สามารถระบุถึงสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อปัญหามากที่สุด ต่อมาทำการทดสอบสมมติฐานทางสถิติเพื่อพิสูจน์ว่าสาเหตุดังกล่าวส่งผลกระทบบ้างหรือไม่แล้วนำปัจจัยที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติมาทำการปรับปรุงแก้ไข (Improve) โดยทำการออกแบบการทดลองแบบฟูลแฟกทอเรียล เพื่อหาค่าของปัจจัยที่เหมาะสม และสุดท้ายทำการควบคุม (Control) โดยผลหลังการปรับปรุง พบว่าสามารถลดปริมาณส่วนผสมปูนซีเมนต์ลงได้ คิดเป็นต้นทุนวัตถุดิบที่ลดลงได้ 67 บาทต่อลูกบาศก์เมตร หรือสามารถลดต้นทุนลงได้ 6.13% ของต้นทุนรวมก่อนการปรับปรุง

คำสำคัญ: ซิกซ์ ซิกม่า, หินฝุ่น, คอนกรีตผสมเสร็จ

ABSTRACT

This research was aimed to search for an appropriate proportion of using dust rock as a component for ready-mixed concrete manufacturing. 5-step six sigma was applied as the research methodology. The research was started from defining a problem, that is, finding a way to combine dust rock as a component for ready-mixed concrete manufacturing in order to improve quality and reduce the concrete margin cost. Then, the data was measured and collected for evaluating the effectiveness of materials as well as material weighing system. Next, causes of the problem were analyzed through brainstorming among involved persons so as to design a cause and effect diagram. Each factor was taken for drawing a Pareto chart afterwards so that the biggest causes affecting the problem were identified. The hypotheses were statistically tested to prove whether or not those causes brought about effects indeed. The factors with statistically significant effects were improved through a

Received 3 November 2017

Revised 27 December 2017

Accepted 4 January 2018

full factorial experimental design for examining appropriate values of the factors. Lastly, the experiment was controlled. The post-improvement result indicated that the cement margin was diminished, with the deducted cost at 67 baht/m³. In other words, the cost was decreased 6.13% of total cost before the improvement.

Keywords: Six sigma, dust rock, ready-mixed concrete

1. บทนำ

ในปัจจุบัน คอนกรีตผสมเสร็จเป็นวัสดุก่อสร้างประเภทหนึ่งที่มีความนิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการก่อสร้างอาคาร ถนน บ้านเรือนและระบบสาธารณูปโภคต่าง ๆ ทั้งขนาดเล็กและใหญ่ ดังนั้นเพื่อให้องค์กรสามารถสู้กับคู่แข่งได้ การปรับปรุงคุณภาพ และการลดต้นทุนจึงเป็นสิ่งสำคัญ โรงงานกรณีศึกษาได้ก่อตั้งและเริ่มดำเนินการธุรกิจผลิตคอนกรีตผสมเสร็จตั้งแต่เดือน มีนาคม 2558 ตั้งอยู่ห่างไกลจากแหล่งทรายที่มีค่าความละเอียดผ่านมาตรฐาน Fineness modulus (F.M.) ที่ระหว่าง 2.5-3.0 โดยหากนำทรายจากแหล่งที่มีค่าความละเอียดผ่านมาตรฐานก็จะมีต้นทุนค่าขนส่งที่สูง ดังนั้นทางโรงงานจึงใช้ทรายจากแหล่งในพื้นที่ซึ่งมีความละเอียดมากมาดำเนินการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ โดยหลังจากเริ่มดำเนินการผลิตคอนกรีตทางโรงงานพบปัญหาคุณภาพของคอนกรีตผสมเสร็จมีค่ากำลังอัดต่ำกว่ามาตรฐานโดยค่าเฉลี่ยกำลังอัดคอนกรีตอยู่ที่ 237 กิโลกรัม/ตร.ซม. ซึ่งค่ามาตรฐานที่ทางโรงงานกำหนดจะต้องมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 260-280 กิโลกรัม/ตร.ซม. โรงงานกรณีศึกษาได้ทำการแก้ไขปัญหาในระยะสั้นด้วยการปรับส่วนผสมปูนซีเมนต์ลงในสูตรผสมคอนกรีตเพิ่ม 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพื่อชดเชยค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่ามาตรฐานทำให้ต้นทุนวัตถุดิบในการผสมคอนกรีตเพิ่มขึ้นประมาณ 50 บาท ทางโรงงานจึงมีความต้องการนำหินฝุ่นมาเป็นวัตถุดิบผสมแทนทรายที่ทางโรงงานใช้อยู่ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำเสนอแนวทางซิกซ์ ซิกม่ามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบสูตรการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จใหม่ โดยนำหินฝุ่นซึ่งเป็นวัตถุดิบที่อยู่ในพื้นที่โรงงานกรณีศึกษาโดยการใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลและทำการทดลองซ้ำที่ 2 ครั้งเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม

ของปริมาณการใช้หินฝุ่นเข้ามาเป็นส่วนผสมในคอนกรีตผสมเสร็จ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซิกซ์ ซิกม่า คือวิธีการสำหรับการจัดการคุณภาพโดยมีการนำวิธีการทางสถิติมาใช้ ที่มีการแก้ปัญหาอย่างเป็นระบบและจะควบคุมกระบวนการโดยการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยมีเป้าหมายในการแก้ไขปัญหาที่สาเหตุของปัญหา การดำเนินการตามแนวทางมาตรฐานของซิกซ์ ซิกม่า ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนสำคัญ ดังนี้

1. ระบุนิยามปัญหา (Define Phase) คือ การกำหนดปัญหาและเป้าหมายอย่างชัดเจน
2. ระยะการตรวจวัดปัญหา (Measure Phase) คือ การวัดความสามารถของกระบวนการที่เป็นจริงในปัจจุบัน
3. ระยะการวิเคราะห์ (Analyze Phase) คือ การวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อระบุสาเหตุหลักที่ส่งผลต่อปัญหา
4. ระยะการปรับปรุง (Improve Phase) คือ การปรับตั้งค่าสาเหตุหลักโดยการใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง
5. ระยะควบคุม (Control Phase) คือ การออกแบบระบบควบคุมคุณภาพของกระบวนการ

จากการศึกษาบทความและงานวิจัยในอดีต พบว่า วิทยา เจนจิวัฒน์กุล [1] ได้ทำการนำแนวทางการปรับปรุงของซิกซ์ ซิกม่า มาใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุและปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการพิมพ์ โดยมีการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ตามขั้นตอนของซิกซ์ ซิกม่าได้กล่าวถึงปัญหาของเสียจากการพิมพ์ของกระบวนการผลิตพลาสติก โดยหลังปรับปรุงส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของเสียลดลงเหลือ 1.53% เมื่อเทียบกับเปอร์เซ็นต์ของเสียก่อน

ปรับปรุงซึ่งมีปริมาณ 11.68% เท่ากับว่าสามารถลดปริมาณของเสียได้ถึง 86.90% ชีรเดช วุฒิพรพันธ์ [2] ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตที่รองรับค่ากำลังอัดคอนกรีตระหว่าง 240-260 กิโลกรัม/ตร.ซม. โดยใช้หินขนาด 1 นิ้ว และใช้อัตราส่วนผสมของหินกับทรายเป็น 42% ต่อ 58% โดยน้ำหนัก และจากผลการทดลองสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงได้ 80 กิโลกรัมต่อการผลิต 1 ลูกบาศก์เมตร ปริญญากุณมี [3] ได้ทำการออกแบบการทดลองโดยใช้ตะกรันเหล็กมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีตโดยกำหนดการรับแรงอัดคอนกรีตไว้ที่ 240-260 กิโลกรัม/ตร.ซม. โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล โดยผสมตะกรันเหล็กที่สัดส่วนร้อยละ 10 ผลการทดลองพบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถใช้ตะกรันเหล็กรวมเท่ากับ 207 กก. โดยผสมแทนปูนซีเมนต์ 15.7 กก. ผสมแทนทราย 37.4 กก. และผสมแทนหิน 153.9 กก. ที่อายุคอนกรีต 28 วัน สำหรับการผลิตคอนกรีตที่ 1 ลูกบาศก์เมตร จากสัดส่วนดังกล่าวจะมีกำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 250 กิโลกรัม/ตร.ซม. ซึ่งจากสัดส่วนที่ได้สามารถช่วยในการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกรันเหล็กประมาณ 255 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และลดต้นทุนคอนกรีตลงได้ร้อยละ 5

3. วิธีการวิจัยและผลการวิจัย

งานวิจัยที่ได้ดำเนินการตามแนวทางซิกซ์ ซิกม่า ซึ่งประกอบด้วย 5 ระยะ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ระบุนิยามปัญหา (Define Phase)

เพื่อระบุปัญหาที่จะทำการศึกษา เพื่อนำมาปรับปรุงแก้ไข โดยทำการพิจารณาผลทดสอบตัวอย่างคอนกรีตค่ากำลังอัด 240 กิโลกรัม/ตร.ซม. ซึ่งพบว่า จากผลการทดสอบค่าเฉลี่ยกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 237 กิโลกรัม/ตร.ซม. โดยทางโรงงานได้กำหนดค่ากำลังอัดมาตรฐานไว้ที่ระหว่าง 260-280 กิโลกรัม/ตร.ซม. จากการวิเคราะห์เบื้องต้นคาดว่าสาเหตุน่าจะมาจากทรายที่นำมาใช้มีค่าความละเอียดโดยพิจารณา

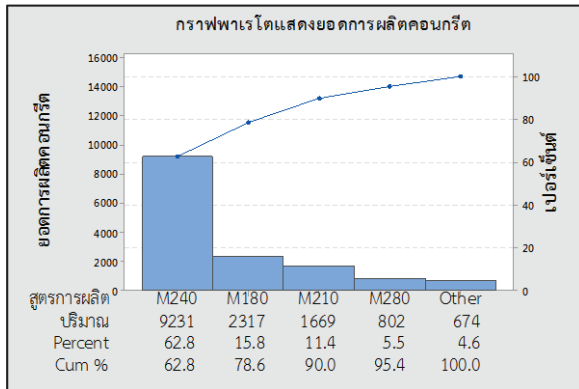
จากผลการทดสอบวัตถุดิบประจำเดือนพบว่า ทรายมีค่าความละเอียด Fineness modulus (F.M.) ที่ 2.06 จากค่ามาตรฐานที่ทางโรงงานกำหนดไว้ระหว่าง 2.5-3.0 ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของคอนกรีตเมื่อส่งถึงลูกค้า ดังนั้น ทางโรงงานแก้ปัญหาด้วยการเพิ่มส่วนเพื่อปูนซีเมนต์ลงไปในส่วนผสมคอนกรีตที่ 30 กิโลกรัม เพื่อให้คอนกรีตมีค่ากำลังอัดเป็นไปตามมาตรฐานที่โรงงานกำหนด

ดังนั้น เมื่อพิจารณาข้อมูลยอดการผลิตคอนกรีตระหว่างเดือนกรกฎาคมถึงธันวาคม ปี 2558 มียอดการผลิตเฉลี่ยที่ 14,693 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นต้นทุนส่วนเพื่อปูนซีเมนต์ประมาณ 1 ล้านบาทในช่วง 6 เดือน

โดยคำนวณจากส่วนเพื่อปูนซีเมนต์ที่ 30 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ราคาปูนซีเมนต์ 2.3 บาทต่อกิโลกรัม ดังนั้น เมื่อมีการทำการคำนวณจะได้ดังนี้ $2.3 \times 30 \times 14693 = 1,013,817$ บาท

โรงงานมีความต้องการลดต้นทุนส่วนเพื่อปูนซีเมนต์ลง ดังนั้น คณะทำงานที่ทางโรงงานแต่งตั้งขึ้นจึงปรึกษาร่วมกันในแนวทางที่จะนำหินฝุ่น ซึ่งเป็นวัสดุทดแทนที่สามารถนำมาเป็นส่วนผสมกับมวลรวมละเอียดดังพบในงานวิจัยของ ชีระ เทพพรหม [4] ที่ได้ทำการศึกษาการนำหินฝุ่นมาเป็นส่วนผสมแทนทรายหยาบ โดยใช้หินฝุ่นจากแหล่งโรงโม่หินนราธิวาส ค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันกับการใช้ทรายหยาบเพียงอย่างเดียว และประกอบกับหินฝุ่นมีอยู่ในพื้นที่และมีราคาถูก ดังนั้นทางโรงงานมีความประสงค์ต้องการทดลองที่จะนำหินฝุ่นจากแหล่งโรงโม่หินสากลพัฒนา อ.นากลาง จ.หนองบัวลำภู ซึ่งเป็นหินฝุ่นที่ได้จากภูเขาหินปูน มาผสมกับทรายละเอียดที่ทางโรงงานใช้อยู่เพื่อลดต้นทุนในส่วนผสมคอนกรีต

เมื่อทำการพิจารณาจากข้อมูลรายงานการผลิตคอนกรีตของโรงงานกรณีศึกษาซึ่งแบ่งแยกตามรหัสสินค้าที่ทำการผลิตจำหน่ายในช่วง 6 เดือนย้อนหลัง คือ ระหว่างเดือนกรกฎาคมถึงธันวาคม ปี 2558 โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ปริมาณยอดผลิตแยกตามสูตรการผลิต

จากรูปที่ 1 พิจารณาจากกราฟพาร์โตพบว่าสูตรการผลิต M240 ที่ทางโรงงานกรณีศึกษาทำการผลิตเพื่อจัดจำหน่ายนั้นเป็นสูตรการผลิตที่มียอดปริมาณการผลิตมากกว่าสูตรการผลิตอื่น ๆ คิดเป็น 62.8 เปอร์เซ็นต์ของยอดการผลิตคอนกรีตทั้งหมด ดังนั้นผู้วิจัยจึงจะทำการเลือกสูตรการผลิต M240 โดยประยุกต์แนวทางซิกซ์ซิกม่า เพื่อทำการหาสัดส่วนที่เหมาะสมของการใช้หินฝุ่นในการผลิตคอนกรีต

3.2 ระยะการตรวจวัดปัญหา (Measure Phase)

เพื่อกำหนดแนวทางในการวัดค่าของปัจจัยต่าง ๆ ก่อนจะดำเนินการศึกษาหรือออกแบบการทดลองและเป็นการทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบการวัดและตรวจสอบวัตถุดิบในปัจจุบัน โดยรายละเอียดดังแสดงต่อไปนี้

3.2.1 วิเคราะห์ระบบการวัดการตรวจสอบวัตถุดิบ

ใช้เครื่องมือ Gage R&R ซึ่งเป็นกระบวนการตรวจสอบเครื่องมือวัดที่ใช้ในกลุ่มอุตสาหกรรมรถยนต์ของอเมริกาเหนือที่เรียกว่า AIAG เพื่อทำการหาความผันแปรของเครื่องมือก่อนนำไปใช้งาน โดยกำหนดให้ค่าความผันแปรต้องไม่มากกว่า 30% จึงจะนำเครื่องมือวัดไปใช้งานได้

ขั้นตอนการตรวจสอบความผันแปรของวัตถุดิบโดยทำการทดสอบสุ่มวัตถุดิบ ซึ่งประกอบด้วย หินขนาด 3/4 นิ้ว หินขนาด 3/8 นิ้ว ทราย หินฝุ่น เพื่อวิเคราะห์ประเมินค่าเฉลี่ยของวัตถุดิบ ซึ่งจากการสุ่ม 10 ครั้งของแต่ละ

วัตถุดิบมาผ่านเครื่องทดสอบขนาดผลรวม ซึ่งผลจากการดำเนินการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Gage R&R ด้วยโปรแกรม MINITAB พบว่าค่าของความผันแปรจากระบบการวัด %Repeatability คำน้อยกว่าเกณฑ์การยอมรับที่ 30% จึงสรุปว่าระบบการวัดมีความผันแปรไม่สูงเกินกว่าที่จะยอมรับได้

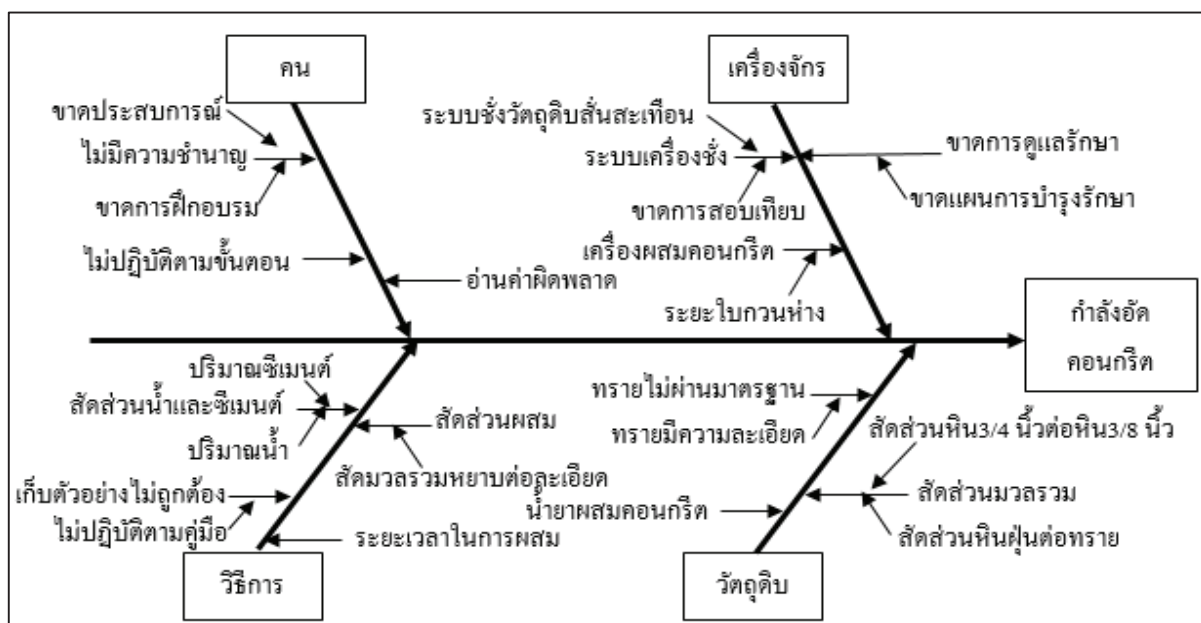
3.2.2 วิเคราะห์ระบบการชั่งตวงวัตถุดิบ

ทำการทดสอบการวัดของระบบการชั่งน้ำหนักวัตถุดิบ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องชั่งหินทราย ปูนซีเมนต์ และน้ำ ซึ่งจะทำให้ใช้คูนน้ำหนักมาตรฐาน 20 กิโลกรัมทำการทดสอบ 10 ครั้ง บนเครื่องชั่งและทำการอ่านค่าน้ำหนักที่ได้ และในส่วนของน้ำยาในการผสมคอนกรีตจะดำเนินการทดสอบโดยการตวงน้ำยาโดยปริมาตร 200 มิลลิลิตรและทดสอบ 10 ครั้ง โดยผลการทดสอบที่ได้เพื่อเป็นการยืนยันว่าระบบการวัดนี้สามารถนำมาใช้ในการวัดในการดำเนินงานวิจัยได้

3.3 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Analyze Phase)

ดำเนินการโดยทีมงานที่ได้คัดเลือกผู้ที่มีคุณสมบัติด้านการศึกษาระดับปริญญาตรี และมีประสบการณ์การทำงานมากกว่า 10 ปี ซึ่งมีความชำนาญและเกี่ยวข้องกับการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จโดยตรง ซึ่งได้กำหนดไว้ในระบนิยามปัญหาแล้ว ประกอบด้วยผู้จัดการโรงงาน วิศวกรโยธา พนักงานผลิต พนักงานคุณภาพ และผู้วิจัย ซึ่งจะมีขั้นตอนดำเนินการระดมสมองเพื่อหาปัจจัยดังนี้

- ใช้แผนภูมิแกงปลาในการเริ่มต้นระดมสมองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการรับกำลังอัดคอนกรีต
- นำปัจจัยที่ได้จากแผนภูมิแกงปลามาจัดกรองด้วย Cause and Effect Matrix คือ แผนภูมิในการจัดลำดับความสำคัญของปัญหา เพื่อให้ได้ปัจจัยที่ส่งผลต่อการรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธีการเรียงลำดับคะแนน ด้วยการ ใช้แผนภูมิพาร์โตในการลำดับความสำคัญของปัญหามากสุดไว้ในลำดับแรก



รูปที่ 2 แผนภูมิพาเรโตเรียงตามคะแนนความสัมพันธ์

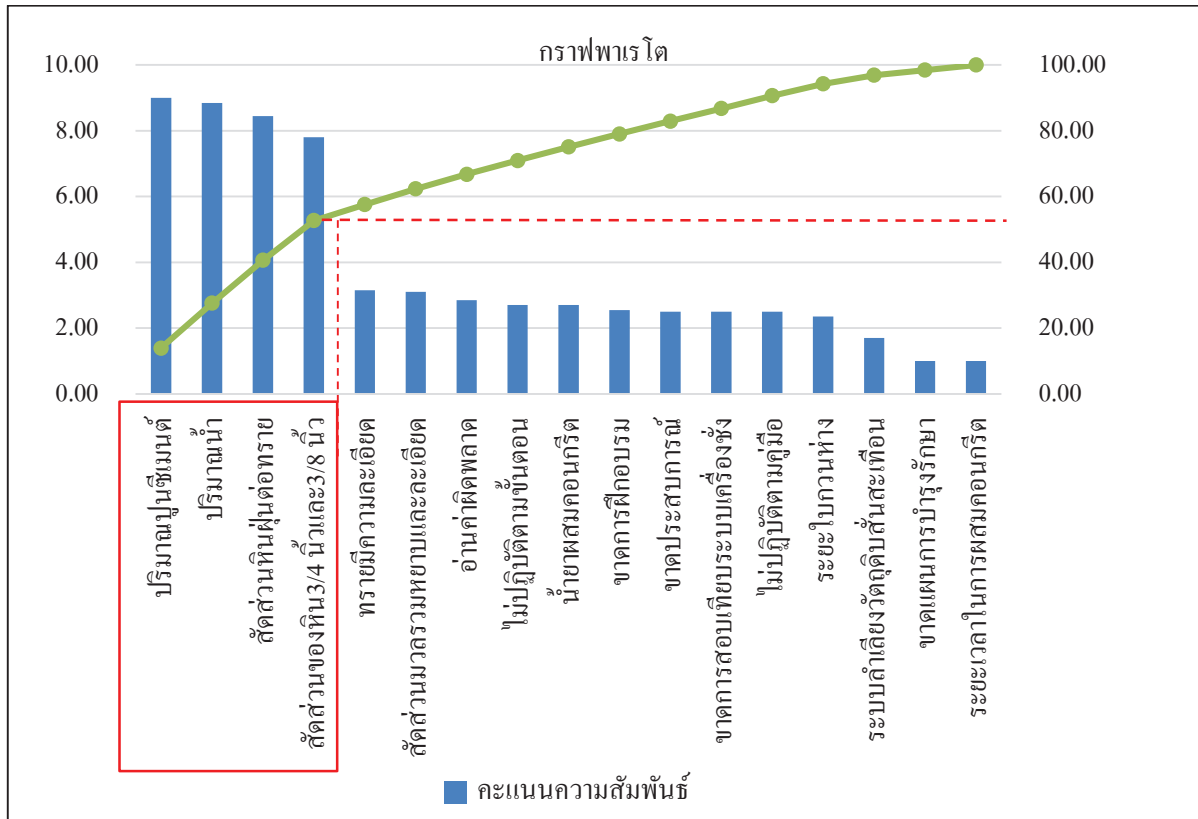
จากรูปที่ 2 ทำการระดมสมองโดยให้คะแนนความสัมพันธ์ของแต่ละสาเหตุ โดยทีมงานประกอบด้วยผู้จัดการโรงงาน วิศวกรโยธา พนักงานผลิต พนักงานควบคุมคุณภาพ วิศวกรฝ่ายผลิต กำหนดเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคะแนนความสัมพันธ์ โดยแบ่งลำดับคะแนนเป็น 1-10 และนำคะแนนมารวมเป็นคะแนนความสัมพันธ์และทำการจัดเรียงคะแนนโดยใช้แผนภูมิพาเรโต ความสัมพันธ์ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

ลำดับ	สาเหตุ	ปัจจัยนำเข้า	คะแนนความสัมพันธ์
1.	คน	ขาดการฝึกอบรม	13
		อ่านค่าผิดพลาด	14
		ไม่ปฏิบัติตามขั้นตอน	13
		ขาดประสบการณ์	12

ตารางที่ 1 (ต่อ) ตารางความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

ลำดับ	สาเหตุ	ปัจจัยนำเข้า	คะแนนความสัมพันธ์
2.	เครื่องจักร	ระบบช่วงวัสดุต้นสะเทือน	8
		ขาดแผนบำรุงรักษา	5
		ระยะใบกวานห่าง	11
		ขาดการสอบเทียบ	12
3.	วัสดุ	ทรายละเอียด	15
		ส่วนหินฝุ่นต่อทราย	42
		น้ำยาผสมคอนกรีต	13
		ส่วนหิน 3/4 หิน 3/8	39
4.	วิธีการ	ไม่ปฏิบัติตามคู่มือ	13
		สัดส่วนมวลรวม	15
		ปริมาณปูนซีเมนต์	45
		ปริมาณน้ำ	44
		ระยะเวลาผสม	5



รูปที่ 3 แผนภูมิฟารโตเรียงตามคะแนนความสัมพัทธ์

จากรูปที่ 3 เมื่อทำการพิจารณาจากกราฟฟารโต ที่เรียงตามคะแนนความสัมพัทธ์จะเห็นได้ว่ามี จำนวน 4 ปัจจัยที่มีค่าคะแนนความสัมพัทธ์สูงกว่าปัจจัยอื่น ๆ อย่างโดดเด่น จึงคัดเลือกปัจจัยดังกล่าวเพื่อมาทำการ วิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย (Factor)	รหัส (Code)	ระดับของปัจจัย (Level)
ปริมาณปูนซีเมนต์ (A)	1	ปูนซีเมนต์ 295 กก.
	0	ปูนซีเมนต์ 285 กก.
	-1	ปูนซีเมนต์ 275 กก.
สัดส่วนหินฝุ่นต่อทราย (B)	1	หินฝุ่น 263 กก. ทราย 612 กก.
	0	หินฝุ่น 175 กก. ทราย 700 กก.
	-1	หินฝุ่น 0 กก. ทราย 875 กก.

ตารางที่ 2 (ต่อ) ปัจจัยและระดับต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย (Factor)	รหัส (Code)	ระดับของปัจจัย (Level)
สัดส่วนหินฝุ่นต่อทราย (B)	1	หินฝุ่น 263 กก. ทราย 612 กก.
	0	หินฝุ่น 175 กก. ทราย 700 กก.
	-1	หินฝุ่น 0 กก. ทราย 875 กก.
สัดส่วนหิน 3/4 ต่อ หิน 3/8 (C)	1	หิน 3/8 327 กก. หิน 3/4 763 กก.
	0	หิน 3/8 218 กก. หิน 3/4 872 กก.
	-1	หิน 3/8 0 กก. หิน 3/4 1,090 กก.
ปริมาณน้ำ (D)	1	185 กก.
	0	175 กก.
	-1	165 กก.

จากตารางที่ 2 แสดงถึงปัจจัยที่ถูกคัดเลือกมาโดยการพิจารณาจากการจัดเรียงคะแนนความสัมพันธ์โดยพาเรโต ซึ่งจากการพิจารณาปัจจัยทั้ง 4 ได้แก่ ปริมาณปูนซีเมนต์ สัดส่วนหินผุ่นต่อทราย สัดส่วนหิน 3/4 นิ้วต่อหิน 3/8 นิ้ว และปริมาณน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต สามารถคิดได้เป็น 52.7% ของคะแนนรวมทั้งหมด

จากนั้นทำการวิเคราะห์เพื่อยืนยันว่าปัจจัยทั้ง 4 ที่ผ่านการระดมสมองและรวบรวมความคิดจากทีมงาน การใช้แผนภูมิแก้มปลา การใช้ Cause and Effect Matrix ว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบสมมติฐานปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต

ปัจจัย (Factor)	ค่า P-Value	ผลการทดสอบ
ปริมาณปูนซีเมนต์ (A)	0.000	มีผลต่อค่ากำลังอัดคอนกรีต
สัดส่วนหินผุ่นต่อ ทราย (B)	0.000	มีผลต่อค่ากำลังอัดคอนกรีต
สัดส่วนหิน 3/4 นิ้วต่อ หิน 3/8 นิ้ว (C)	0.000	มีผลต่อค่ากำลังอัดคอนกรีต
ปริมาณน้ำ (D)	0.000	มีผลต่อค่ากำลังอัดคอนกรีต

จากตารางที่ 3 เป็นการทดสอบสมมติฐานของปัจจัยที่ผ่านการคัดกรองว่ามีอิทธิพลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งพบว่าปัจจัยทั้ง 4 มีผลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3.4 การปรับปรุงแก้ไข (Improve Phase)

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของการใช้หินผุ่นเป็นส่วนผสมในคอนกรีตผสมเสร็จโดยมีขั้นตอนย่อยดังต่อไปนี้

3.4.1 การทดลองและเก็บข้อมูล

ขั้นตอนนี้ผู้วิจัยได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ทำให้ได้ชุดการทดลองทั้งหมด 162 การทดลอง รายละเอียดการปรับตั้งค่าของแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงปัจจัยและระดับต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			หน่วย
	-1	0	1	
ปริมาณปูนซีเมนต์ (A)	275	285	295	กิโลกรัม
สัดส่วนหินผุ่นต่อ ทราย (B)	0	175	263	กิโลกรัม
สัดส่วนหิน 3/4 นิ้วต่อ หิน 3/8 นิ้ว (C)	0	218	327	กิโลกรัม
ปริมาณน้ำ (D)	165	175	185	กิโลกรัม

จากตารางที่ 4 ค่าของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลนี้ ผู้วิจัยจะสนใจพิจารณาค่าความชื้นเหลือของคอนกรีตที่มาตรฐานกำหนดไว้ที่ 7.5 ± 2.5 เซนติเมตร และ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการนำส่วนผสมของปัจจัยที่กำหนดมาออกแบบสัดส่วนในสูตรการผลิตคอนกรีต

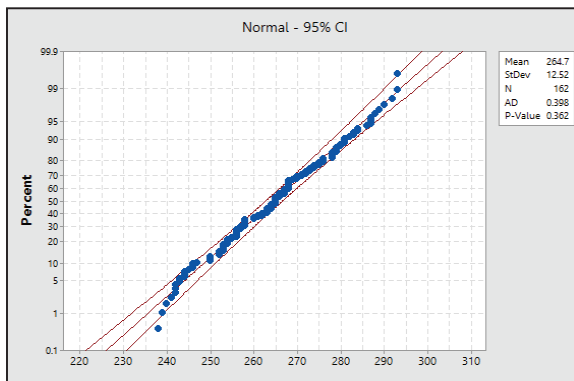
3.4.2 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเพื่อเป็นการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองที่มีความคลาดเคลื่อนจากปัจจัยที่ไม่ได้ควบคุมจำนวนมาก โดยจะทำการทดสอบ 3 ส่วน คือ สมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ สมมติฐานของความเป็นอิสระ สมมติฐานของความแปรปรวนของข้อมูล โดยขั้นตอนการตรวจสอบแสดงได้ดังนี้

(ก) การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ

ทำการทดสอบโดยนำส่วนตกค้าง (Residual) ของค่าตัวแปรตอบสนองมาพิจารณาจากรูปที่ 4 ซึ่งเป็น

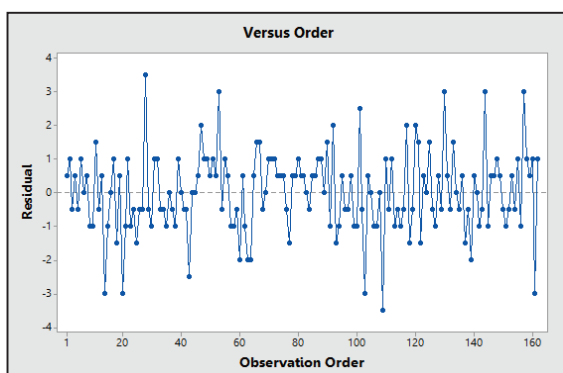
ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบข้อมูลด้วยโปรแกรม MINITAB พบว่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวเป็นแนวเส้นตรง และซึ่งมีค่า P-Value = 0.362 มากกว่าค่าของ P-Value 0.05 จึงทำให้ประมาณได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4 การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ

(ข) การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ

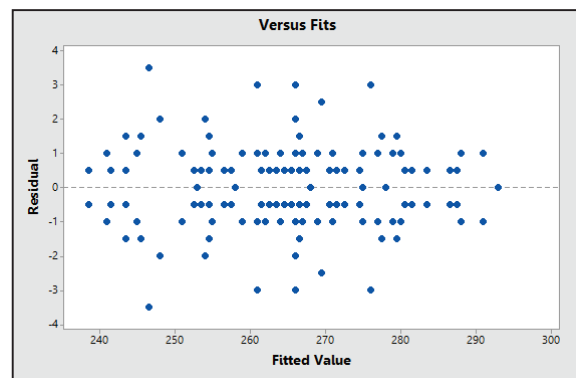
พิจารณาความสัมพันธ์ของแผนภาพการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) และลำดับของการเก็บข้อมูล (Observation Order) โดยลักษณะข้อมูลต้องไม่มีลักษณะที่เป็นแนวโน้ม ควรจะเป็นการกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบ จากรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับลำดับการเก็บของข้อมูลแล้วแสดงให้เห็นว่าลักษณะการกระจายตัวเป็นอิสระต่อกัน



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้างและลำดับของการเก็บข้อมูล

(ค) ทดสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

ทำการพิจารณาการกระจายระหว่างส่วนตกค้างกับผลตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอย (Fitted Value) เพื่อตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน พบว่าค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพอยู่ในระดับที่น่าพอใจ ดังแสดงในรูปที่ 6 เนื่องจากการกระจายตัวไม่มีลักษณะที่เป็นรูปแบบหรือโครงสร้างใด ๆ ทั้งสิ้น



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าที่ถูกฟิต

จากการทดสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4 ถึง 6 พบว่ารูปแบบของค่าส่วนตกค้างเป็นไปตามสมมติฐานที่ถูกต้องตามข้อกำหนด ได้แก่ ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ ข้อมูลมีความเป็นอิสระกัน และข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

3.4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองจะทำได้โดยการนำผลการทดลองมาทำการวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรม MINITAB ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7

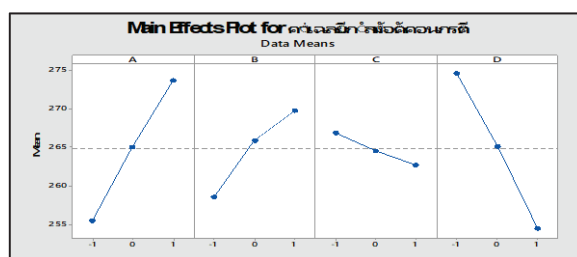
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	80	24992.1	312.40	106.77	0.000
Linear	8	23829.6	2978.70	1018.04	0.000
A	2	8917.0	4458.50	1523.79	0.000
B	2	3499.4	1749.69	597.99	0.000
C	2	458.1	229.06	78.28	0.000
D	2	10955.1	5477.57	1872.08	0.000
2-Way Interactions	24	743.2	30.97	10.58	0.000
A*B	4	159.6	39.91	13.64	0.000
A*C	4	30.4	7.61	2.60	0.042
A*D	4	296.3	74.07	25.32	0.000
B*C	4	19.4	4.85	1.66	0.168
B*D	4	230.8	57.70	19.72	0.000
C*D	4	6.6	1.66	0.57	0.688
3-Way Interactions	32	270.4	8.45	2.89	0.000
A*B*C	8	85.1	10.64	3.64	0.001
A*B*D	8	126.9	15.86	5.42	0.000
A*C*D	8	26.8	3.35	1.15	0.342
B*C*D	8	31.6	3.95	1.35	0.231
4-Way Interactions	16	148.8	9.30	3.18	0.000
A*B*C*D	16	148.8	9.30	3.18	0.000
Error	81	237.0	2.93		
Total	161	25229.1			

รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง

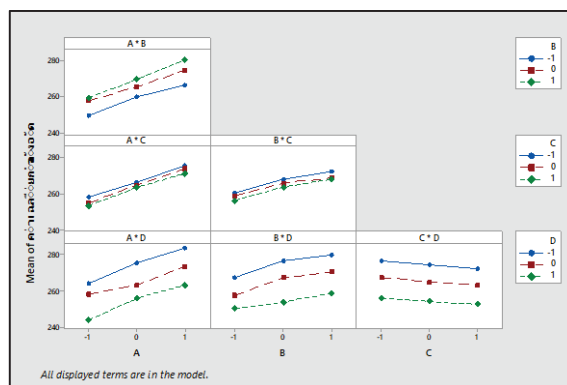
จากรูปที่ 7 เป็นผลการวิเคราะห์ของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งดำเนินการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง โดยใช้โปรแกรม MINITAB การวิเคราะห์นั้น ทำโดยการพิจารณาค่า P-value ซึ่งจะเริ่มจากการพิจารณาปัจจัยหลักที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่าการรับแรงอัดของคอนกรีต ได้แก่ ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณหินผุที่ผสมในทราย ปริมาณหิน #34 นิ้ว และ #38 นิ้ว ปริมาณน้ำ โดยจะทำการพิจารณาค่า P-value นั้น หากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จะทำให้สรุปได้ว่าปัจจัยนั้นมีผลต่อค่าการรับแรงอัดของคอนกรีตเมื่อได้ทำการสังเกตในช่อง P-Value จะพบว่าค่า P-Value ของปัจจัย ปูนซีเมนต์ สัดส่วนหินผุผสมทราย สัดส่วนหิน 3/4 และ 3/8 นิ้ว และปริมาณน้ำมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อค่าการรับแรงอัดของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากนั้นจะพิจารณาในส่วนของอันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัยทุก ๆ คู่แล้วจะพบว่า ค่าปัจจัยปริมาณปูนซีเมนต์กับปริมาณของหินผุ ปริมาณปูนซีเมนต์กับหิน 3/4 นิ้วผสม หิน 3/8 นิ้ว ปริมาณปูนซีเมนต์กับน้ำ ปริมาณหินผุกับปริมาณน้ำ จะมีอิทธิพลต่อค่าการรับแรงอัดของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ โดยพิจารณาจากค่า P-Value ที่ได้นั้น มีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญ ($P\text{-Value} < 0.05$) อันตรกิริยาระหว่าง 3 ปัจจัย ประกอบด้วย ปริมาณปูนซีเมนต์กับ

ปริมาณของหินผุและสัดส่วนหิน 3/4 นิ้ว และ 3/8 นิ้ว ปริมาณปูนซีเมนต์กับปริมาณของหินผุและน้ำ จะมีอิทธิพลต่อค่าการรับแรงอัดของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ โดยพิจารณาจากค่า P-Value ที่ได้นั้นมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญ ($P\text{-Value} < 0.05$) นอกจากนั้นทำการวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่าง 4 ปัจจัย ดังแสดงให้เห็นอันตรกิริยาร่วมกันต่อค่าการรับแรงอัดของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ โดยการพิจารณาค่า P-Value ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9



รูปที่ 8 ผลหลักของปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

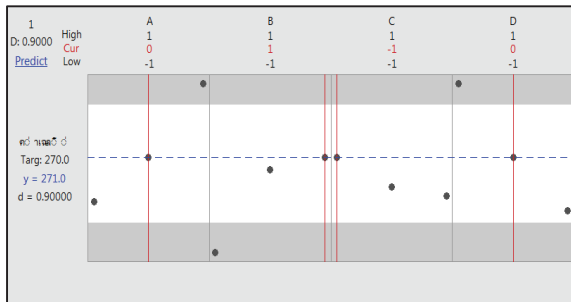


รูปที่ 9 ผลอันตรกิริยาของปัจจัยที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง

3.4.4 การหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ในการวิเคราะห์หาสัดส่วนที่เหมาะสมของการนำหินผุมาเป็นส่วนผสมคอนกรีตให้มีการค่ากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปตามที่กำหนด ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรม MINITAB ผู้วิจัยได้กำหนดค่าขอบเขตล่าง (Lower) ไว้ที่ 260 กิโลกรัม/ตร.ซม. ค่าขอบเขตบน (Upper) ไว้ที่ 280 กิโลกรัม/ตร.ซม. และกำหนดค่าเป้าหมาย (Target)

ไว้ที่ 270 กิโลกรัม/ตร.ชม. ผลที่ได้จะแสดงค่าของปัจจัยที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 10 และตารางที่ 5



รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์สัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีต

ตารางที่ 5 ปัจจัยและระดับที่เหมาะสม

ลำดับ	ปัจจัย	ระดับปัจจัยที่เหมาะสม	หน่วย
1.	ปริมาณปูนซีเมนต์	285	กก.
2.	สัดส่วนหินฝุ่นต่อทราย	263	กก.
3.	สัดส่วนหิน 3/4 นิ้ว ต่อ หิน 3/8 นิ้ว	1,090	กก.
4.	ปริมาณน้ำ	175	กก.

จากตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย ทำให้สามารถสรุปค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่มีผลต่อการรับแรงอัดของคอนกรีตทำให้ค่าแรงรับกำลังอัดของคอนกรีตอยู่ที่ระหว่าง 260-280 กิโลกรัม/ตร.ชม.

3.5 การควบคุม (Control Phase)

ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้การผลิตคอนกรีตเป็นไปตามค่าที่กำหนด

จากตารางที่ 6 พบว่า ต้นทุนทางด้านวัตถุดิบของคอนกรีตกำลังอัด 240 กิโลกรัม/ตร.ชม. มีมูลค่าที่ลดลงประมาณ 67 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อพิจารณาจากค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่

กำหนดไว้ระหว่าง 260-280 กิโลกรัม/ตร.ชม. ตามที่ทางโรงงานกำหนด

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

ประเภท	ค่าใช้จ่ายต้นทุนวัตถุดิบ (บาท)	
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
ปริมาณปูนซีเมนต์	725	656
สัดส่วนหินฝุ่นต่อทราย	146	148
สัดส่วนหิน 3/4 นิ้ว ต่อ หิน 3/8 นิ้ว	218	218
ปริมาณน้ำ	3	3
มูลค่าต้นทุนวัตถุดิบ	1,092	1,025

4. สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางในการหาสัดส่วนที่เหมาะสมของการใช้หินฝุ่นมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีตผสมเสร็จโดยใช้หลักการซิกซ์ ซิกม่า 5 ขั้นตอนโดยมีปัญหาคือ ต้องการนำหินฝุ่นมาเป็นส่วนผสมแทนทรายละเอียดที่โรงงานใช้อยู่ โดยกำหนดเป้าหมาย คือ ค่ากำลังอัดคอนกรีตต้องมีค่าการรับกำลังอัดคอนกรีตระหว่าง 260-280 กิโลกรัม/ตร.ชม. โดยหลังจากการปรับปรุงพบว่า ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ 285 กก. สัดส่วนหินฝุ่นที่ผสมแทนทรายละเอียดที่ 263 กก. ต่อทราย 612 กก. สัดส่วนหิน 3/4 นิ้ว ที่ 1,090 กก. และปริมาณน้ำที่ใช้ 175 กก. ทำให้ลดปริมาณส่วนผสมปูนซีเมนต์ได้คิดเป็นต้นทุนวัตถุดิบที่ลดลงได้ 67 บาทต่อลูกบาศก์เมตร หรือสามารถลดต้นทุนลงได้ 6.13% ของต้นทุนรวมก่อนการปรับปรุง

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิทยา เจนจิวัฒนกุล. การลดของเสียในกระบวนการพิมพ์พลาสติกโดยแนวทางซิกซ์ซิกมา. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [2] ชีรเดช วุฒิพรพันธ์. การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จโดยวิธี
ออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2553.
- [3] ปริญญา คุณมี. การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของการใช้ตะกรันเหล็กเป็นส่วนผสมในการผลิตคอนกรีต. วิทยานิพนธ์
ปริญญา มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2554.
- [4] ชีระ เทพพรหม. การศึกษากำลังอัดคอนกรีตโดยใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมแทนทรายหยาบกรณีศึกษาหินฝุ่นโรงไม้หิน
นราธิวาสโรงไม้หิน. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์, 2552; 1(2): 28-41



การวิเคราะห์ความสูญเสียช่วงขาเข้าระบบป้อนอากาศที่ใช้เผาไหม้ ของโรงไฟฟ้าถ่านหินด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Analysis Loss in Combustion System Suction Duct of a Coal-Fired Power Plant by CFD

ภกวัฒน์ คำเครื่อง¹ และ ยศธนา คุณาทร²

Pakawhat Khumkhreung¹ and Yottana Khunatorn²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200

¹ Mechanical Engineering Program, Faculty of Engineering, and Graduate School,
Chiang Mai University, 50200, Thailand

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Chiang Mai University, 50200, Thailand

¹ E-mail: pakawhat.k@egat.co.th, Telephone Number: 054-252127

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขระบบป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ช่วงขาเข้าของโรงไฟฟ้าถ่านหินขนาดกำลังการผลิต 300 MW โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาแนวทางลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตไฟฟ้า อันเนื่องมาจากความสูญเสียในรูปของความดันตกคร่อม ผลจากแบบจำลองของระบบก่อนการปรับปรุงพบว่า ค่าความดันตกคร่อมสูงสุด 3 อันดับแรก ได้แก่ อุปกรณ์วัดอัตราการไหลข้ออ 90° และข้องขาเข้า ผลจากบริเวณที่มีความดันตกคร่อมสูงสุดก่อนการปรับปรุงที่กล่าวไปข้างต้น จึงเป็นที่มาของการปรับปรุงแบบจำลองแต่ละจุด โดยพบว่าการเปลี่ยนชนิดอุปกรณ์วัดอัตราการไหลจากเดิมที่เป็นแบบ Orifice Airfoil Type ซึ่งติดตั้งที่ขวางพื้นที่หน้าตัดการไหลถึง 65% มาเป็น Average Pitot Tube ที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm สามารถลดค่าความดันตกคร่อมในระบบลงได้ 72% คิดเป็นกำลังงานที่ลดลง 42-54.5 kW ส่วนผลจากการปรับปรุงบริเวณข้ออทั้ง 2 ตำแหน่ง ด้วยการลบมุมและติดตั้ง Guide Vane เพิ่ม มีนัยสำคัญน้อยมากเมื่อเทียบกับความดันตกคร่อมภาพรวมของระบบ

ABSTRACT

The numerical model simulation was applied in this research for 300 MW coal-fired power plant combustion air system suction side. The purpose was power saving of station service in form of pressure drop reduction. The numerical result of original system showed significant pressure drop regions which were flow measurement instrument, 90° mitered elbow and inlet elbow respectively. After modification each section, it was found that the maximum pressure drop decreased by replacing the flow instrument measurement from orifice airfoil type to be average pitot tube 60 mm diameter because the original installed obstacle at section area flow path up to 65%. The average pitot tube could reduce system pressure drop 72% and save fans power about 42-54.5 kW. The results of modification both elbow by fillet and installation guide vane did not have any significant effect with the overall pressure drop after modify in CFD modeling.

Keywords: Airfoil, CFD, Combustion Air, Pitot Tube

Received 5 October 2017
Revised 27 December 2017
Accepted 12 January 2018

1. บทนำ

การเพิ่มขึ้นของความดันตกคร่อมของการไหลในระบบท่อตามโรงอุตสาหกรรมทำให้ระบบพัดลมดูดอากาศต้องทำงานหนักและใช้พลังงานมากขึ้น [1] ส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนการผลิต ดังนั้นการลดความดันตกคร่อมถือว่าเป็นอีกวิธีหนึ่งสำหรับเพิ่มรายได้ แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์หาความดันตกคร่อมในระบบ ยังมีข้อจำกัดเรื่องของจุดวัดและเครื่องมือวัดที่ไม่สามารถหาค่าได้ในทุกตำแหน่งของระบบที่ต้องการ [2] จากที่กล่าวมาข้างต้นแบบจำลองของไหลเชิงพลศาสตร์หรือ CFD จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่คุ้มค่าและสมเหตุผลสำหรับแก้ปัญหาดังกล่าว [2, 3] แต่อย่างไรก็ตามการใช้แบบจำลอง CFD ต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องก่อน โดยทำการเปรียบเทียบกับค่าต่างๆ ที่สามารถวัดได้จากระบบจริง เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้น สามารถใช้พยากรณ์และอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในระบบที่ต้องการวิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับสถานะจริง [3, 4]

การนำแบบจำลองมาใช้วิเคราะห์ปัญหาการไหลในอุตสาหกรรมจะเป็นในลักษณะของการออกแบบเบื้องต้น (Preliminary Design) เพื่อพิจารณาปรับปรุงระบบจริง [5] ตัวอย่างเช่น การปรับปรุงช่องลม (Windbox) บนแบบจำลองเพื่อลดความดันตกคร่อมของระบบป้อนอากาศในเครื่องกำเนิดไอน้ำแบบแก๊ส (N.AL-KHALIDY, 2003) [6], การติดตั้ง Guide Vane บริเวณด้านขาเข้า (Suction) ของพัดลมดูดอากาศบนแบบจำลองเพื่อลดการไหลทวนกลับ (K.K. Parthiban, 2006) [7], การทดลองย้ายแผ่น Baffle บนแบบจำลองบริเวณทางออกของช่องลม เพื่อให้การไหลของอากาศที่ออกจากหัวเผา (Burner) มีความสมดุลและเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ (A. Purimetla and J. Cui, 2009) [8], การวิเคราะห์ความดันตกคร่อมและพฤติกรรม การไหลของอากาศบริเวณข้องอ 90° กรณีติดตั้งและไม่ติดตั้งชุด Guide Vane (S. Moujaes and S. Aekula, 2009) [9] และการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงความดันตกคร่อมของการไหลภายในท่อระบบ

อุ่นอากาศด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีลักษณะผิวพื้นผนังภายในแบบต่าง ๆ (S. Singh *et al*, 2015) [10] เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์ความดันตกคร่อมช่วงขาเข้าของระบบป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ของโรงไฟฟ้าถ่านหินขนาดกำลังการผลิต 300 MW เพื่อลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตที่อยู่ในรูปความสูญเสียของความดันตกคร่อม โดยทำการปรับปรุงแบบจำลองเพื่อเสนอแนะแนวทางการลดความดันตกคร่อมที่มีนัยยะและคุ้มค่าแก่การลงทุน นอกจากนี้การศึกษาและวิเคราะห์ระบบป้อนอากาศข้างต้นยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปัญหาทางวิศวกรรมเกี่ยวกับการไหลของอากาศภายในท่อลมได้อีกด้วย

2. ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย

2.1 ความสูญเสียหลักและความสูญเสียรอง [2]

2.1.1 ความสูญเสียหลัก

ความสูญเสียหลักเกิดจากความเสียดทานอันเนื่องมาจากผลของความหนืดระหว่างของไหลและผิวท่อสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 1 กรณีการไหลแบบราบเรียบ และสมการที่ 2 กรณีการไหลแบบปั่นป่วน นอกจากนี้กรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไม่ได้เป็นวงกลม สามารถคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (Hydraulic Diameter, D_h) ได้จากสมการที่ 3

$$h_l = \left(\frac{64}{Re}\right) \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (1)$$

กรณีการไหลแบบปั่นป่วนไม่สามารถหาค่าได้จากสมการโดยตรง แต่มักจะได้จากผลการทดลองและการวิเคราะห์มิติเข้ามาช่วยในการหาการสูญเสียหลัก จนได้สมการที่สามารถใช้ประมาณค่าดังกล่าว ดังสมการที่ 2

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (2)$$

กรณีที่ท่อไม่เป็นท่อกกลมจะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าในการคำนวณหาได้จากสมการที่ 3

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (3)$$

2.1.2 ความสูญเสียรอง

ความสูญเสียรอง (h_{lm}) คือ การสูญเสียของการไหล หลังจากผ่านจุดต่างๆ ที่ไม่ใช่ท่อตรง เช่น ข้องอ ทางเข้า ทางออก อุปกรณ์วัด วาล์ว เป็นต้น โดยสามารถคำนวณ หาค่าได้จากสมการที่ 4

$$h_{lm} = K \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (4)$$

หรืออาจใช้ความยาวเทียบเท่า L_e ในการหาค่าแทน ซึ่งค่าดังกล่าวหมายถึงความสูญเสียรองที่เกิดขึ้นเทียบกับ ท่อยาวตรงที่มีหน้าตัดคงที่ ดังสมการที่ 5

$$h_{lm} = f \frac{L_e}{D} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (5)$$

2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [9, 10]

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นการแก้สมการ ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนดังหัวข้อที่ 2.3 ซึ่งไม่สามารถ หาคำตอบได้ด้วยวิธีเชิงพีชคณิตดังหัวข้อที่ 2.1 ดังนั้น ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อ ประมาณค่าคำตอบจากสมการอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับ ปัญหาการไหล โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วน ๆ หรือ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์

2. การเลือกฟังก์ชันสำหรับประมาณค่าเอลิเมนต์ (ϕ)

3. กำหนดสมการของแต่ละเอลิเมนต์ (Element) ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ สามารถเขียนโดยย่อได้ดังนี้

$$[K(\phi)]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (6)$$

4. รวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์จากข้อ 3 โดย สมการรวมนี้จะถูกเรียกว่า สมการของระบบ (System) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ เมทริกซ์โดยย่อได้ดังนี้

$$[K]_{sys} \{\phi\}_{sys} = \{F\}_{sys} \quad (7)$$

5. กำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาลงใน สมการที่ได้จากข้อ 4

6. คำนวณปริมาณที่ต้องการ เช่น อัตราการไหล อัตราการถ่ายเทความร้อน และอื่น ๆ

2.3 สมการนาเวียร์-สโตกส์ [2]

2.3.1 สมการอนุรักษ์มวล

อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในเอลิเมนต์ ควบคุมจะเท่ากับผลต่างของการไหลของมวลที่ไหลเข้า

และออกเอลิเมนต์ควบคุม สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ (8)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V}) = 0 \quad (8)$$

2.3.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมอนุภาคของไหล จะต้องเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล ในแนวแกน X, Y และ Z สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ ดังสมการที่ (9) (10) และ (11)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \bar{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + f_x \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \bar{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + f_y \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \bar{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z \quad (11)$$

2.3.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

อัตราการเพิ่มพลังงานของอนุภาคของไหลจะเท่ากับ อัตราของความร้อนสุทธิที่เพิ่มในอนุภาคของไหลบวกกับ อัตราของงานสุทธิที่ทำบนอนุภาคของไหล โดยสามารถ เขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังสมการที่ (12)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \bar{V} \right] \\ = \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} \\ - \frac{\partial (wp)}{\partial z} + \frac{\partial (u\sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} \\ + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v\sigma_y)}{\partial y} \\ + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (w\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{zy})}{\partial y} \\ + \frac{\partial (w\sigma_z)}{\partial z} + \rho \bar{f} \cdot \bar{V} \end{aligned} \quad (12)$$

สมการควบคุม (Governing Equation) ที่เกี่ยวกับ ปัญหาการไหลจากหัวข้อที่ 2.3 จะถูกแทนค่าในเมทริกซ์ $[K]$ จากสมการที่หัวข้อ 2.2 เพื่อใช้ในการหาคำตอบ ส่วนเมทริกซ์ $\{\phi\}$ คือเมทริกซ์ของตัวแปรไม่ทราบค่า ที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันตามรูปร่างของเอลิเมนต์ ค่าเงื่อนไข

ขอบเขตต่าง ๆ ที่กำหนดมาเบื้องต้นจะถูกแทนใน $\{\emptyset\}$ และ $\{F\}$ คือเมทริกซ์ของภาระหรือตัวแปรที่ทราบค่า

2.4 การคำนวณกำลังของพัดลม [1]

กำลังของพัดลมสามารถหาได้จาก ผลคูณของอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศกับความดันดันตกคร่อมของระบบ ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$W = \frac{\dot{m}\Delta P}{\rho \eta_t \eta_m \eta_f} \quad (13)$$

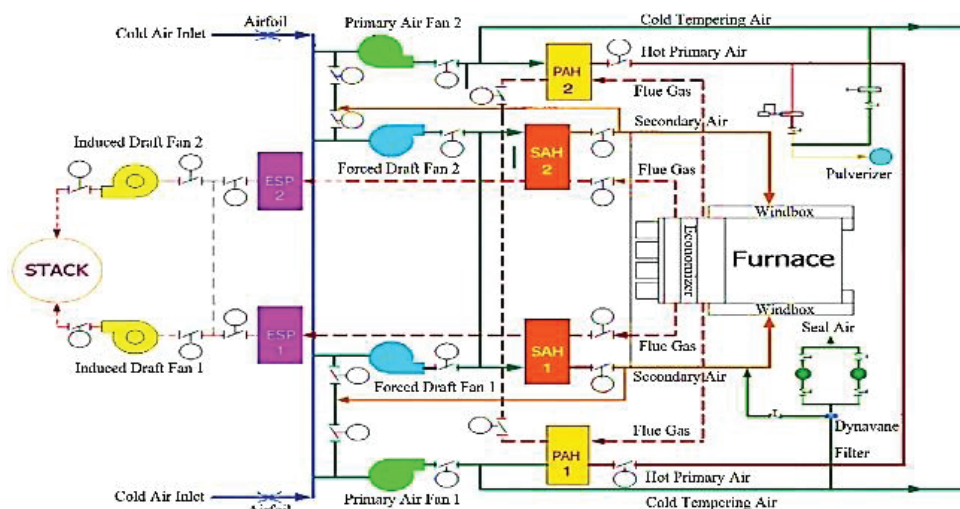
ทฤษฎีที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 2 ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาโดยมีลำดับดังนี้ วิธีพื้นฐานของการคำนวณความสูญเสียหรือความดันตกคร่อมในระบบสามารถหาได้จากหัวข้อ 2.1 แต่จากรูปทรงลักษณะปัญหาที่มีความซับซ้อน จึงจำเป็นต้องใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากหัวข้อ 2.2 เข้ามาช่วย โดยใช้สมการควบคุมที่อธิบาย

พฤติกรรมการไหลจากหัวข้อที่ 2.3 หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการคำนวณและได้คำตอบที่ต้องการ ซึ่งก็คือความดันตกคร่อมของระบบ จากนั้นจึงมาคำนวณหาความดันตกคร่อมในรูปของกำลังงานจากหัวข้อที่ 2.4

3. วิธีการวิจัย

3.1 การสร้างแบบจำลอง

แบบจำลอง CFD ของระบบป้อนอากาศที่สร้างขึ้นจะถูกพิจารณาปัญหาการไหลตั้งแต่บริเวณทางเข้าอากาศ (Cold Air Inlet) ไปจนถึงก่อนขาเข้า (Suction) พัดลมแต่ละตัว ณ สถานะการเดินเครื่องปกติ 300 MW ที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ 330-360 kg/s รายละเอียดดังรูปที่ 1 [13]



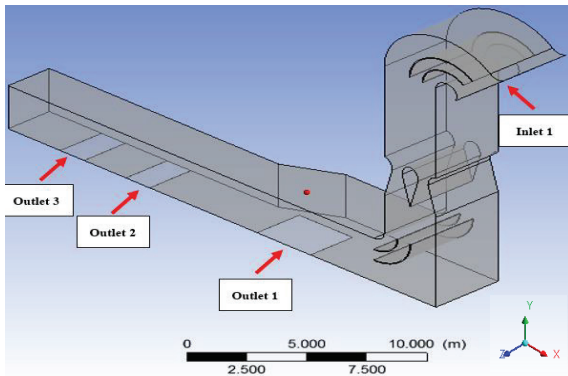
รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของระบบป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ของโรงไฟฟ้าถ่านหินขนาดกำลังการผลิต 300 MW

3.1.1 การสร้างรูปร่างของปัญหา

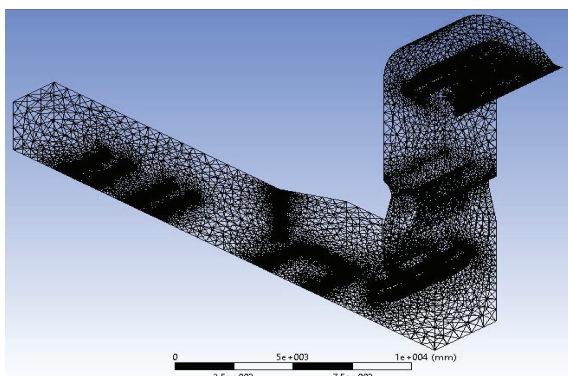
แบบจำลองเชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้สร้างขึ้นด้วยอัตราส่วน 1:1 ใช้เทคนิคสมมาตรของระนาบ YZ ในการสร้างเพื่อลดเวลาในการคำนวณลักษณะดังรูปที่ 2 ผลจากการใช้เทคนิคสมมาตรในการสร้าง จะพิจารณาที่อัตราการไหลในระบบเพียงครึ่งเดียว (165-180 kg/s)

3.1.2 การแบ่งเอลิเมนต์

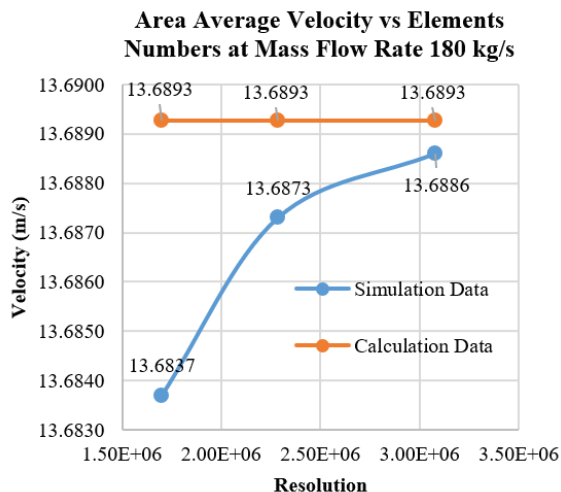
เอลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณสำหรับรูปทรงของแบบจำลองที่ซับซ้อน จะเลือกใช้แบบ Tetrahedral ที่ความละเอียด 3,076,715 เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 3 [14]



รูปที่ 2 รูปทรงแบบจำลอง CFD ของระบบป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ช่วงขาเข้า



รูปที่ 3 แบบจำลองของระบบที่ถูกสร้างด้วยเทคนิคสมมาตรและทำการแบ่งเอลิเมนต์แล้ว



รูปที่ 4 การหาความละเอียดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมโดยพิจารณาที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ 180 kg/s

3.2 การหาความละเอียดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม

การวิเคราะห์ความละเอียดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมมีวัตถุประสงค์คือ หาจำนวนเอลิเมนต์ที่น้อยที่สุด ที่ทำให้คำตอบที่ได้จากแบบจำลอง CFD เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด เพื่อลดเวลาในการคำนวณและให้ได้คำตอบที่มีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ [14] ในที่นี้จะเลือกทำการพล็อตความเร็วของอัตราการไหลเชิงมวล 180 kg/s ที่ได้จากแบบจำลองที่ความละเอียดเอลิเมนต์แต่ละช่วงเทียบกับความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณจากระนาบที่ 1 ของแบบจำลอง จากสมการที่ 14 ซึ่งเป็นพื้นที่หน้าตัดที่อยู่เหนืออุปกรณ์วัดอัตราการไหล Orifice Airfoil Type 2.7 m ผลการตรวจสอบพบว่าความละเอียดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมคือ 3,076,715 รายละเอียดการพล็อต ดังรูปที่ 4

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad (14)$$

3.3 การกำหนดคุณสมบัติของไหล

คุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในแบบจำลอง CFD เป็นอากาศแห้ง อุณหภูมิ 25°C ที่ความดัน 1 บรรยากาศ, ค่าความหนาแน่น (ρ) = 1.185 kg/m³, ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดจลน์ (μ) = 1.831x10⁻⁵ Pa.s แต่เนื่องจากในสภาวะการทำงานจริงของระบบมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วง 20-35°C ส่งผลต่อค่าคุณสมบัติของของไหล รวมถึงค่าต่าง ๆ ที่ถูกนำมาคำนวณและวิเคราะห์ผล ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนและลดผลจากปัญหาดังกล่าว ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองดังรูปที่ 6 จึงทำการสร้างกราฟอัตราการไหลเชิงมวลแทนด้วยตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Numbers; Re) ในแนวแกน X เทียบกับค่าเฮดเฉลี่ยของความเร็ว (Velocity Head) ในแนวแกน Y

ตารางที่ 1 ค่าเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง CFD ที่อัตราการไหลเชิงมวลค่าต่าง ๆ

1. ทางเข้า	ความดันสถิตย = 0				Pa
2. ทางออก 1	70.71	72.85	75.00	77.14	kg/s
3. ทางออก 2	47.14	48.57	50.00	51.42	kg/s
4. ทางออก 3	47.14	48.57	50.00	51.42	kg/s
รวม	165.00	170.00	175.00	180.00	kg/s

ตารางที่ 2 การตั้งค่าตัวแปรสำหรับการคำนวณ

สมมติฐานของการคำนวณ	การตั้งค่า
1. ค่าการลู่เข้าของคำตอบจากการคำนวณ	RMS target = 0.00001
2. รูปแบบคำตอบสุดท้ายของปัญหา	สถานะคงตัว
3. การเลือกแบบจำลองความปั่นป่วน [4, 16]	<i>k-ε</i>

3.4 สมมติฐานการไหลและค่าเงื่อนไขขอบเขต

3.4.1 ค่าเงื่อนไขขอบเขต

เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดในแบบจำลอง CFD พิจารณาจากข้อมูลการเดินเครื่องของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ หน่วยที่ 8-13 อัตราการใช้อากาศในกระบวนการเผาไหม้ ในช่วง 330-360 kg/s หากพิจารณาที่อัตราการไหล 350 kg/s แล้ว สัดส่วนของอากาศที่ถูกดูดเข้าไปที่พัดลม ทุติยภูมิ (Primary Air Fan) และพัดลมทุติยภูมิ (Secondary Air Fan or Force Draft Fan) มีอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ 150 และ 200 kg/s ตามลำดับ หรือคิดเป็นสัดส่วน 3/7 (42.85%) และ 4/7 (37.15%) [13,15] ตามลำดับ เนื่องจากรูปแบบปัญหาของแบบจำลองเป็นลักษณะสมมาตร ดังนั้นการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของปัญหาเป็นไปดังตารางที่ 1 [8, 13, 15]

บริเวณทางเข้า (Inlet) จะถูกกำหนดเป็นความดันสถิตย (Static Pressure) เท่ากับ 0 Pa ส่วนบริเวณทางออก (Outlet) แต่ละจุดจะถูกกำหนดเป็นสัดส่วนดังที่กล่าวไปก่อนหน้านี้และเปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลเชิงมวลแต่ละช่วงแต่ยังคงสัดส่วนเดิมรายละเอียดดังตารางที่ 1

3.4.2 สมมติฐานการไหล

ลักษณะของปัญหาการไหลที่ทำการพิจารณาเป็นการไหลแบบปั่นป่วนที่มีตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง $2 \times 10^6 - 3 \times 10^6$ ซึ่งในที่นี้จะเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน *k-ε* เนื่องจากมีการใช้ในงานวิจัยอื่น ๆ ที่เป็นลักษณะการไหลภายในที่ไม่ซับซ้อน และมีโอกาสที่การคำนวณจะลู่เข้าสู่คำตอบที่สูงกว่าและเร็วกว่าแบบจำลองอื่น ๆ ส่วนคำตอบที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลอง CFD จะพิจารณาที่สถานะคงตัว (Steady-State) ที่ค่าเกณฑ์การลู่เข้าของคำตอบ (Convergence Criteria) ความละเอียดทศนิยมตำแหน่งที่ 5 (1×10^{-5}) รายละเอียดที่กล่าวไปข้างต้น โดยสรุปดังตารางที่ 2

ผลจากการพิจารณาคำตอบที่สถานะคงตัวทำให้กำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) ไม่มีผลต่อคำตอบสุดท้ายที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ซึ่งในที่นี้การคำนวณเริ่มต้นจากสถานะหยุดนิ่งหรือค่าเงื่อนไขเริ่มต้นเริ่มจากศูนย์

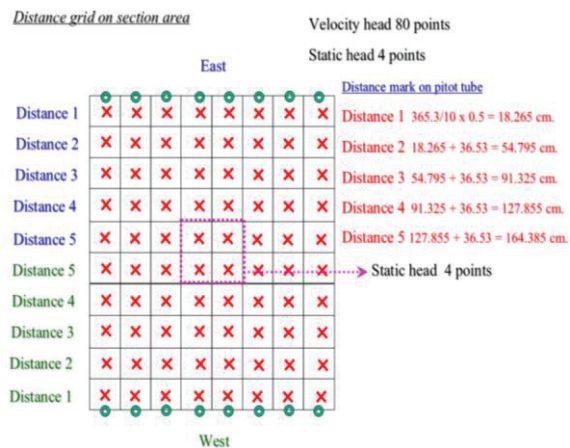
ส่วนสมมติฐานของการวิเคราะห์ระบบเบื้องต้นก่อนการคำนวณมีข้อสันนิษฐานดังนี้

1. ความดันตกคร่อมของระบบหรือแต่ละบริเวณแปรผันตามอัตราการไหลเชิงมวล

2. บริเวณอุปกรณ์วัดอัตราการไหลเป็นจุดที่เกิดความดันตกคร่อมสูงสุดและมีโอกาสลดความตกคร่อมได้สูงที่สุดมากกว่าบริเวณอื่น ๆ

3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

แบบจำลอง CFD ถูกตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้ข้อมูลที่ได้อจากการวัด ณ ตำแหน่งเหนืออุปกรณ์วัดอัตราการไหล 2.7 m ด้วย Pitot Tube ตามมาตรฐาน ASTM D3514 – 00 ข้อมูลจากการวัดจะอยู่ในรูปเสของความเร็ว (Velocity Head) [17] จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์เชิงตัวเลขจาก CFD โดยที่ตำแหน่งของการเก็บข้อมูลและเปรียบเทียบเป็นไปดังรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ [14]

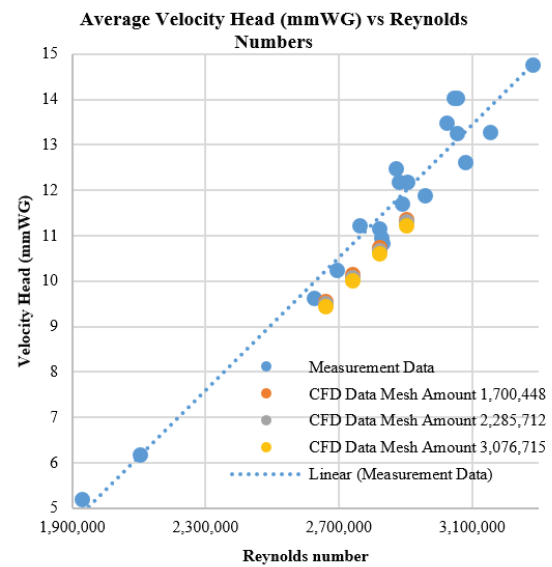


รูปที่ 5 จุดสำหรับเก็บข้อมูลจาก Pitot Tube [16]

เสของความเร็วทั้งหมดที่ได้จากการวัดจะถูกแปลงเป็นค่าเฉลี่ย เพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมด ด้วยสมการที่ 14

$$\text{Velocity head} = \left(\frac{\sum \sqrt{\text{Velocity head data}}}{\text{Number of points}} \right)^2 \quad (14)$$

ผลลัพธ์เชิงตัวเลขจาก CFD กับข้อมูลของการวัด จะถูกนำมาพิจารณา ณ ตำแหน่งเดียวกัน โดยทำการพลอตเปรียบเทียบระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ต่าง ๆ ที่แปลงมาจากอัตราการไหลเชิงมวลช่วง 165-180 kg/s กับเสเฉลี่ยของความเร็ว (Average Velocity Head) ดังรูปที่ 6



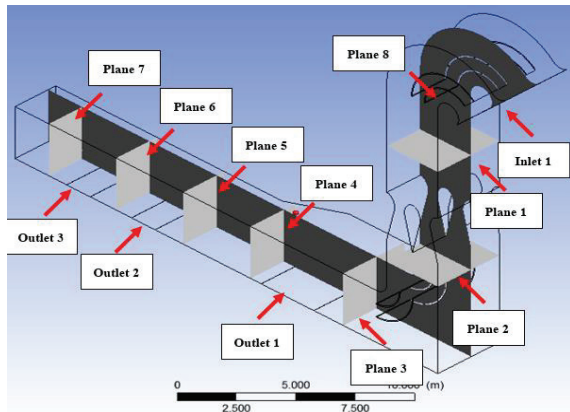
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเสเฉลี่ยของความเร็วและตัวเลขเรย์โนลด์ของข้อมูลที่วัดได้และแบบจำลอง CFD

หลังจากทดลองแทนค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ช่วงอัตราการไหลเชิงมวล 160-180 kg/s แล้วเปรียบเทียบค่าเสเฉลี่ยของความเร็วที่ได้จากการวัดและแบบจำลอง CFD พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ความละเอียดเอลิเมนต์ 1,700,448, 2,285,712 และ 3,076,715 เป็น 1.5%, 1% และ 0.5% ตามลำดับ

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง CFD ด้วยข้อมูลจากการวัดพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันโดยเฉพาะที่ค่าความละเอียดเอลิเมนต์ 3,076,715 ดังนั้นแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ปัญหาการไหลที่มีลักษณะเช่นเดียวกับระบบป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ช่วงเขาเข้าของโรงไฟฟ้าถ่านหินขนาด 300 MW ได้ที่ความละเอียดเอลิเมนต์จำนวน 3,076,715

4. ผลการวิจัย

การพิจารณาความดันตกคร่อมระบบป้อนอากาศช่วงขาเข้าแต่ละส่วน สามารถแบ่งช่วงการพิจารณา ดังรูปที่ 7 ความดันตกคร่อมแต่ละอุปกรณ์พิจารณาจากค่าเฉลี่ยของผลต่างแต่ละระนาบ ดังตารางที่ 3 [15]

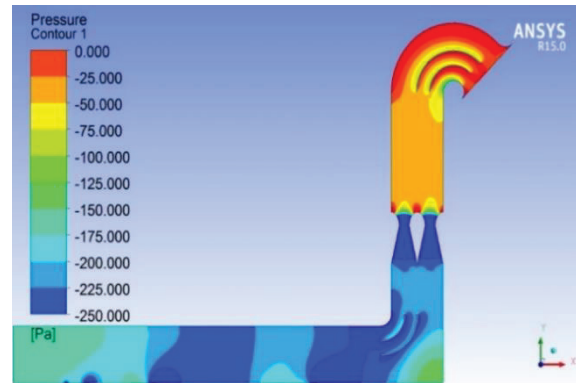


รูปที่ 7 ตำแหน่งการวิเคราะห์ผลของแบบจำลอง CFD

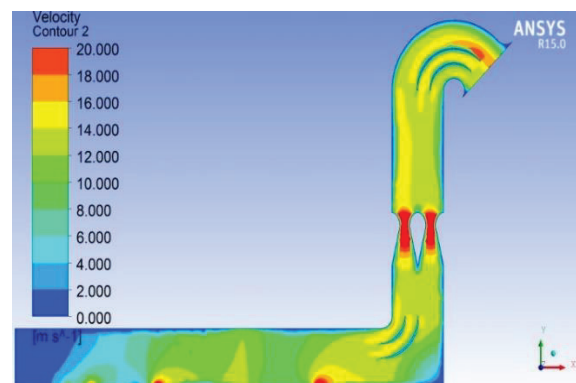
จากตารางที่ 3 พบว่าบริเวณที่เกิดความดันตกคร่อมสูงสุด 3 อันดับแรกและมีนัยสำคัญ ได้แก่ อุปกรณ์วัดอัตราการไหลข้องอ 90° และข้องอขาเข้า คิดเป็นสัดส่วน 75%, 13% และ 7% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเชิงพฤติกรรมจากการกระจายตัว (Contour) ของความดันสถิต (Static Pressure) และขนาดของความเร็ว (Velocity Magnitude) ดังรูปที่ 8 และ 9 พบว่า บริเวณอุปกรณ์วัดอัตราการไหลเกิดการความดันตกคร่อมสูงสุดอันเนื่องมาจากการขวางการไหล สังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความดันและความเร็วอย่างทันทีทันใดในช่วงที่ผ่านบริเวณดังกล่าว ส่วนบริเวณข้องอขาเข้าไม่พบพฤติกรรมที่มีนัยสำคัญ และส่วนของบริเวณข้องอ 90° พบว่าเกิดการต้านการไหล บริเวณมุมด้านขวาล่างสังเกตได้จากช่วงของการกระจายตัวทั้งสองที่สวนทางกับสเกลของค่าความดันและความเร็วด้านซ้าย

หลังจากเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงตัวเลขและพฤติกรรมการไหลจากการกระจายตัวของแบบจำลอง พบว่ามีความสอดคล้องกัน ดังนั้นผลลัพธ์ต่าง ๆ ที่ได้จากแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาขั้นตอนต่อไปได้



รูปที่ 8 การกระจายตัวของความดันสถิตก่อนปรับปรุงที่อัตราการไหลเชิงมวล 175 kg/s



รูปที่ 9 การกระจายตัวของขนาดความเร็วก่อนปรับปรุงที่อัตราการไหลเชิงมวล 175 kg/s

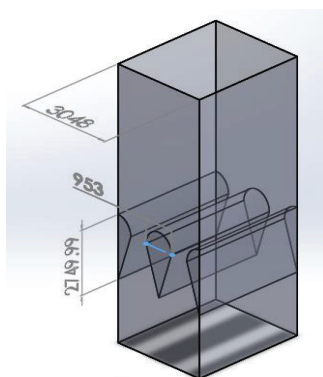
จากข้อมูลข้างต้นจึงเป็นที่มาของการปรับปรุงแบบจำลองของระบบป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ช่วงขาเข้าของโรงไฟฟ้าถ่านหินขนาดกำลังการผลิต 300 MW เพื่อหาแนวทางการลดความดันตกคร่อมภายในระบบดังกล่าว โดยการปรับปรุงบริเวณที่มีความดันตกคร่อมสูงสุดและมีนัยสำคัญ 3 อันดับ อันจะส่งผลช่วยลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิต รายละเอียดและผลของการปรับปรุงจะกล่าวในหัวข้อ 4.1-4.3 ต่อไป

ตารางที่ 3 การแบ่งระนาบจากรูปที่ 7 เพื่อพิจารณาความดันตกคร่อม (ΔP) แต่ละอุปกรณ์ของระบบป้อนอากาศ

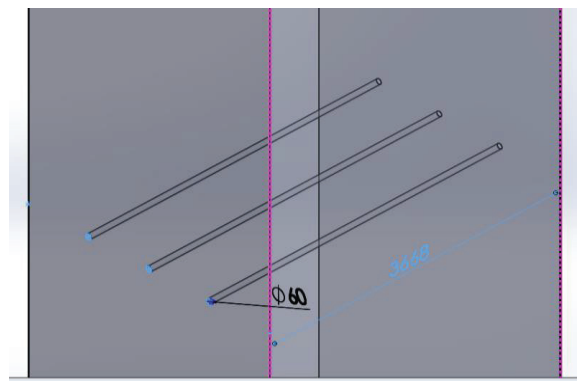
Plane	Mass Flow Rate (kg/s)	165	170	175	180
1. Inlet 1 – Plane 1	ΔP ซ็อกขาเข้า (Pa)	14.75	15.62	16.51	17.42
2. Plane 1 – Plane 2	ΔP อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Pa)	159.57	169.33	179.38	189.71
3. Plane 2 – Plane 3	ΔP ซ็อก 90° (Pa)	27.96	29.65	31.39	33.19
4. Plane 3 – Plane 4	ΔP ทางเข้าพัดลมปฐมภูมิ (Pa)	4.53	4.80	5.07	5.36
5. Plane 4 – Plane 5	ΔP ทางเข้า Reducer (Pa)	3.65	3.86	4.08	4.31
6. Plane 5 – Plane 6	ΔP ทางเข้าพัดลมทุติยภูมิ 1 (Pa)	2.40	2.54	2.68	2.83
7. Plane 6 – Plane 7	ΔP ทางเข้าพัดลมทุติยภูมิ 2 (Pa)	1.72	1.82	1.92	2.03
รวม ΔP (Pa)		214.58	227.62	241.03	254.85

4.1 ปรับปรุงอุปกรณ์วัดอัตราการไหล

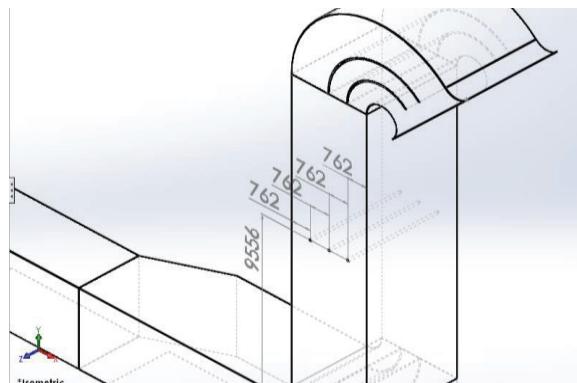
ความดันตกคร่อมสูงสุดของระบบป้อนอากาศที่ได้จากผลลัพธ์เชิงตัวเลขของแบบจำลอง CFD เกิดขึ้นที่บริเวณอุปกรณ์วัดอัตราการไหล Orifice Airfoil Type ดังตารางที่ 3 ดังนั้นจึงทดลองปรับปรุง บริเวณดังกล่าวในแบบจำลองด้วยการเปลี่ยนจากอุปกรณ์วัดเดิมลักษณะดังรูปที่ 10 มาเป็นอุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิด Average Pitot Tube ที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 mm ดังรูปที่ 11 ติดตั้ง 3 ตำแหน่งที่ระยะห่างเท่ากัน 762 mm รายละเอียดและตำแหน่งการติดตั้งดังรูปที่ 12 โดยอุปกรณ์ตัวใหม่ใช้หลักการวัดเช่นเดียวกับอุปกรณ์เดิมแต่มีขนาดเล็กกว่า ทำให้การขวางพื้นที่การไหลน้อยกว่าเดิม ส่งผลให้ความดันตกคร่อมของระบบที่เกิดจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหลที่ลดลงด้วย



รูปที่ 10 รูปทรงของอุปกรณ์วัดอัตราการไหล Orifice Airfoil Type



รูปที่ 11 รูปทรงของ Average Pitot Tube

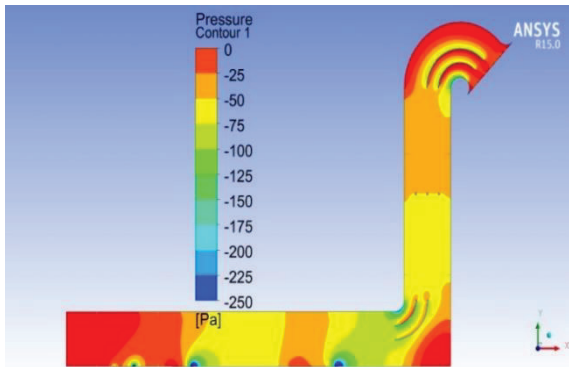


รูปที่ 12 ตำแหน่งการติดตั้ง Average Pitot Tube ทดแทน Orifice Airfoil Type ในแบบจำลอง CFD

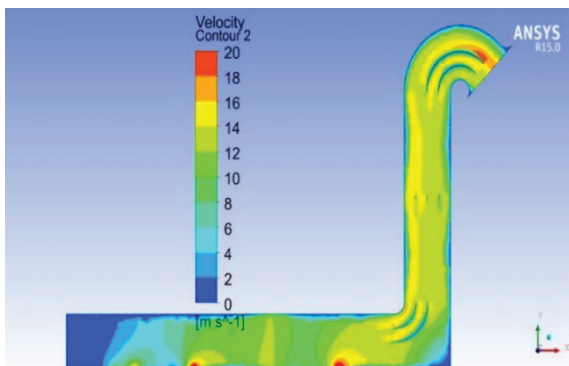
ผลลัพธ์เชิงตัวเลขหลังจากการติดตั้ง Average Pitot Tube จากแบบจำลองพบว่าสามารถลดความดันตกคร่อมได้ถึง 94.5% เมื่อเทียบกับอุปกรณ์เดิมคือ Orifice Airfoil Type รายละเอียดดังตารางที่ 4

ความดันตกคร่อมดังกล่าวเกิดจากพฤติกรรมการณ์การไหลของอากาศที่ผ่าน Average Pitot Tube ดังรูปที่ 13

และ 14 จะเห็นว่า การไหลมีความต่อเนื่องไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วและความดันอย่างทันทีทันใด หลังจากผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหล ซึ่งเป็นเหตุจากการลดพื้นที่หน้าตัดการไหลเพื่อสร้างความดันตกคร่อมในการวัดอัตราการไหลของอากาศ จึงเป็นที่มาของความตกคร่อมที่ลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับก่อนการติดตั้ง Average Pitot Tube



รูปที่ 13 การกระจายตัวของความดันสถิตหลังจากติดตั้ง Average Pitot Tube ที่อัตราการไหลเชิงมวล 175 kg/s



รูปที่ 14 การกระจายตัวของขนาดความเร็วหลังจากติดตั้ง Average Pitot Tube ที่อัตราการไหลเชิงมวล 175 kg/s

หากพิจารณาความดันตกคร่อมที่ลดลงในรูปของกำลังงานที่ลดลงในหน่วย kW ด้วยการแทนค่าลงในสมการที่ 13 ที่อัตราการไหลเชิงมวล 160-180 kg/s โดยใช้ค่า 320-360 kg/s เนื่องจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นเป็นแบบสมมาตรพบว่าสามารถลดการใช้กำลังงานของระบบป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เข้าได้ถึง 42.04-54.55

kW จากเดิม 59.75-77.42 kW พิจารณาที่ประสิทธิภาพของระบบพัฒนา 100%

4.2 ปรับปรุงข้อ 90°

ข้อ 90° เป็นส่วนถัดจากอุปกรณ์วัดอัตราการไหล ที่ถูกพิจารณาปรับปรุงบนแบบจำลอง CFD เนื่องจากมีความดันคร่อมสูงเป็นอันดับสอง โดยแนวทางของการปรับปรุงข้อดังกล่าวมีดังนี้

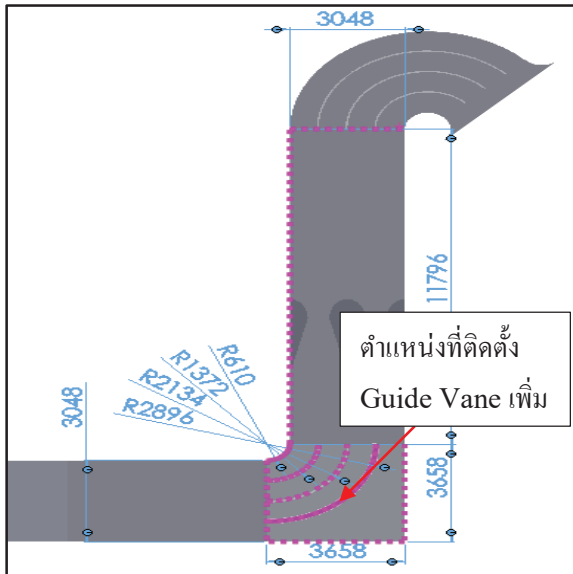
การติดตั้ง Guide Vane เพิ่ม เพื่อให้การกระจายตัวของกระแสการไหลมีความสม่ำเสมอจึงพิจารณาติดตั้งที่ตำแหน่ง $R = 2,964 \text{ mm}$ เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่แบ่งพื้นที่การไหลแต่ละช่องได้เท่ากันทั้งหมด 4 ช่อง

การลบมุมเพื่อลดการเกิดการต้านการไหล (Adverse Pressure) ที่ตำแหน่งมุมของข้อ 90° จึงพิจารณาลบมุมที่ตำแหน่งดังกล่าวด้วยระยะ R สูงสุดคือ 3,658 mm เพื่อให้กระแสการไหลที่ผ่านช่วงโค้งมีความต่อเนื่องและลดการปะทะกับผนัง

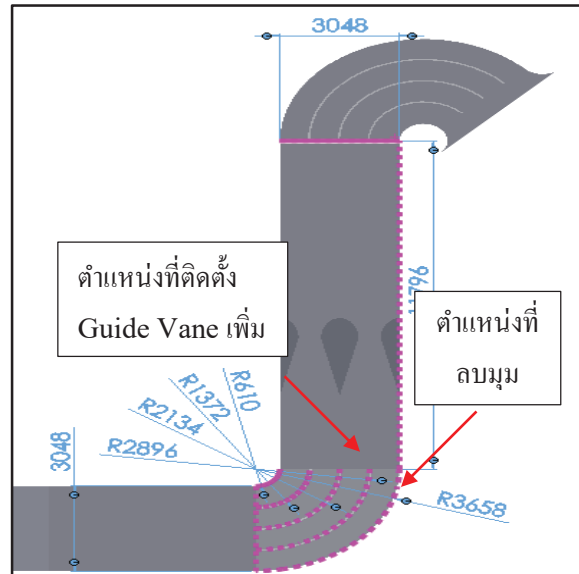
จากแนวทางการปรับปรุงดังกล่าวสามารถแบ่งการปรับปรุงข้อ 90° แต่ละวิธีเพื่อเปรียบเทียบ ได้ดังนี้

1. เพิ่ม Guide Vane จากเดิม 2 ตัว เป็น 3 ตัว ที่ตำแหน่ง $R = 2,946 \text{ mm}$
2. ทำการลบมุมบริเวณข้อ 90° ด้วย $R = 3,658 \text{ mm}$
3. เพิ่ม Guide Vane จากเดิม 2 ตัว เป็น 3 ตัว ที่ตำแหน่ง $R = 2,946 \text{ mm}$ และทำการลบมุมบริเวณข้อ 90° ด้วย $R = 3,658 \text{ mm}$

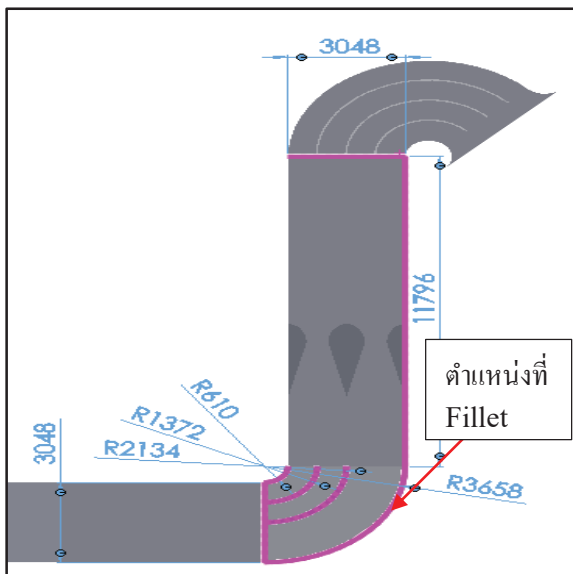
รายละเอียดและตำแหน่งการปรับปรุงตามหัวข้อที่ 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 15, 16 และ 17 ตามลำดับ



รูปที่ 15 รูปทรงของแบบจำลอง CFD หลังจากเพิ่ม Guide Vane จากเดิม 2 ตัว เป็น 3 ตัว ที่ตำแหน่ง $R = 2,896 \text{ mm}$



รูปที่ 17 รูปทรงของแบบจำลอง CFD หลังจากเพิ่ม Guide Vane จากเดิม 2 ตัว เป็น 3 ตัว ที่ตำแหน่ง $R = 2,946 \text{ mm}$ และทำการลบมุมบริเวณข้องอ 90° ด้วย $R = 3,658 \text{ mm}$



รูปที่ 16 รูปทรงของแบบจำลอง CFD หลังจากทำการลบมุมบริเวณข้องอ 90° ด้วย $R = 3,658 \text{ mm}$

ผลลัพธ์เชิงตัวเลขของแบบจำลองหลังจากทำการปรับปรุงบริเวณข้องอ 90° ด้วยการติดตั้ง Guide Vane ทั้ง 2 กรณี พบว่าไม่เป็นไปตามสมมติฐานเนื่องจากค่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นทั้งนี้เป็นผลมาจาก Guide Vane ที่ติดตั้งเพิ่มขึ้นไปขวางพื้นที่การไหล (ตารางที่ 5 และ 7) ส่วนการปรับปรุงด้วยการลบมุมเพียงอย่างเดียวพบว่าไม่เป็นไปตามสมมติฐานคือทำให้ความดันตกคร่อมลดลง (ตารางที่ 6) เนื่องจากกระแสการไหลหลังจากการลบมุมมีการไหลที่ต่อเนื่องขึ้นและการปะทะบริเวณมุม 90° ลดลงจากการลบมุมบริเวณดังกล่าว

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่าผลจากการปรับปรุงด้วยการลบมุมเพียงอย่างเดียวช่วยลดความดันตกคร่อมระหว่างข้องอ 90° ได้ประมาณ 4% เมื่อเทียบกับก่อนปรับปรุง ส่วนการติดตั้ง Guide Vane เพิ่มขึ้นทั้ง 2 กรณี ทำให้ความดันตกคร่อมระหว่างข้องอ 90° เพิ่มขึ้นประมาณ 4.5% และ 2.5% ตามลำดับ

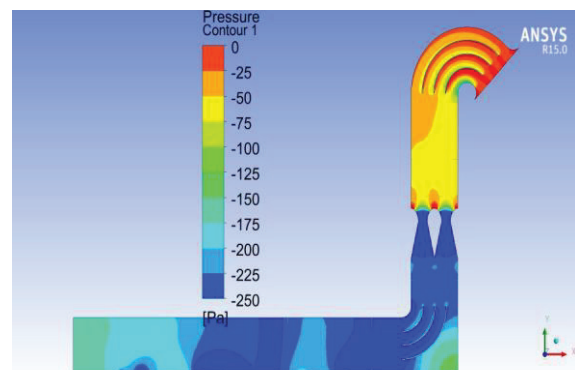
ตารางที่ 4 ผลลัพธ์เชิงตัวเลขของแบบจำลอง CFD ก่อนและหลังการปรับปรุงอุปกรณ์วัดอัตราการไหล

Mass Flow Rate (kg/s)	165	170	175	180
ΔP Orifice Airfoil Type ก่อน (Pa)	159.57	169.33	179.38	189.71
ΔP Average Pitot Tube หลัง (Pa)	8.59	9.1	9.62	10.16
ΔP หลัง-ก่อน	-150.98	-160.23	-169.76	-179.55
% ΔP หลัง-ก่อน	-94.62%	-94.63%	-94.64%	-94.64%

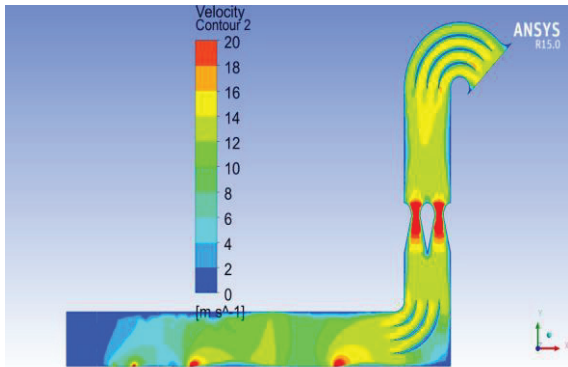
ตารางที่ 5 ผลลัพธ์เชิงตัวเลขของแบบจำลอง CFD ก่อนและหลังการปรับปรุงข้องอ 90°

Mass Flow Rate (kg/s)	165	170	175	180
ΔP ก่อนปรับ (Pa)	27.96	29.65	31.39	33.19
ΔP หลังจากเพิ่ม Guide Vane	29.20	30.90	32.70	34.60
ΔP ก่อนและหลังจากเพิ่ม Guide Vane (Pa)	1.24	1.25	1.31	1.41
% ΔP ก่อนและหลังจากเพิ่ม Guide Vane (Pa)	4.43%	4.22%	4.17%	4.25%
ΔP หลังจาก Fillet (Pa)	26.80	28.50	30.20	31.80
ΔP ก่อนและหลังจากลบมุม (Pa)	-1.16	-1.15	-1.19	-1.39
% ΔP ก่อนและหลังจากลบมุม (Pa)	-4.15%	-3.88%	-3.79%	-4.19%
ΔP หลังจากเพิ่ม Guide Vane และลบมุม (Pa)	28.60	30.30	32.10	33.90
ΔP ก่อนและหลังจากเพิ่ม Guide Vane และลบมุม (Pa)	0.64	0.65	0.71	0.71
% ΔP ก่อนและหลังจากเพิ่ม Guide Vane และลบมุม (Pa)	2.29%	2.19%	2.26%	2.14%

ผลจากการวิเคราะห์เชิงพฤติกรรมการไหลจากการกระจายความดันและความเร็วของแต่ละกรณีการ ได้แก่ การติดตั้ง Guide Vane เพิ่มที่ตำแหน่งข้องอ 90° ทำให้เกิดการขวางกระแสน้ำไหลสังเกตจากบริเวณมุมของข้องอจะพบการไหลต้าน (Adverse Pressure) จากการกระจายตัวของความดัน ดังรูปที่ 18 ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้ที่ตำแหน่งช่องสุดท้ายของ Guide Vane ที่เพิ่มขึ้นมาใหม่ในแบบจำลอง ทำให้การไหลในช่องสุดท้ายเกิดการไหลต้านมากกว่าสภาพก่อนการปรับปรุง เมื่อเทียบการกระจายตัวของความเร็ว รูปที่ 9 กับ 19 จะเห็นว่าบริเวณพื้นที่ความเร็วต่ำ (Low Speed) ชั่วงสัฟ้า การกระจายตัวของความเร็วหลังการปรับปรุงจะขยายออกไปจนถึง Guide Vane ที่ติดตั้งเพิ่มขึ้นมาใหม่ สอดคล้องกับผลลัพธ์เชิงตัวเลขของตารางที่ 5



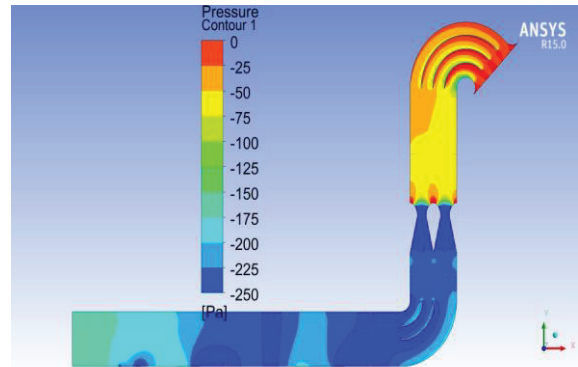
รูปที่ 18 การกระจายตัวของความดันสถิตที่อัตราการไหลเชิงมวล 175 kg/s หลังจากเพิ่ม Guide Vane เป็น 3 ตัว ที่ตำแหน่ง R = 2,946 mm



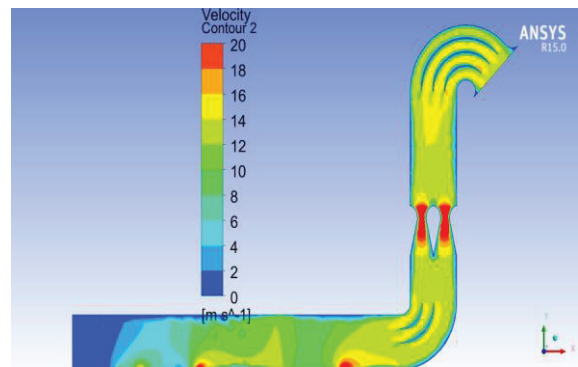
รูปที่ 19 การกระจายตัวของขนาดความเร็วที่อัตราการไหลเชิงมวล 175 kg/s หลังจากเพิ่ม Guide Vane เป็น 3 ตัว ที่ตำแหน่ง $R = 2,946$ mm

การลบมุมที่ตำแหน่งข้องอ 90° ทำให้การดำเนินการไหลลดลง สังเกตได้จากบริเวณมุมของข้องอที่ทำการลบมุมได้จากการกระจายตัวของความดัน รูปที่ 20 และเกิดการไหลที่ต่อเนื่องดัง การกระจายตัวของความเร็ว รูปที่ 21 ที่มีการเปลี่ยนแปลงของแถบสีการกระจายตัวที่มีความต่อเนื่องมากกว่าเมื่อเทียบก่อนปรับปรุง สอดคล้องกับผลลัพธ์เชิงตัวเลขของตารางที่ 5

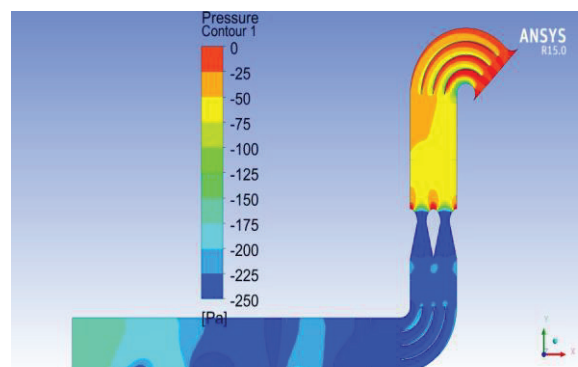
การติดตั้ง Guide Vane และการลบมุมที่ตำแหน่งข้องอ 90° พบว่าการปรับปรุงทั้ง 2 อย่าง ตามสมมติฐานทั่วไป ค่าของความดันตกคร่อมของข้องอหลังการปรับปรุงควรลดลง แต่จากผลลัพธ์เชิงตัวเลขของตารางที่ 5 กลับพบว่าความดันตกคร่อมกลับเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการติดตั้ง Guide Vane ทำให้เกิดการขวางการไหลและความเร็วที่ผ่านแต่ละส่วนที่จากเดิม 3 ช่อง เป็น 4 ช่อง มีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 23 ส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้น ถึงแม้การลบมุมจะช่วยให้การไหลผ่านบริเวณข้องอลดการเกิดการไหลด้านและมีความต่อเนื่องเพิ่มขึ้น แต่ก็ไม่สามารถชดเชยผลจากการต้านการไหลอันเนื่องจากการขวางพื้นที่จาก Guide Vane ที่ติดตั้งเพิ่มจากเดิม 2 ตำแหน่งเป็น 3 ตำแหน่ง



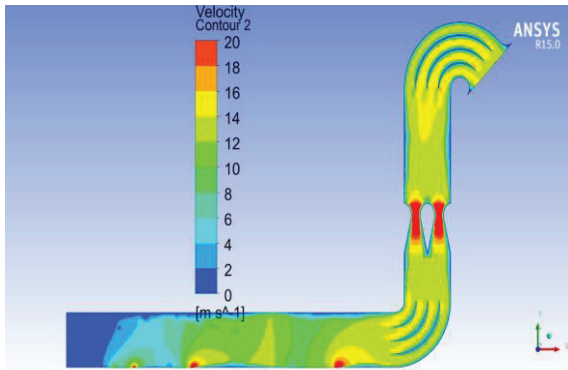
รูปที่ 20 การกระจายตัวของความดันสถิตที่อัตราการไหลเชิงมวล 175 kg/s หลังจากลบมุม บริเวณข้องอ 90° ด้วย $R = 3,658$ mm



รูปที่ 21 การกระจายตัวของขนาดความเร็วที่อัตราการไหลเชิงมวล 175 kg/s หลังจากลบมุมบริเวณข้องอ 90° ด้วย $R = 3,658$ mm



รูปที่ 22 การกระจายตัวของความดันสถิตที่อัตราการไหลเชิงมวล 175 kg/s หลังจากเพิ่ม Guide Vane เป็น 3 ตัว ที่ตำแหน่ง $R = 2,946$ mm และลบมุมบริเวณข้องอ 90° ด้วย $R = 3,658$ mm



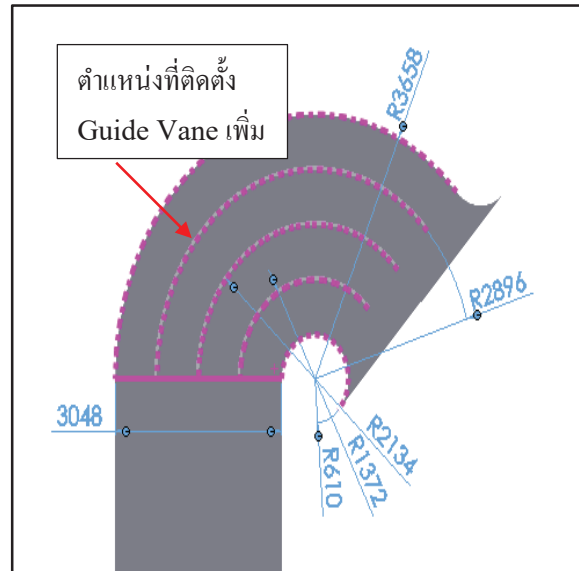
รูปที่ 23 การกระจายตัวของขนาดความเร็วที่อัตราการไหลเชิงมวล 175 kg/s หลังจากเพิ่ม Guide Vane เป็น 3 ตัว ที่ตำแหน่ง $R = 2,946$ mm และลบมุมบริเวณข้องอ 90° ด้วย $R = 3,658$ mm

ผลจากการปรับปรุงข้องอ 90° บนแบบจำลอง พบว่าการปรับปรุงบริเวณดังกล่าวด้วยการลบมุม สามารถช่วยลดความดันตกคร่อมได้ หากคิดในรูปของกำลังงานที่ลดลงจากความดันตกคร่อมในหน่วย kW ที่ช่วงอัตราการไหลเชิงมวล 330-380 kg/s ดังเช่นหัวข้อ 4.1 พบว่าสามารถประหยัดกำลังงานได้ 0.3035-0.3949 kW

นอกจากนี้ยังพบว่าการติดตั้ง Guide Vane ที่มากเกินไปจนความจำเป็น ไม่ส่งผลต่อการลดความดันตกคร่อมของระบบดังเช่นผลลัพธ์เชิงตัวเลขและการกระจายตัวของความดันและความเร็ว ดังที่แสดงไปก่อนหน้านี้

4.3 ปรับปรุงข้องอขาเข้า

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองก่อนการปรับปรุงระบบป้อนอากาศจากตารางที่ 3 พบว่าความดันสูงสุดอันดับที่ 3 ของระบบ เกิดขึ้นที่บริเวณข้องอขาเข้า จึงเป็นที่มาของการทดลองปรับปรุงบริเวณดังกล่าวในแบบจำลองด้วยการติดตั้ง Guide Vane เพิ่มจากเดิมจำนวน 2 ชุด เป็น 3 ชุด ที่ตำแหน่ง $R = 2,964$ mm เพื่อให้การกระจายตัวของกระแสการไหลมีความสม่ำเสมอรายละเอียดดังรูปที่ 24

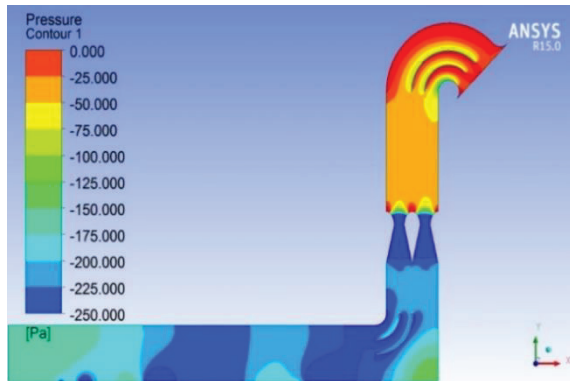


รูปที่ 24 รูปทรงของแบบจำลอง CFD หลังจากเพิ่ม Guide Vane จากเดิม 2 ตัว เป็น 3 ตัว ที่ตำแหน่ง $R = 2,946$ mm ของข้องอขาเข้า

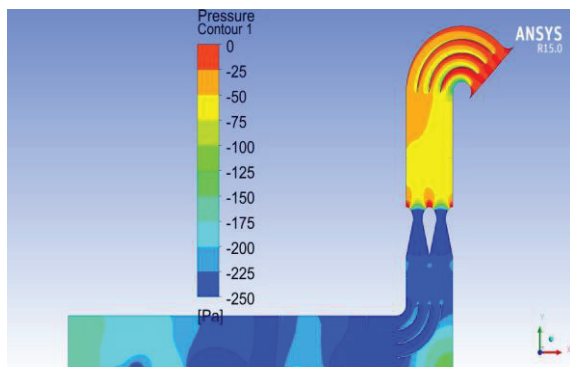
จากผลลัพธ์เชิงตัวเลขดังตารางที่ 6 พบว่าผลจากการติดตั้ง Guide Vane เพิ่ม ส่งผลให้ความดันตกคร่อมบริเวณข้องอ 90° เพิ่มขึ้นถึง 31% เมื่อเทียบกับก่อนการติดตั้ง เป็นผลมาจากการขวางการไหลอันเนื่องมาจากการติดตั้ง Guide Vane ที่มากเกินไป ลักษณะดังเช่นหัวข้อ 4.2

หากพิจารณาเชิงพฤติกรรมจาก การกระจายตัวของความเร็ว พบว่าผลจากการติดตั้ง Guide Vane เพิ่มขึ้นจาก 2 ตำแหน่งเป็น 3 ตำแหน่ง บริเวณข้องอขาเข้ามีความสอดคล้องกับหัวข้อ 4.2 กล่าวคือ จากการกระจายตัวของความดันข้องอขาเข้าก่อนการปรับปรุง จะสังเกตเห็นช่วงของการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงแคบ แต่หลังจากการปรับปรุงพบว่าการเปลี่ยนแปลงของความดันมากกว่า โดยสังเกตจากสีแดงมาเป็นสีส้มก่อนที่จะออกจากบริเวณข้องอขาเข้าดังรูปที่ 23 และ 24 ทั้งนี้เป็นผลมาจาก Guide Vane ที่ติดตั้งเพิ่มทำให้เกิดการขวางการไหลแทนที่จะช่วยกระจายการไหลให้ดีขึ้นตามที่ตั้งสมมติฐานตั้งแต่ต้น นอกจากนี้ผลจากการกระจายตัวของความเร็วหลังการปรับปรุงจะสังเกตเห็นช่วงขาออกจากข้องอขาเข้าจะพบบริเวณความเร็วสูง (High Speed Zone) มีลักษณะเป็น

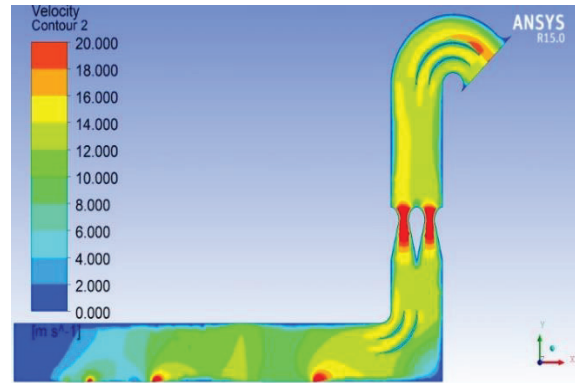
แถบสีเหลืองแตกต่างกันอย่างชัดเจนกับการก่อนการปรับปรุง ดังรูปที่ 27 และ 28 ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่กระแสน้ำของการไหลถูกแบ่งให้เข้าช่องของหน้าตัดที่ถูก Guide Vane ที่ติดตั้งใหม่ ทำให้พื้นที่การไหลแคบลง จากข้อมูลเชิงพฤติกรรมที่กล่าวมาทั้งหมดสอดคล้องกับผลลัพธ์เชิงตัวเลขจากแบบจำลองดังตารางที่ 6



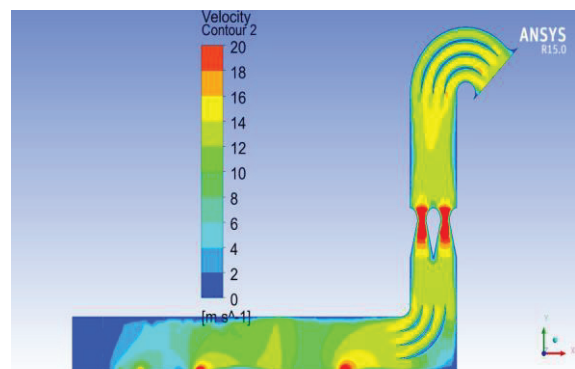
รูปที่ 25 การกระจายตัวของความดันสถิตของขาเข้า ก่อนปรับปรุงที่อัตราการไหลเชิงมวล 175 kg/s



รูปที่ 26 การกระจายตัวของความดันสถิตของขาเข้า หลังจากติดตั้ง Guide Vane ตัวที่ 3 เพิ่ม ที่อัตราการไหลเชิงมวล 175 kg/s



รูปที่ 27 การกระจายตัวของขนาดความเร็วของขาเข้า ก่อนปรับปรุงที่อัตราการไหลเชิงมวล 175 kg/s



รูปที่ 28 การกระจายตัวของขนาดความเร็วของขาเข้า หลังจากติดตั้ง Guide Vane ตัวที่ 3 เพิ่ม ที่อัตราการไหลเชิงมวล 175 kg/s

ผลจากการปรับปรุงข้อขาเข้าบนแบบจำลอง ด้วยการติดตั้ง Guide Vane พบว่าทำให้เกิดความดันตกคร่อมบริเวณดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้นอันเนื่องมาจากการขวางการไหลของจำนวน Guide Vane ที่มากเกินไป

ตารางที่ 6 ผลลัพธ์เชิงตัวเลขของแบบจำลอง CFD ก่อนและหลังการปรับปรุงข้อขาเข้าด้วยการเพิ่ม Guide Vane ที่ตำแหน่ง $R = 2,946 \text{ mm}$

Mass Flow Rate (kg/s)	165	170	175	180
ΔP Original ก่อน (Pa)	14.75	15.62	16.51	17.42
ΔP หลังจากเพิ่ม Guide Vane	19.58	20.74	21.92	23.14
ΔP หลัง-ก่อน (Pa)	4.83	5.12	5.41	5.72
% ΔP หลัง-ก่อน	32.75%	32.78%	32.77%	32.84%

5. วิเคราะห์ผลการวิจัย

หลังจากทำการปรับปรุงระบบบนแบบจำลองและได้ผลการทดลองแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นวิเคราะห์ผลที่ได้เพื่อตรวจสอบแนวทางการปรับปรุงที่บรรลุวัตถุประสงค์ก็สามารถลดความดันตกคร่อมของระบบได้อย่างมีนัยยะ

ผลจากการปรับปรุงตามหัวข้อ 4.1-4.3 สามารถแบ่งรายละเอียดการปรับปรุงของแต่ละหัวข้อและพิจารณาจากภาพรวมของระบบ ได้ดังนี้

5.1 ปรับปรุงแบบจำลอง CFD ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดใหม่ได้แก่ Average Pitot Tube แทนของเดิมที่เป็นแบบ Orifice Airfoil Type ผลหลังจากการติดตั้งสามารถลดความดันตกคร่อมของระบบได้ดังตารางที่ 7

5.2 ปรับปรุงแบบจำลองบริเวณข้องอ 90° แบ่งเป็น 3 วิธี รายละเอียดดังหัวข้อ 4.2.1-4.2.3

5.2.1 ปรับปรุงแบบจำลองด้วยการเพิ่ม Guide Vane เป็น 3 ตัว ที่ตำแหน่ง $R = 2,946$ mm ผลจากการติดตั้งทำให้ความดันตกคร่อมระบบเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 8

5.2.2 ปรับปรุงแบบจำลองด้วยการลบมุมบริเวณข้องอ 90° ด้วย $R = 3,658$ mm ผลจากการติดตั้งทำให้ความดันตกคร่อมของระบบลดลง ดังตารางที่ 9

5.2.3 ปรับปรุงแบบจำลองด้วยการเพิ่ม Guide Vane เป็น 3 ตัว ที่ตำแหน่ง $R = 2,946$ mm และลบมุมบริเวณข้องอ 90° ด้วย $R = 3,658$ mm ผลจากการติดตั้งทำให้ความดันตกคร่อมของระบบเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 10

5.3 ปรับปรุงแบบจำลองด้วยการเพิ่ม Guide Vane จากเดิม 2 ตัว เป็น 3 ตัว ที่ตำแหน่ง $R = 2,946$ mm ของข้องอขาเข้า ผลจากการติดตั้งทำให้ความดันตกคร่อมของระบบเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 11

จากแนวทางการปรับปรุงหัวข้อ 5.1-5.3 พบว่าแนวทางตามหัวข้อที่ 5.1 และ 5.2.2 สามารถลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตได้ แต่หากพิจารณาเรื่องของนัยสำคัญเมื่อเทียบกับภาพรวมของระบบพบว่า การปรับปรุงตามแนวทางของหัวข้อ 5.2.2 มีนัยสำคัญต่อภาพรวมของระบบน้อยมาก ส่วนการปรับปรุงตามแนวทางหัวข้อ 5.1 ทำให้ความตกคร่อมของระบบลดลงอย่างมีนัยสำคัญต่อภาพรวมของระบบสูงมากถึง 72%

ตารางที่ 7 ความดันตกคร่อม (ΔP) ก่อน-หลังปรับปรุงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลเทียบกับภาพรวมของระบบ

Mass Flow Rate (kg/s)	165	170	175	180
ΔP ระบบก่อนปรับปรุง (Pa)	214.58	227.62	241.03	254.85
ΔP จากการปรับปรุง (Pa)	-151	-160.25	-169.78	-179.58
ΔP ระบบหลังปรับปรุง (Pa)	63.58	67.37	71.25	75.27
% ΔP (%)	-70.37%	-70.40%	-70.44%	-70.46%

ตารางที่ 8 ความดันตกคร่อม (ΔP) ก่อน-หลังติดตั้ง Guide Vane เพิ่ม ที่ข้องอ 90° เทียบกับภาพรวมของระบบ

Mass Flow Rate (kg/s)	165	170	175	180
ΔP ระบบก่อนปรับปรุง (Pa)	214.58	227.62	241.03	254.85
ΔP จากการปรับปรุง (Pa)	1.41	1.52	1.59	1.7
ΔP ระบบหลังปรับปรุง (Pa)	215.99	229.14	242.62	256.55
% ΔP (%)	0.66%	0.67%	0.66%	0.67%

ตารางที่ 9 ความดันตกคร่อม (ΔP) ก่อน-หลังการลบมุมที่ข้องอ 90° เทียบกับภาพรวมของระบบ

Mass Flow Rate (kg/s)	165	170	175	180
ΔP ระบบก่อนปรับปรุง (Pa)	214.58	227.62	241.03	254.85
ΔP จากการปรับปรุง (Pa)	-0.99	-0.98	-1.01	-1.1
ΔP ระบบหลังปรับปรุง (Pa)	213.59	226.64	240.02	253.75
% ΔP (%)	-0.46%	-0.43%	-0.42%	-0.43%

ตารางที่ 10 ความดันตกคร่อม (ΔP) ก่อน-หลังติดตั้ง Guide Vane เพิ่ม และลบมุมที่ข้องอ 90° เทียบกับภาพรวมของระบบ

Mass Flow Rate (kg/s)	165	170	175	180
ΔP ระบบก่อนปรับปรุง (Pa)	214.58	227.62	241.03	254.85
ΔP จากการปรับปรุง (Pa)	0.51	0.52	0.59	0.6
ΔP ระบบหลังปรับปรุง (Pa)	215.09	228.14	241.62	255.45
% ΔP (%)	0.24%	0.23%	0.24%	0.24%

ตารางที่ 11 ความดันตกคร่อม (ΔP) ก่อน-หลังติดตั้ง Guide Vane เพิ่มที่ข้องอขาเข้า เทียบกับภาพรวมของระบบ

Mass Flow Rate (kg/s)	165	170	175	180
ΔP ระบบก่อนปรับปรุง (Pa)	214.58	227.62	241.03	254.85
ΔP จากการปรับปรุง (Pa)	3.89	4.12	4.36	4.6
ΔP ระบบหลังปรับปรุง (Pa)	218.47	231.74	245.39	259.45
% ΔP (%)	1.81%	1.81%	1.81%	1.80%

6. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาและวิเคราะห์ระบบป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ของโรงไฟฟ้าถ่านหินที่มีขนาดกำลังการผลิต 300 MW ทำการตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองโดยใช้ค่าเสถียรของความเร็วซึ่งเป็นข้อมูลจากการวัด ณ ตำแหน่งบริเวณเหนืออุปกรณ์วัดอัตราการไหลเดิม 2.7 m เทียบกับผลลัพธ์เชิงตัวเลขของแบบจำลอง CFD พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลทั้ง 2 มีค่าเข้าใกล้ 0 ที่จำนวนเอลิเมนต์ 3,076,715 ซึ่งเป็นแบบ Tetrahedral จากผลลัพธ์เชิงตัวเลขจากแบบจำลองก่อนการปรับปรุง พบว่าค่าความดันตกคร่อมของระบบสูงสุด 3 อันดับแรก ได้แก่ บริเวณอุปกรณ์วัดอัตราการไหล ข้องอ 90° และข้องอขาเข้า จากนั้นจึงทำการปรับปรุงแบบจำลองที่บริเวณทั้ง 3 พบว่าแนวทางการปรับปรุงที่สามารถลดความดันตกคร่อมได้อย่างมีนัยสำคัญมากที่สุด

ได้แก่ การปรับปรุงบริเวณอุปกรณ์วัดอัตราการไหล โดยผลหลังจากการปรับปรุงสามารถลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตได้ถึง 72% ส่วนการปรับปรุงแบบจำลองบริเวณอื่น ๆ มีนัยสำคัญต่อความดันตกคร่อมของระบบน้อยมาก ดังนั้นหากมีการพิจารณาปรับปรุงระบบป้อนอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ช่วงขาเข้า ควรเลือกการปรับปรุงบริเวณอุปกรณ์วัดอัตราการไหลก่อนเป็นอันดับแรก

การปรับปรุงบริเวณข้องอทั้ง 2 พบว่าการลบมุมบริเวณมุมของข้องอ 90° สามารถลดความดันตกคร่อมบริเวณดังกล่าวได้ประมาณ 4% เมื่อเทียบกับก่อนปรับปรุง แต่เมื่อเทียบกับภาพรวมของระบบคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 0.5% ซึ่งมีนัยสำคัญน้อยมากดังที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ ผลจากการปรับปรุงข้องอที่ไม่สามารถลดความดันตกคร่อมได้อย่างมีนัยยะ แสดงให้เห็นว่าการออกแบบที่

บริเวณข้อต่อทั้ง 2 มีความเหมาะสมอยู่แล้ว ดังนั้นในทางปฏิบัติหากพิจารณาเรื่องความคุ้มค่าและโอกาสในการคืนทุน ควรปรับปรุงเฉพาะบริเวณอุปกรณ์วัดอัตราการไหลเท่านั้น

จากข้อมูลและผลการวิจัยที่กล่าวไปทั้งหมดเป็นลักษณะของการนำ CFD มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบทางอุตสาหกรรม เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการออกแบบและทดลองทางวิศวกรรม นอกจากนี้การสร้างแบบจำลองยังช่วยยืนยันสมมติฐานที่ตั้งขึ้นก่อนนำไปสู่การตัดสินใจทางวิศวกรรมต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) ที่เป็นผู้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่สำหรับจัดงานวิจัย

8. ภาคผนวก

รายการสัญลักษณ์

A	คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ (m^2)
D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)
D_h	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของท่อ หรือ Hydraulic Diameter (m)
e	คือ พลังงาน (J)
F	คือ แฟกเตอร์ความเสียหาย
$\vec{f}$	คือ แรงในรูปของเวกเตอร์ (N)
$\{F\}_e$	คือ เมทริกซ์ภาระของเอลิเมนต์
$\{F\}_{sys}$	คือ เมทริกซ์ภาระของระบบ

K	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียรอง
k	คือ ค่าการนำความร้อน ($W/m.K$)
$[K(\emptyset)]_e$	คือ เมทริกซ์ของแต่ละเอลิเมนต์
$[K]_{sys}$	คือ เมทริกซ์ของระบบที่รวมเอลิเมนต์ย่อย
L	คือ ความยาวของท่อ (m)
L_e	คือ ความยาวเทียบเท่าท่อตรง (m)
$\dot{m}$	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
P	คือ เส้นรอบรูปของท่อ (m)
ΔP	คือ ความดันตกคร่อมของระบบ (Pa)
P	คือ ความดัน (Pa)
$\bar{Q}$	คือ ฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ย (W/m^2)
T	คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
t	คือ เวลา (s)
u	คือ ความเร็วในแนวแกน X (m/s)
V	คือ ความเร็วเฉลี่ย (m/s)
$\bar{V}$	คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s)
$\vec{V}$	คือ ความเร็วในรูปของเวกเตอร์ (m/s)
v	คือ ความเร็วในแนวแกน Y (m/s)
W	คือ กำลังของพัดลม (Watt)
w	คือ ความเร็วในแนวแกน Z (m/s)
η_f	คือ ประสิทธิภาพของการส่งกำลังพัดลม
η_m	คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์
η_t	คือ ประสิทธิภาพของการส่งกำลัง
ρ	คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
σ	คือ ความเค้นดึงฉาก (N/m^2)
τ	คือ ความเค้นเฉือน (N/m^2)
$\{\emptyset\}_e$	คือ เมทริกซ์เวกเตอร์ไม่ทราบค่าที่อยู่ในรูปฟังก์ชันประมาณค่าของเอลิเมนต์
$\{\emptyset\}_{sys}$	คือ เมทริกซ์เวกเตอร์ไม่ทราบค่าของระบบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ASHRAE. Fundamentals. American Society of Heating, Refrigeration and Air Condition Engineer, Atlanta, 1997.
- [2] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และไฟไนต์วอลูม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

- [3] วิโรจน์ ลิ่มตระการ. Computational Fluid Dynamics Analysis. ศูนย์บริการปรึกษาการออกแบบและวิศวกรรม (DECC), 2553.
- [4] Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. Pearson Education Ltd., 2007.
- [5] Anderson, J. D. Computational Fluid Dynamics; The Basics with Applications. McGraw-Hill, 1995.
- [6] Al-Khalidy, N. Design Optimization of Industrial Duct Using Computational Fluid Dynamics. Third International Conference on CFD in the minerals and Process Industries, CSIRO, Malborne, Australia, 10-12 December 2003.
- [7] Parthiban, K.K. Case Studies in Application of CFD Analysis Technique for Auxiliary Power Saving. Venus energy audit system, 2006.
- [8] Purimetla, A. and Cui, J. CFD Studies on burner secondary flow. *Applied Mathematical Modeling*, 2009; 33: 112-1140.
- [9] Moujaes, S. and Aekula, S. CFD Prediction and Experimental Comparison of Pressure Drop Effects of Turning Vane in 90° Duct Elbows. *Journal of Energy Engineering*, 2009; 135(4).
- [10] Singh, S., Singh, B., Hans, V.S., R.S. and Gill, R.S. CFD Investigation on Nusselt Number and Friction Factor of Solar Air Heater Duct Roughened with Non-Uniform Cross-Section Transverse Rib. *Energy*, 2015; 84: 509-517.
- [11] วิโรจน์ ลิ่มตระการ. Basic Finite Element method. ศูนย์บริการปรึกษาการออกแบบและวิศวกรรม (DECC), 2553.
- [12] Lewis, R.W., Nithiarasu, P. and Seetharamu, K. N. Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow. John Wiley and Sons Ltd., 2004.
- [13] Mae-Moh 8-13 System Description Level 1 Boiler Auxiliary Operation: Primary and Force Draft Fan. MAE MOH Power Plant Operation Department, Electricity Generating Authority of Thailand. 2007.
- [14] ANSYS CFX® Manual. ANSYS Ltd., 2015.
- [15] Electricity Generating Authority of Thailand. Technical Data Book Plant Operation Division 2. MAE MOH Power Plant Operation Department, 1989.
- [16] Wilcox, D. C. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries Inc., 1994.
- [17] The American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Average Velocity in a Duct (Pitot Tube Method) Designation D 3154 – 50. 1995.



การจำลองการไหลของน้ำใต้ดินและการรุกตัวของ น้ำเค็มรอบบ่อเก็บน้ำ จังหวัดพังงา

Simulation of Groundwater Flow and Saltwater Intrusion around a Storage Pond in Phang-nga Province

พรรษวรรณ บุญยรัตพันธุ์¹ สุรัชย์ ลิปิวัฒนากร² ชัยวัฒน์ ขยันการนาวิ³ และ พรรณพิมพ์ พุทธรักษา มะเปี่ยม^{4,*}

Patsawan Boonyarattapant¹, Surachai Lipiwattanakarn²,
Chaiwat Kayankarnnavy³ and Punnim Puttaraksa Mapiam^{4,*}

1, 2, 3, 4, *ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

1, 2, 3, 4, *Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering,
Kasetsart University, Bangkok 10900

^{4,*}E-mail: fengppm@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองการไหลของน้ำใต้ดินและการรุกตัวของน้ำเค็มในสภาพปัจจุบัน และคาดการณ์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในอนาคตรอบบ่อเก็บน้ำในพื้นที่ชุมชนเมืองนาเตย อำเภอยางใหญ่ จังหวัดพังงา ที่จะถูกพัฒนามาเป็นบ่อเก็บน้ำดิบเพื่อผลิตน้ำประปา ให้มีกำลังการสูบน้ำจากบ่อ 4 ระยะ คือ 24,000, 48,000, 72,000 และ 96,000 ลบ.ม./วัน โดยได้นำแบบจำลองการไหลของน้ำใต้ดิน 3 มิติ Visual MODFLOW 2011.1 มาใช้เป็นเครื่องมือคำนวณ เมื่อทำการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์ทางชลศาสตร์และคุณภาพน้ำแล้วพบว่า ในกรณีสภาพปัจจุบันระดับน้ำใต้ดินมีค่าผันแปรอยู่ระหว่าง 0.0-7.0 เมตร โดยน้ำใต้ดินจะเคลื่อนตัวไหลจากทิศเหนือและใต้ลงสู่คลองบางทองที่ไหลผ่านพื้นที่ศึกษาและไหลต่อเนื่องลงไปสู่ทะเลอันดามันในที่สุด ส่วนการรุกตัวของน้ำเค็มจะเกิดขึ้นน้อย ในทางตรงกันข้ามเมื่อสูบน้ำด้วยอัตรา 72,000 และ 96,000 ลูกบาศก์เมตร/วัน ระดับน้ำใต้ดินมีแนวโน้มลดลงจากเดิมค่อนข้างมาก ส่งผลให้การกระจายตัวของความเค็มรอบบ่อเก็บน้ำขยายตัวกว้างขึ้น ทั้งนี้ในทุกกรณีความเค็มจะมีการรุกตัวตามแนวชายฝั่งทะเลเข้ามาประมาณ 500-1,000 เมตร และมีการรุกตัวและกระจายตัวตามแนวคลองบางทองจนถึงบ่อเก็บน้ำ ซึ่งมีค่าความเค็มบริเวณบ่อเก็บน้ำอยู่ในช่วง 100-500 มก./ลิตร

ABSTRACT

This study aims to simulate the existing and future conditions of groundwater flow and saltwater intrusion around a storage pond in Na Toei mining area, Amphoe Thai Mueang, Phang-nga province. The pond was designated to be a water supply storage reservoir with a production capacity for 4 phases, i.e., 24,000, 48,000, 72,000 and 96,000 m³/d pumping rates. The 3-dimensional groundwater model, Visual MODFLOW 2011.1, was used to simulate groundwater flow and saltwater intrusion. The results show that the existing groundwater levels vary between 0.0 - 7.0 meters with groundwater flowing from North and South direction into the Bang Thong stream located along the pond and eventually draining into the Andaman Sea. The existing saltwater intrusion is at minimum. For the future condition, with 24,000 and 48,000 m³/d pumping rates, groundwater levels around the pond are approximately 1.0 -3.0 meters higher than the existing condition due to the water level in the pond was kept at 2.00 meters

Received 15 February 2018

Revised 16 May 2018

Accepted 18 May 2018

higher than the existing groundwater level. On the other hand, with 72,000 and 96,000 m³/d pumping rates, groundwater levels around the pond are extremely lower than the existing condition leading to the expansion of the intruded area around the pond. For all simulation cases, the saltwater intrudes approximately 500 - 1,000 meters along the shoreline, and it also upwardly intrudes and disperses through Klong Bang-Tong into the pond. The salinity concentration around the pond varies between 100 - 500 mg/L.

1. บทนำ

ความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและแนวโน้มการขยายตัวของชุมชนเมืองที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องของจังหวัดภูเก็ต ส่งผลให้ปริมาณความต้องการน้ำประปามีมากขึ้นกว่าศักยภาพของปริมาณน้ำต้นทุนภายในพื้นที่ การจัดหาแหล่งน้ำดิบจากแหล่งน้ำผิวดินอื่น ๆ ในบริเวณข้างเคียง เช่น ขุมเหมืองเก่า บ่อดิน หรือหนองน้ำธรรมชาติ จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีแนวโน้มจะเกิดขึ้นได้จริงเพราะมีค่าลงทุนไม่สูงมาก เพื่อช่วยบรรเทาปัญหาการขาดแคลนน้ำในจังหวัดภูเก็ตได้

พื้นที่ขุมเหมืองนาเตยตั้งอยู่ที่ อำเภอท้ายเหมือง จังหวัดพังงา นับเป็นแหล่งเก็บกักน้ำหนึ่งที่มีศักยภาพสามารถนำมาพัฒนาเป็นบ่อเก็บน้ำเพื่อการประปาให้ส่งน้ำที่อัตราการผลิตที่เหมาะสมต่าง ๆ ด้วยการขุดขยายขุมเหมืองเก่าให้มีขนาดพื้นที่บ่อและความลึกเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับความต้องการน้ำ อย่างไรก็ตามการพัฒนาแหล่งน้ำดังกล่าวอาจเกิดผลกระทบเมื่อมีการสูบน้ำในบ่อเก็บน้ำไปใช้ผลิตน้ำประปา โดยอาจส่งผลกระทบต่อสภาพทางชลศาสตร์ของน้ำใต้ดิน และตามมาด้วยการรุกตัวของน้ำเค็ม (Saltwater Intrusion) เข้าบ่อเก็บน้ำ เนื่องจากบ่อตั้งอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลอันดามันเพียง 2 กิโลเมตร อาจก่อให้เกิดปัญหาคุณภาพน้ำในระยะยาวได้ ดังนั้นจึงสมควรทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของน้ำใต้ดิน และการรุกตัวของน้ำเค็มรอบบ่อเก็บน้ำเมื่อมีการพัฒนาแหล่งน้ำดังกล่าว

แบบจำลอง MODFLOW เป็นหนึ่งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการยอมรับว่ามีความสามารถในการจำลองสภาพการไหลทางชลศาสตร์ของน้ำใต้ดินแบบ 3 มิติ ภายใต้เงื่อนไขการจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับประเทศไทยได้มีการนำแบบจำลอง

MODFLOW มาใช้อย่างกว้างขวางในหลากหลายวัตถุประสงค์ อาทิเช่น การวิเคราะห์ปริมาณการสูบน้ำใต้ดินเพื่อเกษตรกรรมและการประเมินผลกระทบของระดับน้ำใต้ดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราการสูบน้ำใต้ดิน [1] การคาดการณ์ผลการเปลี่ยนแปลงของชั้นน้ำใต้ดินในอนาคตเพื่อคำนวณหาปริมาณสูบน้ำใต้ดินมาใช้อย่างปลอดภัย (Safe yield) [2] การจำลองการเติมน้ำในชั้นหินให้น้ำ เพื่อเพิ่มระดับน้ำใต้ดินให้สูงขึ้น ทำให้สามารถสูบน้ำในฤดูแล้งหรือยามขาดแคลนน้ำผิวดินได้ [3] จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าปริมาณฝนและปริมาณการสูบน้ำเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของระดับน้ำใต้ดิน โดยอัตราการสูบน้ำรายปีต้องไม่มากกว่าค่าอัตราการสูบน้ำที่ระดับปลอดภัย (Safe yield) นอกจากนี้แบบจำลอง MODFLOW ยังมีประสิทธิภาพในการนำไปใช้ศึกษาด้านคุณภาพน้ำ ทำให้ทราบถึงการแพร่กระจายของสาร นำไปสู่การจัดการสิ่งแวดล้อมที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [4] และในกรณีที่พื้นที่ศึกษาอยู่ติดกับนาุ้งหรือติดกับชายฝั่งทะเล จะนิยมนำแบบจำลองมาใช้ในการจำลองการเคลื่อนตัวของน้ำใต้ดินเพื่อศึกษาการรุกตัวของน้ำเค็มหรือปริมาณคลอไรด์ โดยจะศึกษาทิศทาง การไหลและคาดการณ์การแพร่กระจายของปริมาณคลอไรด์ตามลำดับ [5-7]

เพื่อให้ทราบผลกระทบที่จะอาจเกิดขึ้นภายหลังจากมีการพัฒนาแหล่งน้ำดิบขุมเหมืองนาเตย ตลอดจนแนวทางการจัดการ ป้องกัน และลดผลกระทบได้อย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษานี้มีเป้าหมายที่จะจำลองพฤติกรรม การไหลของน้ำใต้ดินและการรุกตัวของความเค็มจากแนวชายฝั่งทะเลอันดามันและจากคลองบางทองเข้าสู่บ่อเก็บน้ำทั้งในสภาพปัจจุบันก่อนขุดขยายบ่อและสภาพอนาคตเมื่อขุดขยายบ่อให้เป็นแหล่งเก็บน้ำดิบสำหรับกำลัง

การผลิตน้ำประปา 4 ระยะ คือ 24,000, 48,000, 72,000 และ 96,000 ลบ.ม./วัน ตามลำดับ ด้วยการนำแบบจำลอง MODFLOW มาใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษา

2. พื้นที่ศึกษาและการรวบรวมข้อมูล

2.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ชุมชนเมืองนาเตยเป็นชุมชนเมืองเก่ามีขนาดบ่อเก็บน้ำเดิมประมาณ 80 ไร่ คิดเป็นความจุเก็บกักน้ำ 0.7 ล้าน ลบ.ม. ตั้งอยู่ในอำเภอท้ายเหมือง จังหวัดพังงา พื้นที่ดังกล่าวมีศักยภาพที่สามารถขุดขยายเป็นบ่อเก็บน้ำครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 325 ไร่ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยตำแหน่งที่ตั้งชุมชนเมืองมีคลองบางทองไหลผ่านกลางพื้นที่ ดังแสดงจุดฝนน้ำเข้าสู่บ่อเก็บน้ำในรูปที่ 1 ซึ่งสามารถคำนวณพื้นที่รับน้ำฝนของคลองบางทองเหนือจุดฝนน้ำได้ประมาณ 124.84 ตร.กม.

2.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

2.2.1 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและอุทกวิทยา

ลุ่มน้ำคลองบางทองไม่มีสถานีตรวจวัดน้ำฝนและน้ำท่าตั้งอยู่ในลุ่มน้ำ ดังนั้นในการศึกษาด้านอุทก-อุทกวิทยาต้องใช้วิธีสังเคราะห์ข้อมูลจากข้อมูลของสถานีตรวจวัดที่ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำข้างเคียง ซึ่งพบว่าปริมาณน้ำฝนรายปีเฉลี่ยของกลุ่มน้ำบางทองมีค่าประมาณ 2,831 มม. จำแนกเป็นฤดูฝน (เม.ย.-พ.ย.) 2,596 มม. และฤดูแล้ง (ธ.ค.-มี.ค.) 235 มม. ในขณะที่ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยในคลองบางทอง ณ จุดฝนน้ำมีค่าประมาณ 276 ล้าน ลบ.ม. จำแนกเป็นฤดูฝน 259 ล้าน ลบ.ม. และฤดูแล้ง 17 ล้าน ลบ.ม.

2.2.2 ข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring log)

ได้รวบรวมข้อมูลการเจาะสำรวจชั้นดินจำนวน 12 หลุมเจาะ ตามตำแหน่งดังรูปที่ 1 (ได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจาก บริษัท โกลด์ ซอร์ส จำกัด) โดยความลึกของหลุมเจาะอยู่ระหว่าง -9.0 ถึง -18.5 เมตร จากระดับผิวดิน ผลการสำรวจพบว่าตัวอย่างดินในพื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่ประกอบด้วยชั้นทรายสลับกับชั้นดินเลนหรือดินเหนียว

หรือดินปนทราย วางแนวสลับกันไปมา 3-4 ชั้น ก่อนถึงชั้นหินแข็ง

2.2.3 ข้อมูลระดับน้ำบาดาล

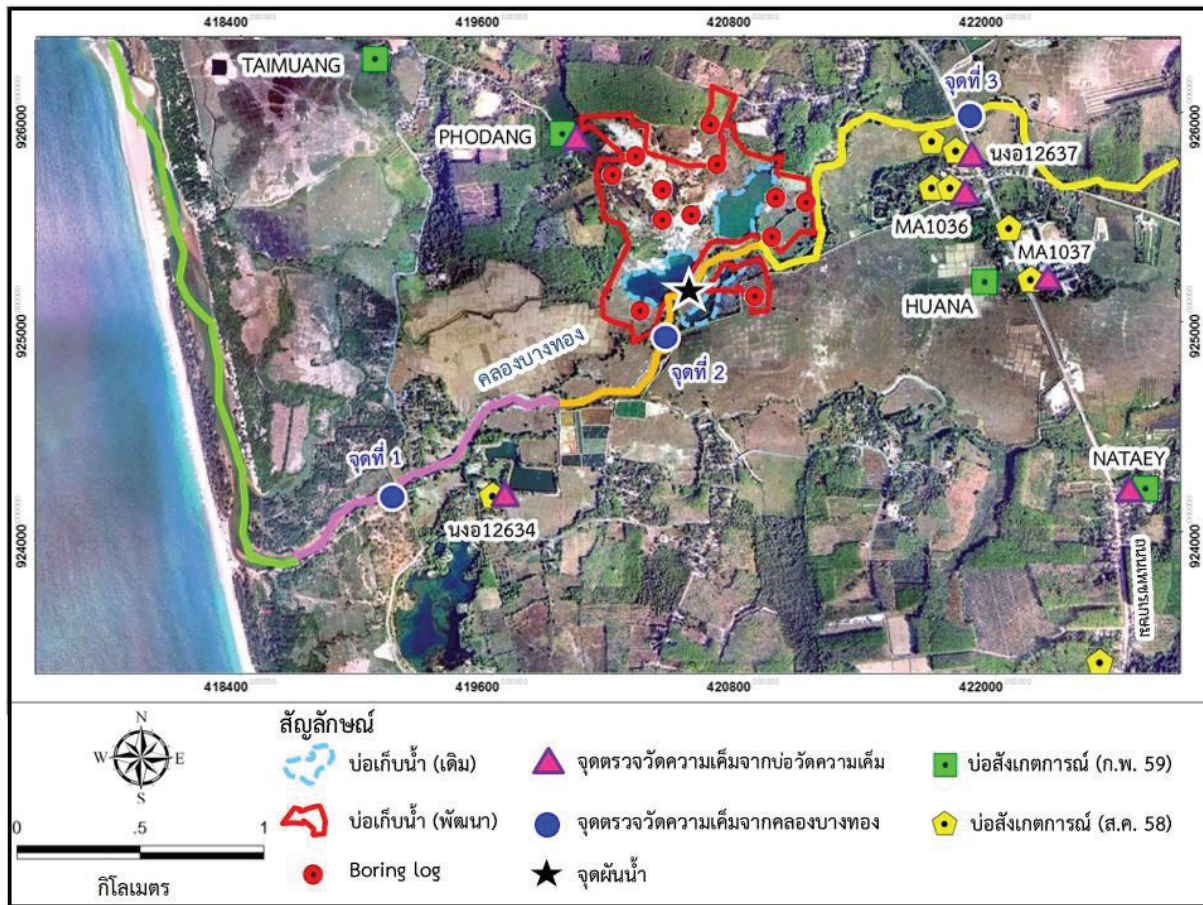
ได้รวบรวมข้อมูลระดับน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์ (Observation wells) ที่ตั้งอยู่ในและบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่โครงการจำนวน 12 บ่อ ดังแสดงตำแหน่งบ่อในรูปที่ 1 ซึ่งสามารถจำแนกเป็นข้อมูลระดับน้ำบาดาลจาก 4 บ่อที่สำรวจในเดือนกุมภาพันธ์ 2559 (ฤดูแล้ง) และข้อมูลระดับน้ำจาก 8 บ่อที่สำรวจในเดือนสิงหาคม 2558 (ฤดูฝน) ซึ่งพบว่าค่าระดับน้ำบาดาลของทั้ง 12 บ่อ มีค่าผันแปรระหว่าง 0.23-8.90 เมตร เทียบจากระดับปากบ่อบาดาล

2.2.4 ข้อมูลการทดสอบปริมาณน้ำบาดาล (Pumping test)

การทดสอบปริมาณน้ำบาดาลได้ดำเนินการในบ่อสังเกตการณ์จำนวน 4 บ่อ ดังรูปที่ 1 ได้แก่ โรงเรียนอนุบาลท้ายเหมือง (TAIMUANG) บ้านพอดแดง (PHODANG) บ้านหวนา (HUANA) และ รพ.สต.นาเตย (NATAEY) เพื่อประเมินค่าทางชลศาสตร์ของชั้นน้ำใต้ดินที่สำคัญ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Hydraulic conductivity, LT^{-1}) และค่าสัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (Transmissivity, L^2T^{-1})

2.2.5 ข้อมูลค่าความเค็มน้ำบาดาล

ค่าความเค็มของน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา ได้ตรวจวัด (เมษายน 2559) จากบ่อสังเกตการณ์ 6 บ่อ พบว่ามีค่าผันแปรระหว่าง 16.7-109.5 มก./ลิตร โดยส่วนใหญ่จะมีค่าความเค็มค่อนข้างต่ำ ยกเว้นที่บ่อบาดาลที่โรงเรียนท้ายเหมืองวิทยา (MA1037) ที่มีค่าค่อนข้างสูง ในขณะที่ค่าความเค็มในคลองบางทอง ได้สำรวจจำนวน 3 จุด (ดังรูปที่ 1) และพบว่าน้ำมีค่าความเค็มประมาณ 6,030 มก./ลิตร บริเวณตอนล่าง (จุดที่ 1) จะมีค่าลดลงเหลือประมาณ 5,400 มก./ลิตร ที่บริเวณใกล้บ่อเก็บน้ำของโครงการ (จุดที่ 2) และลดลงเหลือประมาณ 2,300 มก./ลิตร บริเวณคลองที่ตัดผ่านถนนเพชรเกษม (จุดที่ 3)



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาตำแหน่งหลุมเจาะสำรวจชั้นดิน บ่อสังเกตการณ์ และจุดตรวจวัดค่าความเค็มในพื้นที่ศึกษา

2.2.6 ข้อมูลสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ (Geophysics survey)

เพื่อเพิ่มความละเอียดของข้อมูลชั้นดิน ได้ใช้ผลสำรวจธรณีฟิสิกส์ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล (ได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจากบริษัท โกลด์ ชอร์ต จำกัด) ช่วงเดือนสิงหาคม-กันยายน 2558 ตำแหน่งการสำรวจแสดงในรูปที่ 2 โดยมีการสำรวจด้วยกัน 2 วิธี คือ 1) วิธีการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบหยั่งลึก (Vertical Electrical Sounding, VES) วางเป็นระบบกริดครอบคลุมพื้นที่ศึกษา จำนวน 174 จุด แต่ละจุดห่างกันประมาณ 250 เมตร โดยหยั่งลึกถึงชั้นหินฐานเพื่อหาการวางตัวของชั้นดินชั้นหินในพื้นที่ศึกษา และ 2) วิธีการวัดความต้านทานไฟฟ้าแบบ 2 มิติ (2-D Resistivity Survey) ได้มีการสำรวจทั้งหมด 6 แนว เพื่อนำข้อมูลมา

ประกอบข้อมูลการสำรวจแบบหยั่งลึกเพื่อให้ได้ข้อมูลที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น



รูปที่ 2 ตำแหน่งการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ในพื้นที่ศึกษา

3. ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้แบบจำลอง

3.1 แบบจำลอง MODFLOW

โปรแกรม Visual MODFLOW เวอร์ชัน 2011.1 [8] ถูกพัฒนาโดย Schlumberger Water Services (SWS) Inc. ประเทศแคนาดา ประกอบด้วยแบบจำลองย่อยที่สำคัญ ได้แก่ MODFLOW-2000, MODPATH และ MT3DMS ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีความสามารถในการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินในระบบ 3 มิติ โดยสมการที่ใช้ในการจำลองการไหลของน้ำใต้ดินมีรายละเอียดแสดงในสมการที่ (1) ซึ่งถูกสร้างมาจากสมการพื้นฐาน 2 สมการคือ สมการต่อเนื่อง (Continuity equation) และกฎของดาร์ซี (Darcy's law) [9] เพื่อประยุกต์ให้ได้สมการการไหลทั่วไปของน้ำใต้ดินที่มีความหนาแน่นคงที่ (Constant density) ผ่านตัวกลางซึ่งมีคุณสมบัติเป็น Heterogeneous และ Anisotropic ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Transient conditions)

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial h}{\partial z}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - W \quad (1)$$

เมื่อ K_x, K_y, K_z คือค่าสัมประสิทธิ์ของการซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ในแนว x, y, z ตามลำดับ [$L T^{-1}$], h คือความสูงของระดับความดันน้ำ [L], S_s คือปริมาณการกักเก็บจำเพาะ (Specific storage) [L^{-1}], W คือ การเพิ่ม ($W > 0$) หรือการลดลง ($W < 0$) ของน้ำใต้ดินในระบบต่อหน่วยปริมาตรของชั้นน้ำต่อหน่วยเวลาที่น้ำเพิ่มหรือลด [$L T^{-1}$], t คือเวลา [T] และ $\frac{\partial h}{\partial t}$ คือการเปลี่ยนแปลงของความสูงระดับน้ำต่อเวลา ส่วนสมการที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่มวลสาร จะใช้สมการ Partial differential อธิบายการเคลื่อนที่ใน 3 มิติของสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน เขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) - \frac{\partial}{\partial x_i}(v_{ij} C) + \frac{q_i}{p} C_s + \sum_{k=1}^N R_k \quad (2)$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนละลายในน้ำใต้ดิน [ML^{-3}], x_i คือระยะทางของแต่ละทิศทาง [L], D_{ij} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (Hydrodynamic dispersion coefficient) [$L^2 T^{-1}$], v_j คือ ความเร็วเชิงเส้นของน้ำในช่องว่าง [LT^{-1}], q_s คือ ปริมาณฟลักซ์ของน้ำต่อหนึ่งหน่วยชั้นน้ำที่ไหลเข้า (+) หรือไหลออก (-) [T^{-1}], C_s คือ ความเข้มข้นของสารที่เข้าไปในขอบเขตพื้นที่ (Sources) หรือไหลออกจากขอบเขตพื้นที่ (Sinks) [ML^{-3}], p คือ ความพรุนประสิทธิผลของชั้นน้ำ (Effective porosity) และ $\sum_{k=1}^N R_k$ คือ เทอมของปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction term) [$ML^{-3} T^{-1}$]

3.2 การสร้างแบบจำลอง (Model Design)

3.2.1 การออกแบบขนาดกริด (Grid design)

แบบจำลองที่สร้างขึ้นของพื้นที่ศึกษามีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามระบบกริด รวมทั้งหมด 400,000 กริดบล็อก (250 แถว x 400 สดมภ์ x 4 ชั้น)

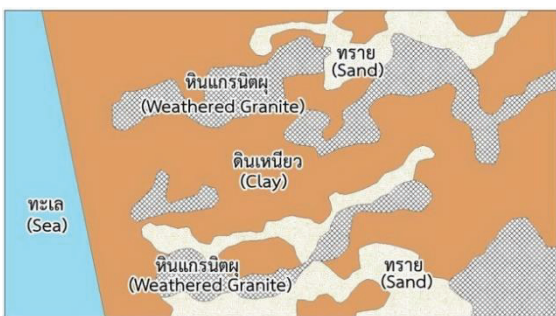
3.2.2 การจำลองชั้นน้ำ (Layer design)

การจำลองชั้นน้ำทำโดยนำเข้าข้อมูลค่าระดับพื้นผิว (Ground surface elevation) จากข้อมูลแผนที่มาตราส่วน 1: 4,000 ที่ระดับความละเอียด 5 เมตร (DEM 5 เมตร) และประมาณค่าในช่วงโดยวิธี Kriging ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ทางปฐพีวิทยาและธรณีวิทยา [10] และกำหนดค่าระดับชั้นน้ำต่าง ๆ จากข้อมูลผลการสำรวจธรณีฟิสิกส์และผลการสำรวจชั้นดิน โดยกำหนดให้ค่าระดับชั้นล่างสุด (Base elevation) เป็นชั้นหินแข็งแกรนิต การแปลข้อมูลจากผลการสำรวจพบว่าชั้นน้ำใต้ดินแบ่งออกเป็น 3 ชั้นหลัก ทั้งนี้ในการจำลองจริงใช้ 4 ชั้น ดังรูปที่ 3 โดยแบ่งเพิ่มจากชั้นที่ 3 ที่อยู่ล่างสุดเพื่อรองรับการจำลองความลึกบ่อเก็บน้ำให้ละเอียดและถูกต้องมากขึ้น และสามารถสรุปลักษณะการกระจายตัวของแต่ละชั้นดังนี้ ชั้นที่ 1 ประกอบด้วย ชั้นทรายและชั้นกรวด ชั้นที่ 2 ประกอบด้วย ชั้นทราย ชั้นดินเหนียว และชั้นหินแกรนิตผุ (Weathered Granite) สำหรับชั้นที่ 3

และ 4 จะเป็นชั้นหินแกรนิตผุ (Weathered Granite) ทั้ง 2 ชั้น



(ก) ชั้นน้ำที่ 1



(ข) ชั้นน้ำที่ 2



(ค) ชั้นน้ำที่ 3 และ 4

รูปที่ 3 ลักษณะของชั้นน้ำของพื้นที่ศึกษา

3.2.3 ตัวแปรชลศาสตร์น้ำใต้ดิน

ตัวแปรชลศาสตร์น้ำใต้ดินประกอบไปด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (Hydraulic conductivity, K) และค่าความกักเก็บจำเพาะ (Specific storage, S_s) ได้ค่ามาจากการสูบทดสอบปริมาณน้ำบาดาล ส่วนค่าการให้น้ำจำเพาะ (Specific yield, S_y) และค่าความพรุน (Porosity, n) จะใช้ค่าอ้างอิงตามชนิดชั้นหิน [11] ทั้งนี้ กำหนดให้อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

ในแนวดิ่งต่อแนวราบเท่ากับ 1:10 [12] แสดงข้อมูล ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรทางชลศาสตร์

ชั้นน้ำ	Hydraulic Conductivity		Storage and Porosity			
	(m/day)					
	K_x, K_y	K_z	S_s (1/m)	S_y	Eff. Por.	Tot. Por.
ชั้นทราย	1.02	0.102	0.00015	0	0.25	0.3
ชั้นกรวด	6.7	0.67	0.00005	0.1	0.2	0.25
ชั้นดินเหนียว	0.05*	0.005*	0.00001*	0	0.3	0.35
ชั้นหินแกรนิตผุ	0.55	0.055	0.000005	0.1	0.24	0.34

หมายเหตุ

- S_s = ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บจำเพาะ
 S_y = ค่าสัมประสิทธิ์การให้น้ำจำเพาะ
 Eff. Por. = Effective Porosity
 Tot. Por. = Total Porosity
 * = ค่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง

3.2.4 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)

เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในแบบจำลองประกอบด้วย

- ขอบเขตระดับน้ำคงที่ (Constant head boundary) ถูกใช้ตามแนวชายฝั่งทะเลโดยจำลองให้ค่าระดับน้ำคงที่ตลอดเวลาที่ระดับ 0 ม. (รทก.)

- ขอบเขตแม่น้ำ (River boundary) พิจารณาจากระดับน้ำ ระดับท้องน้ำ ความหนาของตะกอนท้องน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตะกอนท้องน้ำ ความยาวแม่น้ำ และความกว้างแม่น้ำ โดยแบ่งลำน้ำออกเป็น 4 ช่วงตามความคล้ายคลึงกันของลักษณะทางน้ำ

- ขอบเขตการเติมน้ำ (Recharge boundary) การเติมน้ำพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเติมน้ำลงชั้นน้ำใต้ดิน ได้แก่ ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย (ช่วงข้อมูล พ.ศ. 2527-2556) และชนิดของชั้นหิน โดยคำนวณค่าฝนเฉลี่ยด้วยวิธีเส้นชั้นน้ำฝนที่มีช่วงเส้นชั้นน้ำฝนห่างกัน 20 มม. และแบ่งเป็นฤดูแล้ง (ธ.ค.-มี.ค.) และฤดูฝน (เม.ย.-พ.ย.) กำหนดอัตราการซึมผ่านแปรไปตามลักษณะของชั้นหินในอัตราระหว่าง 2-4 เปอร์เซ็นต์ [13]

- ขอบเขตปริมาณการคายระเหย (Evapotranspiration boundary) ปริมาณการคาย

ระเหยในการศึกษานี้ กำหนดให้เท่ากันทั่วทั้งพื้นที่ เนื่องจากสภาพการใช้ที่ดินที่ไม่แตกต่างกันมากนักในพื้นที่ศึกษา แต่จะแบ่งออกเป็นฤดูแล้ง (ธ.ค.-มี.ค.) มีปริมาณการคายระเหยประมาณ 1,083 มม./ปี และฤดูฝน (เม.ย.-พ.ย.) มีค่าปริมาณการคายระเหยประมาณ 788 มม./ปี

- ขอบเขตบ่อเก็บน้ำ (Lake Boundary) เงื่อนไขขอบเขตนี้จะนำมาใช้ในการจำลองน้ำในบ่อเก็บน้ำโดยการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำตลอดเวลา โดยอาศัยสมมูลน้ำจากปริมาณน้ำที่เข้าและออกบ่อเก็บน้ำ ในรูปแบบต่าง ๆ โดยใช้ระดับขอบบ่อ ระดับก้นบ่อ ข้อมูลฝน ค่าการระเหย และปริมาณน้ำท่า ปริมาณการสูบน้ำ เป็นข้อมูลหลักในการคำนวณ

3.2.5 ค่าความเต็ม้น้ำบาดาล

ค่าความเต็มที่ใช้เป็นค่าขอบเขตของแบบจำลองด้านคุณภาพน้ำ ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ค่าความเต็มจากน้ำทะเลและค่าความเต็มในคลองบางทอง สำหรับค่าความเต็มจากน้ำทะเลจะกำหนดให้เท่ากับ 35,000 มก./ลิตร [14] ส่วนในคลองบางทอง ได้พิจารณาปรับเป็นค่าความเต็มเฉลี่ยในชั้นดิน โดยเฉลี่ยตามความลึก (Depth average) และพิจารณาค่าความเต็มเฉพาะในฤดูแล้งเท่านั้นเนื่องจากฤดูฝนปริมาณน้ำมาก สำหรับค่าความเต็มของคลองบางทองช่วงริมทะเลได้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 27,000 มก./ลิตรตามค่าตรวจวัดของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล พ.ศ.2557

3.2.6 ข้อมูลบ่อบาดาล (Wells) และจุดวัดความเต็ม

ได้กำหนดตำแหน่งของบ่อสังเกตการณ์ทั้ง 12 บ่อ และตำแหน่งจุดตรวจวัดความเต็มจำนวน 6 บ่อ ตามตำแหน่งในรูปที่ 1

4. การเปรียบเทียบแบบจำลอง

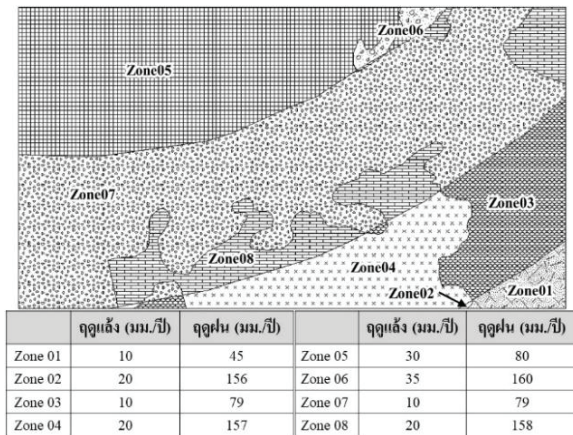
เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ของแบบจำลองทางด้านชลศาสตร์และคุณภาพน้ำที่เหมาะสมต้องอาศัย

กระบวนการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model calibration and verification) ดังต่อไปนี้

4.1 การปรับเทียบและตรวจพิสูจน์ทางชลศาสตร์

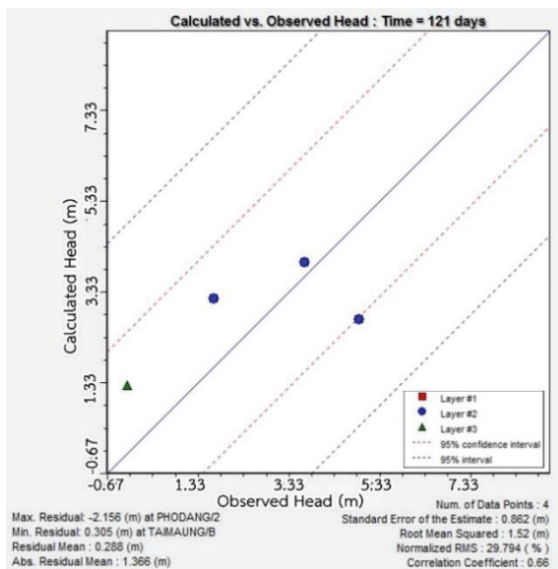
เพื่อจำลองพฤติกรรมการไหลของน้ำใต้ดินได้ใกล้เคียงกับสภาพพื้นที่ศึกษา จะต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ตรวจวัดไม่ได้ จนกระทั่งค่าระดับน้ำใต้ดินที่ได้จากแบบจำลอง (Calculated data) มีค่าใกล้เคียงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้กับค่าที่ตรวจวัดได้จากสนาม (Observed data) อย่างไรก็ตามก่อนที่จะนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปใช้ จะต้องทำการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Verification) ก่อนเพื่อให้มั่นใจว่าพารามิเตอร์เหล่านั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเหตุการณ์อื่นได้ โดยพารามิเตอร์ในการปรับเทียบแบบจำลองสำหรับการศึกษาครั้งนี้คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและค่าความกักเก็บจำเพาะของเฉพาะชั้นดินเหนียวเท่านั้น เนื่องจากชั้นดินเหนียวเป็นชั้นเดียวที่ไม่มีข้อมูลผลการสุบทดสอบ เพราะเป็นชั้นดินที่ไม่ให้น้ำ นอกจากนี้แล้วได้มีการปรับแก้ค่าอัตราการเติมน้ำในฤดูแล้งเพื่อให้ปริมาณน้ำเข้าออกสมดุล

เนื่องจากการศึกษานี้มีเป้าหมายที่จะศึกษาผลกระทบจากการสูบน้ำไปใช้ในฤดูแล้ง และการรุกตัวของความเค็ม ซึ่งจะเกิดรุนแรงในฤดูแล้งเป็นสำคัญ ดังนั้นจึงเลือกข้อมูลระดับน้ำที่ตรวจวัดในฤดูแล้ง (ก.พ. 2559) จาก 4 บ่อสังเกตการณ์สำหรับการปรับเทียบแบบจำลอง และเลือกข้อมูลที่ตรวจวัดในฤดูฝน (ต.ค. 2558) จากอีก 8 บ่อสังเกตการณ์ที่เหลือสำหรับตรวจพิสูจน์แบบจำลองเพื่อทดสอบว่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองไม่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลของพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับเทียบแบบจำลองแสดงในตารางที่ 1 และผลการปรับแก้ค่าอัตราการเติมน้ำแสดงใน รูปที่ 4



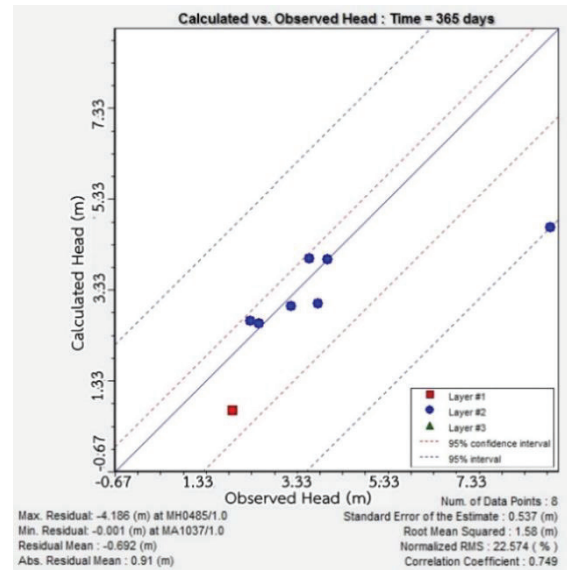
รูปที่ 4 ลักษณะปริมาณการเติมน้ำเข้าสู่ระบบน้ำใต้ดิน

สำหรับผลการเปรียบเทียบระดับน้ำกรณีเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองแสดงดังรูปที่ 5 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์เท่ากับ 0.660 และ 0.749 ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวในทางอุทกวิทยาอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ [15] ดังนั้นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจึงสามารถใช้เป็นตัวแทนการไหลของน้ำใต้ดินบริเวณพื้นที่ศึกษาในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้งในกรณีศึกษาต่าง ๆ ต่อไปนี้



(ก) ผลการเปรียบเทียบ

รูปที่ 5 ผลการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองทางชลศาสตร์



(ข) ผลการตรวจพิสูจน์

รูปที่ 5 (ต่อ) ผลการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองทางชลศาสตร์

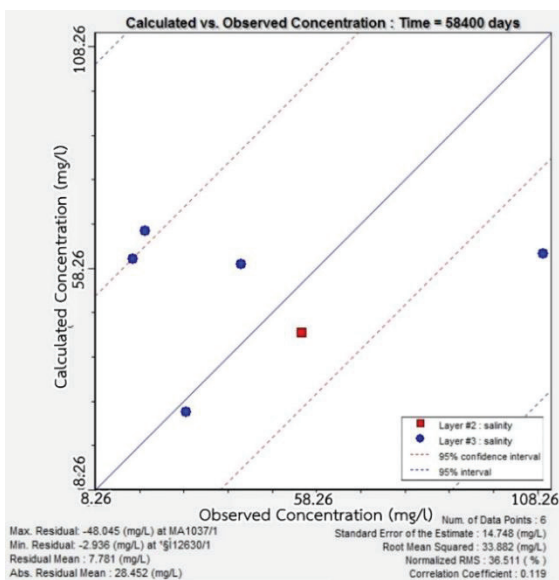
4.2 การปรับเทียบคุณภาพน้ำ

เมื่อทำการปรับเทียบแบบจำลองทางชลศาสตร์จนได้ผลที่พอใจแล้ว แบบจำลองดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ในการปรับเทียบด้านคุณภาพน้ำ โดยพารามิเตอร์ที่ปรับแก้ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตามแนวยาว (Longitudinal dispersivity) โดยพยายามให้ค่าความเค็มที่ได้จากแบบจำลองที่ปรับแก้แล้ว มีค่าใกล้เคียงกับค่าความเค็มที่ตรวจวัดจาก 6 บ่อสังเกตการณ์มากที่สุด โดยที่แหล่งความเค็มของระบบมาจากทะเลและคลองบางทองเท่านั้น

ผลการปรับเทียบแบบจำลองด้านคุณภาพน้ำ ได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตามแนวยาวแยกตามชั้นน้ำ โดยที่ชั้นน้ำที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นชั้นกรวดทรายและมีเลนส์ดินเหนียวแทรก มีค่าเท่ากับ 15 เมตร ส่วนชั้นน้ำที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นชั้นหินแกรนิตผุ มีค่าเท่ากับ 5 เมตร ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงปกติของน้ำใต้ดิน [16] ดังแสดงผลการปรับเทียบแบบจำลองด้านคุณภาพน้ำดังรูปที่ 6 ผลการปรับเทียบพบว่า ค่าปกติความคลาดเคลื่อนของค่าความเค็มแสดงค่าอยู่ที่ร้อยละ 36.55 แสดงว่าแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ตั้งเอาไว้ แต่เนื่องจากข้อมูล

ภาคสนามที่มีจำกัด ประกอบกับการศึกษานี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นที่มีงบประมาณจำกัดจึงมีความจำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์ดังกล่าวไปใช้ศึกษากรณีศึกษาต่าง ๆ ต่อไป

อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตามแนวยาวของชั้นน้ำในแบบจำลองมีความสอดคล้องกับค่าในเกณฑ์ปกติ ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำแบบจำลองไปใช้ในการวิเคราะห์การรุกตัวของความเค็มต่อไป โดยความเค็มจะกระจายตัวจากแหล่งความเค็ม (คลองบางทอง) ออกไปตามชั้นน้ำในแต่ละชั้นในลักษณะเดียวกัน



รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองคุณภาพน้ำ

5. กรณีศึกษา

เพื่อให้ทราบผลกระทบของการพัฒนาโครงการต่อพฤติกรรมกรไหลของน้ำใต้ดินและการรุกตัวของน้ำเค็มแบบต่อเนื่องในระยะยาว การศึกษานี้ได้จำลองการไหลแบบต่อเนื่อง 30 ปี (ปี พ.ศ. 2559-2589) สำหรับ 2 กรณีศึกษาหลักดังนี้ คือ

5.1 กรณีศึกษาธรรมชาติปัจจุบัน

เป็นการศึกษากรณีสภาพปัจจุบันที่ยังไม่มีการพัฒนาบ่อเก็บน้ำ เพื่อให้มีค่ากรณีฐาน (Baseline case) ของสภาพระดับน้ำใต้ดินและค่าความเค็มในพื้นที่ศึกษาในอนาคต

5.2 กรณีมีการใช้น้ำในบ่อเก็บน้ำตามกำลังการผลิตน้ำประปา

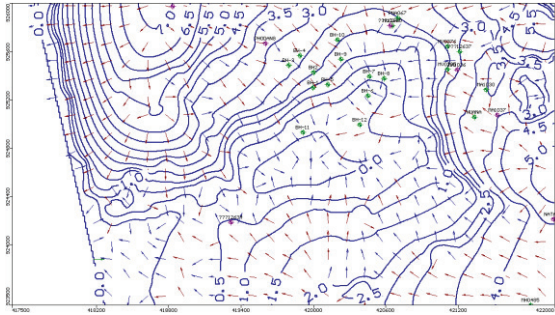
จากแผนการพัฒนาบ่อเก็บน้ำเพื่อการผลิตน้ำประปาที่มีกำลังการผลิต 24,000 ลบ.ม./วัน ในระยะแรกและจะเพิ่มกำลังการผลิตขึ้นคราวละ 24,000 ลบ.ม./วัน จนมีกำลังการผลิตสูงสุด 96,000 ลบ.ม./วัน กรณีศึกษานี้จะจำลองสภาพระดับน้ำใต้ดินและค่าความเค็มในพื้นที่ศึกษาเมื่อเกิดโครงการพัฒนาบ่อเก็บน้ำและมีการใช้น้ำจากบ่อเก็บน้ำตามศักยภาพของกำลังการผลิตน้ำประปาต่าง ๆ เพื่อพิจารณาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อระดับน้ำใต้ดินและการรุกตัวของน้ำเค็มในอนาคต โดยกำหนดให้บ่อเก็บน้ำมีลักษณะเป็นทะเลสาบที่มีการไหลเข้าและการใช้น้ำตามที่กำหนด ระดับน้ำเก็บกักในบ่อเก็บน้ำกำหนดให้เริ่มต้นที่ +2.00 เมตร และกำหนดให้มีการสร้างฝายบริเวณพื้นที่โครงการเพื่อใช้ในการยกกระด้นน้ำเข้าบ่อเก็บน้ำและป้องกันน้ำเค็มรุกล้ำคลองบางทองตอนบน ดังนั้นในการจำลองจึงกำหนดให้ค่าความเค็มในคลองบางทองสิ้นสุดที่บริเวณฝาย และที่บริเวณเหนือฝายน้ำในคลองจะไม่มี ความเค็ม

6. ผลการจำลองสถานการณ์ตามกรณีศึกษา

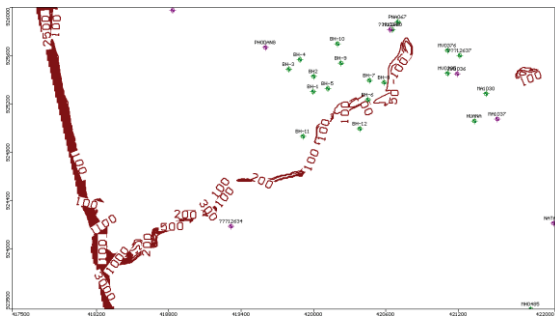
6.1 กรณีสภาพธรรมชาติปัจจุบัน

ระดับน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษามีค่าผันแปรระหว่าง 0.0-7.0 เมตร รทก. โดยระดับน้ำใต้ดินตามแนวคลองบางทองมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0-1.0 เมตร ตั้งแต่ชายฝั่งทะเลถึงบริเวณพื้นที่บ่อเก็บน้ำ ส่งผลให้น้ำใต้ดินไหลจากทิศเหนือ/ทิศตะวันตกเฉียงเหนือเข้าสู่คลองบางทอง และไหลจากทิศใต้/ทิศตะวันออกเฉียงใต้เข้าสู่คลองบางทอง ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) และตารางที่ 2

ผลการจำลองการรุกตัวของน้ำเค็มที่ระยะเวลา 30 ปี จะเห็นว่าความเค็มมีการรุกตัวน้อยมาก โดยแทรกซึมจากชายฝั่งทะเลมาประมาณ 100-200 เมตร ส่วนความเค็มของน้ำใต้ดินในพื้นที่จะอยู่ตามแนวคลองบางทองเป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) และตารางที่ 2



(ก) ระดับน้ำใต้ดิน



(ข) ความเค็ม

รูปที่ 6 ผลการจำลองที่ระยะเวลา 30 ปี กรณีไม่มีการพัฒนาบ่อเก็บน้ำ

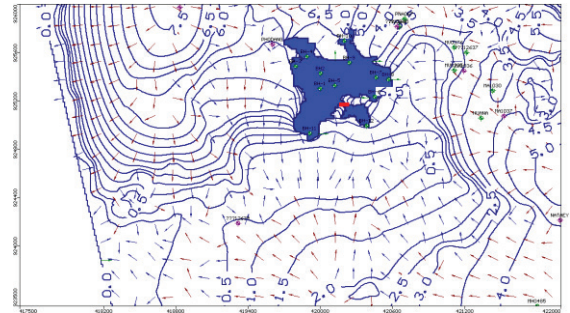
6.2 กรณีมีการใช้น้ำในบ่อเก็บน้ำตามกำลังการผลิต น้ำประปา

6.2.1 การจำลองระดับน้ำใต้ดิน

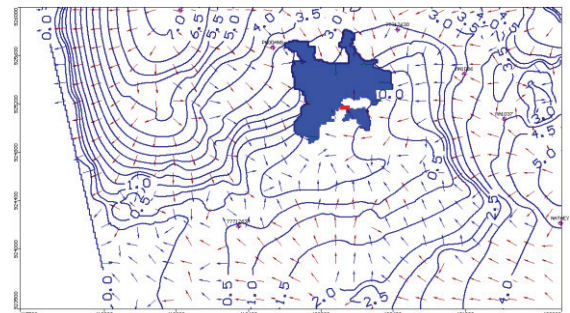
ผลการจำลองระดับน้ำใต้ดินกรณีมีการพัฒนาบ่อเก็บน้ำเต็มศักยภาพ แสดงดังรูปที่ 7 และตารางที่ 2 โดยพบว่าเมื่อสูบน้ำด้วยอัตรา 24,000 และ 48,000 ลบ.ม./วัน ส่งผลให้ระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นจากกรณีไม่มีโครงการทั้ง 2 กรณี โดยมีช่วงการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำใต้ดินโดยรอบห่างจากขอบบ่อและตามแนวขอบบ่อที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องมาจากการเก็บกักน้ำในบ่อเก็บน้ำเพิ่มขึ้นที่ระดับ +2.00 ม. รทก. และอัตราการใช้น้ำน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณเก็บกักของบ่อ สำหรับทิศทางการไหลของน้ำใต้ดินจะไหลเข้าสู่ร่องน้ำตามแนวคลองบางทอง

สำหรับกรณีสูบน้ำด้วยอัตรา 72,000 และ 96,000 ลบ.ม./วัน ส่งผลให้ระดับน้ำใต้ดินลดลงจากกรณีไม่มีการพัฒนาบ่อเก็บน้ำทั้ง 2 กรณี โดยขอบบ่อเป็นบริเวณที่ระดับ

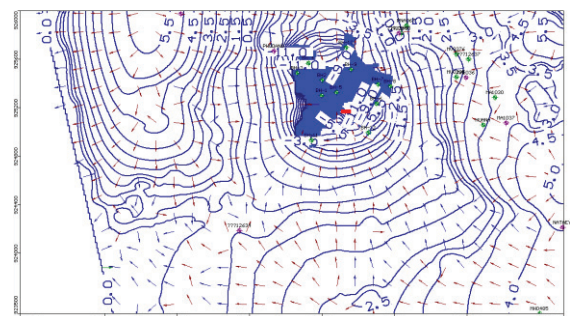
น้ำใต้ดินลดลงสูงสุดโดยลดลงกว่ากรณีปัจจุบันถึง 17 เมตร สำหรับกรณีสูบน้ำที่อัตรา 96,000 ลบ.ม./วัน ผลกระทบจากการลดลงของระดับน้ำใต้ดินจะเกิดขึ้นมากบริเวณทิศเหนือและทิศตะวันออกของบ่อเก็บน้ำครอบคลุมรัศมี 800-1,200 เมตร และ 1,000-1,500 เมตร สำหรับกรณีสูบน้ำด้วยอัตรา 72,000 และ 96,000 ลบ.ม./วัน ตามลำดับ



(ก) 24,000 ลบ.ม./วัน

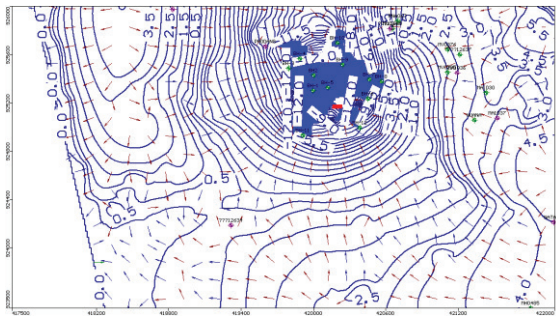


(ข) 48,000 ลบ.ม./วัน



(ค) 72,000 ลบ.ม./วัน

รูปที่ 7 ผลการจำลองระดับน้ำใต้ดินที่ระยะเวลา 30 ปี กรณีมีการพัฒนาบ่อเก็บน้ำ



(ง) 96,000 ลบ.ม./วัน

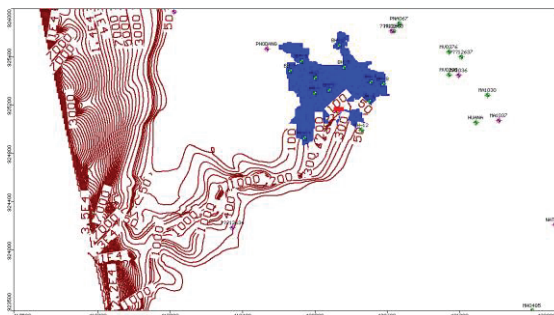
รูปที่ 7 (ต่อ) ผลการจำลองระดับน้ำใต้ดินที่ระยะเวลา 30 ปี
กรณีมีการพัฒนาบ่อเก็บน้ำ

6.2.2 การจำลองการรุกตัวของน้ำเค็ม

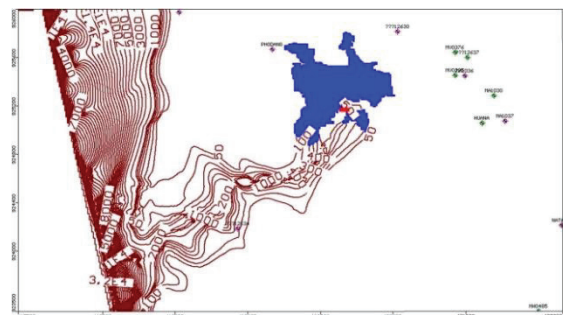
ผลการจำลองการรุกตัวของน้ำเค็ม แสดงดังรูปที่ 8 และตารางที่ 2 พบว่าในทุกกรณีความเค็มมีการรุกตัวตามแนวชายฝั่งทะเลเข้ามาประมาณ 500-1,000 เมตร และมีการรุกตัวและกระจายตัวตามแนวคลองบางทอง จนถึงบ่อเก็บน้ำ โดยมีค่าความเค็มบริเวณริมบ่อเก็บน้ำอยู่ระหว่าง 100-500 มก./ลิตร แต่การกระจายตัวของความเค็มรอบบ่อเก็บน้ำจะขยายตัวกว้างขึ้นเมื่อมีการสูบน้ำด้วยอัตราที่สูงขึ้น เนื่องจากค่าระดับน้ำใต้ดินรอบบ่อเก็บน้ำลดลงมากขึ้น

ตารางที่ 2 ผลการจำลองระดับน้ำใต้ดินและการรุกตัวของน้ำเค็มที่ระยะเวลา 30 ปี (ปี พ.ศ. 2559-2589)

กรณีศึกษา	ระดับน้ำใต้ดินโดยรอบห่างจากขอบบ่อ (ม.)	ระดับน้ำใต้ดินต่ำสุดที่ขอบบ่อ (ม.)	ระยะการรุกตัวของน้ำเค็มมาชายฝั่ง (ม.)	ค่าความเค็มที่ริมบ่อเก็บน้ำ (มก./ลิตร)
สภาพธรรมชาติปัจจุบัน	0.0 ถึง 7.0	-	100 - 200	100-200 (ตามแนวแม่น้ำ)
สูบน้ำ 24,000 ลบ.ม./วัน	1.0 ถึง 7.5	1.0	500 - 1,000	100 - 500
สูบน้ำ 48,000 ลบ.ม./วัน	1.0 ถึง 7.5	1.0	500 - 1,000	100 - 500
สูบน้ำ 72,000 ลบ.ม./วัน	-6.0 ถึง 5.5	-11.0	500 - 1,000	100 - 500
สูบน้ำ 96,000 ลบ.ม./วัน	-10.0 ถึง 4.0	-17.0	500 - 1,000	100 - 500

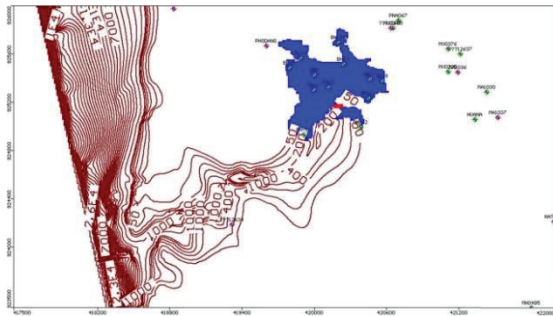


(ก) 24,000 ลบ.ม./วัน

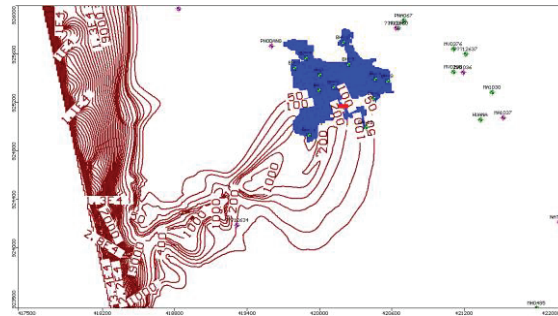


(ข) 48,000 ลบ.ม./วัน

รูปที่ 8 ผลการจำลองการรุกตัวของน้ำเค็มที่ระยะเวลา 30 ปี กรณีมีการพัฒนาบ่อเก็บน้ำ



(ค) 72,000 ลบ.ม./วัน



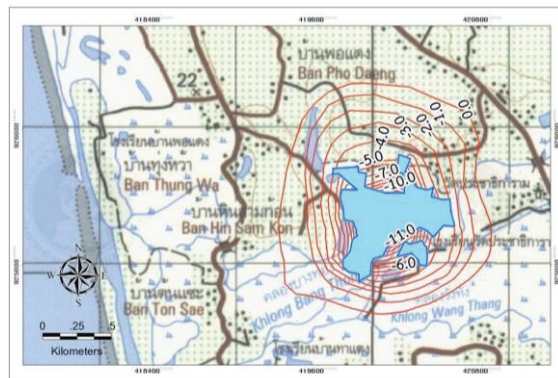
(ง) 96,000 ลบ.ม./วัน

รูปที่ 8 (ต่อ) ผลการจำลองการรุกตัวของน้ำเค็มที่ระยะเวลา 30 ปี กรณีมีการพัฒนาบ่อเก็บน้ำ

6.2.3 ผลกระทบการลดลงของระดับน้ำใต้ดิน

ผลการศึกษากรณีการใช้น้ำจากบ่อเก็บน้ำที่อัตรา 24,000 และ 48,000 ลบ.ม./วัน พบว่าระดับน้ำใต้ดินสูงขึ้นจากกรณีไม่มีการพัฒนาบ่อเก็บน้ำเล็กน้อย จึงไม่เกิดผลกระทบต่อบ่อบาดเดิมที่อยู่ในพื้นที่ใกล้เคียง บ่อเก็บน้ำ ในขณะที่ผลการศึกษากรณีการใช้น้ำจากบ่อเก็บน้ำที่อัตรา 72,000 และ 96,000 ลบ.ม./วัน พบว่าระดับน้ำใต้ดินลดลงจากเดิม จึงนำผลมาประเมินขอบเขตพื้นที่ที่คาดว่าจะเกิดการลดลงของน้ำใต้ดินจากทั้ง 2 กรณี โดยมีข้อสมมติฐานว่าสภาพชั้นน้ำใต้ดินในพื้นที่ที่อยู่นอกเขตพื้นที่ที่มีการสำรวจมีลักษณะใกล้เคียงหรือสอดคล้องกับพื้นที่ที่ทำการสำรวจและให้ค่าผลกระทบในเชิงเดียวกัน

ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 9 โดยพบว่าผลกระทบจะเกิดขึ้นในแนวเหนือ-ใต้มากกว่าตะวันออก-ตะวันตกของทั้ง 2 กรณีสูบน้ำ โดยกรณีสูบน้ำที่ 72,000 ลบ.ม./วัน ผลกระทบตามแนวเหนือ-ใต้ จะครอบคลุมความยาวประมาณ 1,700 เมตร และผลกระทบในแนวตะวันออก-ตะวันตกจะยาวประมาณ 1,500 เมตร สำหรับกรณีสูบน้ำที่อัตรา 96,000 ลบ.ม./วัน ผลกระทบตามแนวเหนือ-ใต้ จะครอบคลุมความยาวประมาณ 2,600 เมตร และผลกระทบในแนวตะวันออก-ตะวันตก จะยาวประมาณ 2,000 เมตร ทั้งนี้การลดลงดังกล่าวจะเกิดขึ้นในช่วง 5 ปีแรก และจะเข้าสู่สมดุลในปีที่ 9 [17]



(ก) 72,000 ลบ.ม./วัน



(ข) 96,000 ลบ.ม./วัน

รูปที่ 9 พื้นที่ผลกระทบการลดลงของระดับน้ำใต้ดิน

7. สรุปผลการศึกษา

1) พารามิเตอร์ทางชลศาสตร์ของการไหลน้ำใต้ดินในพื้นที่ศึกษาไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ราชตุกกาล โดยพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่สำคัญในการสอบเทียบแบบจำลองชลศาสตร์คือ ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและค่าความกักเก็บจำเพาะของชั้นดินเหนียว

ในขณะที่พารามิเตอร์สำหรับการเปรียบเทียบด้านคุณภาพน้ำคือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตามแนวยาว (Longitudinal dispersivity) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูงตามสภาพของชนิดดินในชั้นน้ำที่แบ่งในแบบจำลอง ดังนั้นการให้ความสำคัญกับข้อมูลการสำรวจธรณีวิทยาสามารถส่งผลต่อความถูกต้องของแบบจำลองน้ำใต้ดินและคุณภาพน้ำใต้ดินได้

2) การจำลองพฤติกรรมมวลการไหลของน้ำใต้ดิน พบว่าเมื่อมีการพัฒนาบ่อเก็บน้ำสามารถเพิ่มและลดระดับน้ำใต้ดินได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับเก็บกักและอัตราการสูบน้ำใช้ในบ่อเก็บน้ำ โดยสามารถสรุปได้ว่าถ้าใช้น้ำในอัตรา 24,000 และ 48,000 ลบ.ม./วัน ส่งผลให้ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มสูงขึ้นโดยรอบเนื่องจากมีระดับเก็บกักที่เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าใช้น้ำในอัตรา 72,000 และ 96,000 ลบ.ม./วัน จะทำให้ระดับน้ำใต้ดินลดลงจากระดับเดิม และส่งผลต่อระดับน้ำใต้ดินที่ลดลงในบริเวณโดยรอบบ่อเก็บน้ำ ซึ่งผลกระทบจะเกิดขึ้นตามแนวเหนือ-ใต้ มากกว่า ตะวันออก-ตะวันตก ของบ่อเก็บน้ำ

3) การศึกษาการรุกตัวของน้ำเค็ม (Saltwater Intrusion) พบว่า ความเค็มจะมีการรุกตัวตามแนวชายฝั่งทะเลเข้ามาประมาณ 500-1,000 เมตร และมีการรุกตัวและกระจายตัวตามแนวคลองบางทองจนถึงบ่อเก็บน้ำซึ่งมีค่าความเค็มบริเวณบ่อเก็บน้ำอยู่ในช่วง 100-500 มก./ลิตร โดยการกระจายตัวของความเค็มรอบบ่อเก็บน้ำจะขยายตัวกว้างขึ้นเมื่อมีการสูบน้ำด้วยอัตราที่สูงขึ้นเนื่องจากค่าระดับน้ำใต้ดินรอบบ่อเก็บน้ำที่ลดลงมากขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท โกลด์ ซอร์ส จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์ให้ใช้ข้อมูลพื้นที่ศึกษาและการสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยภายใต้ “โครงการศึกษาวางแผนพัฒนาเพื่อการบริหารจัดการน้ำในบ่อเก็บน้ำจังหวัดพังงา” ขอขอบคุณ กรมอุตุนิยมวิทยา กรมชลประทาน และกรมทรัพยากรน้ำบาดาล สำหรับความอนุเคราะห์ข้อมูลปริมาณน้ำฝน ปริมาณน้ำท่า และข้อมูลน้ำบาดาลในการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนสาร อุดมโชค. การจัดการน้ำใต้ดินและการประเมินประสิทธิผลโครงการพัฒนาน้ำใต้ดินสุโขทัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545.
- [2] พิศาล ชัยสาขันธ์. การจำลองการเคลื่อนตัวของน้ำใต้ดินในโครงการน้ำใต้ดินสุโขทัยโดยการใช้โปรแกรม MODFLOW. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545.
- [3] กุลชาติ โกษาแสง, ชัยวัฒน์ ขยันการนาวิ. การจำลองการเคลื่อนตัวของน้ำใต้ดินในโครงการเติมน้ำลงสู่ชั้นบาดาลจังหวัดสุโขทัย. การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9, 2555; 1717-1724.
- [4] วิจิตร ศรีวงศ์. การตรวจติดตามและประเมินสภาพการปนเปื้อนสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำใต้ดินจากสถานที่ฝังกลบมูลฝอยชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549.
- [5] พรรณนิภา นาคสินไพศาล. การศึกษาการปนเปื้อนสารมลพิษในน้ำใต้ดินจากนาเกลือและนาข้าวบริเวณ อ.ระโนด จ.สงขลา โดยใช้แบบจำลอง MODFLOW. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551.
- [6] อรุณ ลูกจันท. การศึกษาการรุกตัวของน้ำเค็มในชั้นน้ำใต้ดินในแอ่งหาคาใหญ่โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2552.

- [7] สุพล สันติเจริญกมล. การจำลองการไหลของน้ำบาดาลของเทศบาลนครสงขลาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2554.
- [8] Schlumberger Water Services. Visual MODFLOW 2011.1 User's Manual. Schlumberger Water Services, Ontario, Canada, 2011.
- [9] Fetter, C. W. Applied Hydrogeology. Macmillan College Publishing Company, Inc., 1994; 143-151.
- [10] สุเพชร จิระจรกุล. เรียนรู้ระบบภูมิสารสนเทศด้วยโปรแกรม ArcGIS Desktop 9.3.1 ฉบับปรับปรุง. บริษัท เอ.พี. กราฟฟิคดีไซน์และการพิมพ์ จำกัด, 2555; 767.
- [11] Spitz, K., and Moreno, F. A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling. New York: John Wiley and Song, Inc., 1996; 345-353.
- [12] Fitts, C. R. Groundwater Science. 2nd Edition. Academic Press, New York, 2012.
- [13] วจิ รามณรงค์ และ สมชัย วงศ์สวัสดิ์. ทรัพยากรน้ำใต้ดินในประเทศไทย. วารสารชมรมนักอุทกวิทยา, 2542; 3 (1): 129-172.
- [14] Talley, L. Descriptive Physical Oceanography (Sixth Edition). New York: Elsevier Ltd., 2011; 29-65.
- [15] Statistics For Dummies®. 2nd Edition. Wiley Publishing, Inc., 2014; 279 -284.
- [16] Schulze-Makuch, D. Longitudinal Dispersivity Data and Implications for Scaling Behavior. Ground Water, 2005; 43 (3): 443 -456.
- [17] พรชัยวรรณ บุญยรัตพันธุ์, สุรัชย์ ลิปิวัฒนาการ, ชัยวัฒน์ ขยันการนาวิ และ พรณพิมพ์ พุทธรักษา มะเปี่ยม. การจำลองการเคลื่อนตัวของน้ำใต้ดินรอบบ่อเก็บน้ำจังหวัดพังงาด้วยแบบจำลอง MODFLOW. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21, 2559; 2144-2152.



การวิเคราะห์ประเภทของวัสดุที่มีผลต่อค่าความเข้มของเสียง ที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่เสียง

Analysis a Material Effecting to Intensity of Sound of under Variable Frequencies

อานนท์ อิศรมงคลรักษ์^{1,*} และ รัฐกุล วุฒวิภาต²

Arnon Isaramongkolrak^{1,*} and Rattakol Vuttavipat²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม 85 หมู่ที่ 3 ถนนมาลัยแมน อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

²แผนกปฏิบัติการและบำรุงรักษา การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคบางแสน 5 ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20130

*E-mail: anone_91@hotmail.com, Tel.: 09-0984-1082, Fax: 034-261-060, 034-261-065

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติของประเภทวัสดุที่ทำให้ลดค่าความเข้มเสียงด้วยการจำลองผลผ่านสมการเชิงอนุพันธ์โดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยบทความนี้มุ่งเน้นวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของวัสดุประเภทคอนกรีตและประเภทไม้ โดยจำลองให้วัสดุทั้งสองประเภทใช้สำหรับจัดทำเป็นห้องทดสอบที่มีแหล่งกำเนิดเสียงที่มีค่าความถี่เสียงเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1,000 Hz ถึง 20,000 Hz อีกทั้งยังเปรียบเทียบผลการจำลองกับมาตรฐาน OSHA และจากผลการจำลองแสดงให้เห็นได้ว่าระดับความถี่เสียงทั่วไปที่มนุษย์สัมผัสซึ่งไม่เกิน 5,000 Hz สามารถใช้วัสดุประเภทคอนกรีตมาช่วยลดค่าความเข้มเสียงได้มากกว่าประเภทไม้ ซึ่งค่าประสิทธิภาพของคอนกรีตและไม้ที่ลดค่าความเข้มเสียงคิดเป็น 58.45% และ 51.70% ตามลำดับ

ABSTRACT

This paper analyzes the properties of material types that reduce the sound intensity by simulating differential equations with finite element method. This paper focuses on the performance of concrete and wood materials by simulating both types of materials for test room design under variable frequencies of source from 1,000 Hz to 20,000 Hz. Moreover, the simulation results compare with OSHA standards. The simulation results show that the typical human sound frequencies of no more than 5,000 Hz can be achieved. If using concrete materials can reduce the sound intensity than wood. The efficiency of concrete and wood decreased by 58.45% and 51.70%, respectively.

1. บทนำ

ความเข้มหรือความดังของเสียงนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น แหล่งกำเนิดเสียง ลักษณะการติดตั้งของแหล่งกำเนิดเสียง พื้นที่ของการกระจายเสียง ลักษณะและขนาดของห้อง รวมถึงสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนเสียงของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีผลทำให้ความเข้มเสียงเปลี่ยนแปลงไป แม้ความดังเสียงจะมี

ความสัมพันธ์กับความเข้มเสียง แต่การหาความสัมพันธ์ไม่สามารถทำได้เนื่องจากความดังของเสียงแปรเปลี่ยนไปตามค่าความถี่ของเสียง โดยค่าความถี่ขนาดกลาง ๆ ซึ่งมีความเข้มเสียงน้อย แต่อาจได้ความรู้สึกดังเท่ากับเสียงที่มีค่าความถี่สูงได้ ดังนั้นการประเมินความดังของเสียงจึงอาศัยการเปรียบเทียบกับเสียงมาตรฐาน โดยเสียงที่มีความถี่ 500 Hz นั้นเป็นเสียงที่มีความเข้มน้อยที่สุดที่

Received 13 March 2018

Revised 21 May 2018

Accepted 18 May 2018

ได้ยินและถือว่าเป็นเสียงที่หูคนไวกที่สุด [1] ดังนั้นบทความนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ประเภทของวัสดุสำหรับการสร้างห้องทดสอบโดยพิจารณาจากระดับความดังของเสียงเมื่อความถี่ของเสียงมีการเปลี่ยนแปลงโดยอาศัยการจำลองผลผ่านสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการหาผลเฉลยแบบประมาณ

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

บทความนี้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจำลองผลของความเข้มเสียง ซึ่งตั้งต้นจากสมการอนุพันธ์ย่อยดังสมการที่ 1 [4]

$$\nabla \cdot (-c \nabla p - \alpha p + \gamma) + \alpha p + \beta \cdot \nabla p = f \quad (1)$$

เมื่อ c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของเสียง

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมของวัสดุ

f คือ ความเข้มของเสียงจากแหล่งกำเนิด

บทความนี้พิจารณาความเข้มของเสียงเพียงช่วงเวลาเดียว (Time harmonic analysis) จึงกำหนดให้ α , β และ γ มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสมการที่ 1 สามารถลดรูปของสมการได้เป็นดังสมการที่ 2 [5]

$$\nabla \cdot (-c \nabla p) + \alpha p = f \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องสำหรับการจำลองผลประกอบไปด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของเสียง (diffusion coefficient) และในบทความนี้กำหนดให้เสียงแพร่กระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นอากาศโดยจะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของอากาศ (ρ) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3 [6]

$$c = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมของวัสดุ (absorption coefficient) [3] สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4

$$a = \frac{\omega^2}{c_s^2 \rho} \quad (4)$$

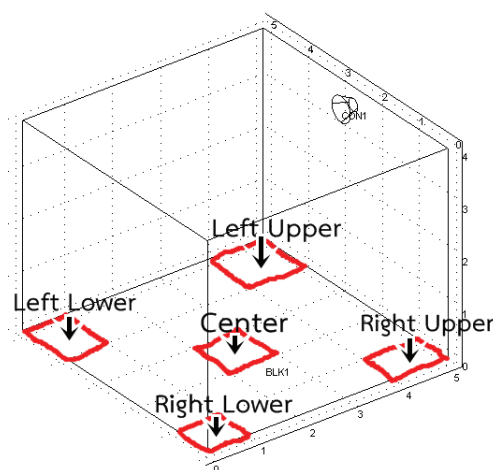
เมื่อ ω คือ ความถี่เชิงมุม (rad/s) มีค่า $2\pi f$

f คือ ค่าความถี่ของเสียงมีค่าเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1,000 – 20,000 Hz

c_s คือ อัตราเร็วของเสียงมีค่าเท่ากับ 343 m/s

3. ระบบทดสอบและพารามิเตอร์การจำลองผล

บทความนี้อาศัยการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งกำหนดให้การกระจายของเสียงแพร่ในห้องสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง 5 เมตร ความยาว 5 เมตร และความสูงของห้อง 4 เมตร โดยกำหนดตำแหน่งการวัดความเข้มของเสียงภายในห้องทดสอบทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง โดยวัดที่ระดับความสูงตั้งแต่ 1 เมตร 2 เมตรและ 3.5 เมตรแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตำแหน่งการพิจารณาค่าความเข้มของเสียง

จากรูปที่ 1 พิจารณาค่าความเข้มเสียงในแต่ละพื้นที่ของห้อง โดยแบ่งเป็น 5 จุด เพื่อเปรียบเทียบประเภทของวัสดุ ซึ่งมีทั้งหมด 2 ประเภท คือ คอนกรีต และไม้

พารามิเตอร์ของปัญหาเกี่ยวกับความเข้มเสียง โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยวัสดุการสะท้อนเสียง แหล่งกำเนิดเสียง ในส่วนของสัมประสิทธิ์การดูดซึมของวัสดุนั้นจะแปรเปลี่ยนไปตามค่าความถี่ของความเข้มเสียง [2] ซึ่งพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องสำหรับการจำลองผลแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สำหรับการจำลองผล

ประเภทวัสดุ	ค่าความหนาแน่น (kg/m ³)	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย
คอนกรีต	2300	0.8264
อากาศ	1.21	0.000435
ไม้	600	0.0017

4. ผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

บทความนี้ได้วิเคราะห์ค่าความเข้มเสียงที่กระจายในห้องทดสอบทั้งหมด 5 ตำแหน่งแล้วแสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย และพิจารณาความถี่ของเสียงตั้งแต่ 1,000 Hz ถึง 20,000 Hz ที่ระดับความสูงจากพื้นห้อง 1 เมตร 2 เมตร และ 3.5 เมตร ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบผลการจำลองเมื่อใช้วัสดุประเภทคอนกรีตและไม้เป็นวัสดุสำหรับการสะท้อนของคลื่นเสียงภายในห้องทดสอบ โดยผลการจำลองจะเปรียบเทียบกับมาตรฐาน Occupational Safety and Health Administration Standard (OSHA) ที่กำหนดค่าความเข้มเสียงไม่เกิน 90 dB [7] ซึ่งผลการจำลองแสดงได้ดังตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการจำลองความเข้มเสียง (dB) เมื่อใช้คอนกรีตเป็นวัสดุสำหรับการสะท้อนของคลื่นเสียง

ความถี่ (Hz)	ความเข้มเสียงเฉลี่ยที่ 1 m	ความเข้มเสียงเฉลี่ยที่ 2 m	ความเข้มเสียงเฉลี่ยที่ 3.5 m	OSHA
1,000	29.77	29.14	28.61	ผ่าน
2,000	22.06	21.17	19.68	ผ่าน

ตารางที่ 2 (ต่อ) ผลการจำลองความเข้มเสียง (dB) เมื่อใช้คอนกรีตเป็นวัสดุสำหรับการสะท้อนของคลื่นเสียง

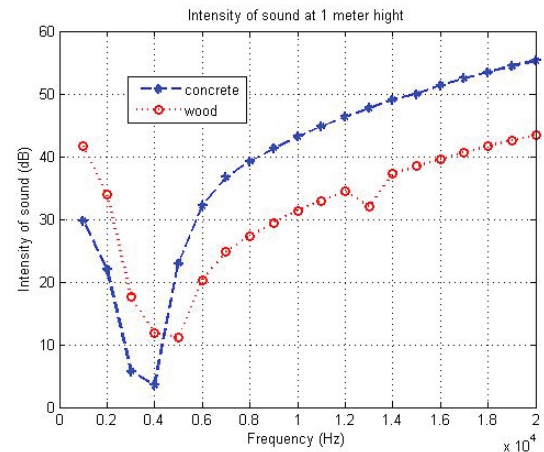
ความถี่ (Hz)	ความเข้มเสียงเฉลี่ยที่ 1 m	ความเข้มเสียงเฉลี่ยที่ 2 m	ความเข้มเสียงเฉลี่ยที่ 3.5 m	OSHA
3,000	5.74	5.67	5.81	ผ่าน
4,000	3.51	2.29	1.81	ผ่าน
5,000	22.95	22.13	21.50	ผ่าน
6,000	32.14	33.32	34.01	ผ่าน
7,000	36.67	37.48	38.02	ผ่าน
8,000	39.20	39.98	40.58	ผ่าน
9,000	41.30	42.05	42.64	ผ่าน
10,000	43.17	43.93	44.50	ผ่าน
11,000	44.82	45.59	46.17	ผ่าน
12,000	46.35	47.12	47.69	ผ่าน
13,000	47.76	48.53	49.09	ผ่าน
14,000	49.06	49.83	50.38	ผ่าน
15,000	49.92	51.03	51.59	ผ่าน
16,000	51.39	52.16	52.72	ผ่าน
17,000	52.46	53.22	53.77	ผ่าน
18,000	53.45	54.22	54.76	ผ่าน
19,000	54.40	55.17	55.71	ผ่าน
20,000	55.30	56.06	56.61	ผ่าน

จากผลการจำลองในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าทุกค่าความถี่ที่มนุษย์สามารถได้ยินเสียงนั้น จะมีค่าความเข้มเสียงไม่เกินค่ามาตรฐาน OSHA ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 90 dB และเมื่อพิจารณาที่ค่าความถี่ตั้งแต่ 5,000 Hz ขึ้นไป ก็ทำให้ค่าความเข้มเสียงมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

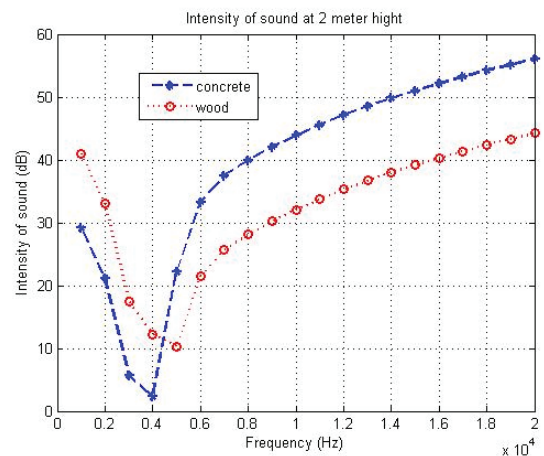
ตารางที่ 3 ผลการจำลองความเข้มเสียง (dB) เมื่อใช้ไม้
เป็นวัสดุสำหรับการสะท้อนของคลื่นเสียง

ความถี่ (Hz)	ความ เข้มเสียง เฉลี่ยที่ 1 m	ความ เข้มเสียง เฉลี่ยที่ 2 m	ความ เข้มเสียง เฉลี่ยที่ 3.5 m	OSHA
1,000	41.61	40.97	40.45	ผ่าน
2,000	33.99	33.01	31.52	ผ่าน
3,000	17.58	17.47	17.55	ผ่าน
4,000	11.85	12.20	11.12	ผ่าน
5,000	11.11	10.29	9.67	ผ่าน
6,000	20.30	21.48	22.17	ผ่าน
7,000	24.83	25.64	26.18	ผ่าน
8,000	27.36	28.14	28.74	ผ่าน
9,000	29.46	30.22	30.80	ผ่าน
10,000	31.33	32.09	32.66	ผ่าน
11,000	32.98	33.75	34.33	ผ่าน
12,000	34.51	35.28	35.85	ผ่าน
13,000	21.98	36.69	37.25	ผ่าน
14,000	37.23	37.99	38.55	ผ่าน
15,000	38.43	39.19	39.75	ผ่าน
16,000	39.56	40.32	40.88	ผ่าน
17,000	40.62	41.38	41.93	ผ่าน
18,000	41.61	42.38	42.92	ผ่าน
19,000	42.56	43.33	43.87	ผ่าน
20,000	43.46	44.22	44.77	ผ่าน

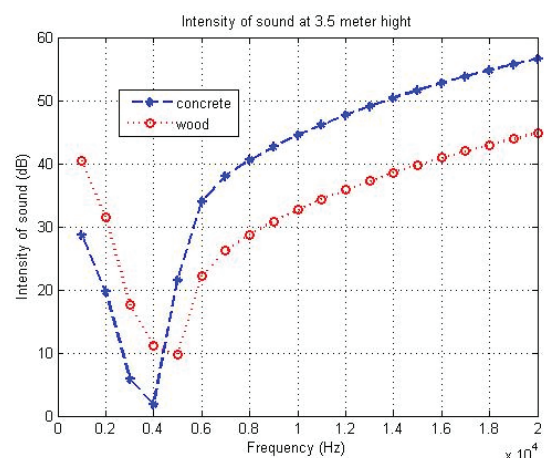
จากผลการจำลองในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 นำมา
สร้างกราฟเปรียบเทียบค่าความเข้มของเสียงที่ระดับ
ความสูง 1, 2 และ 3.5 เมตร เมื่อใช้วัสดุเป็นคอนกรีตและ
ไม้ จะได้ดังรูปที่ 2-4 ตามลำดับ



รูปที่ 4 เปรียบเทียบค่าความเข้มเสียงเมื่อใช้วัสดุเป็น
คอนกรีตและไม้ที่ระดับความสูง 1 เมตร

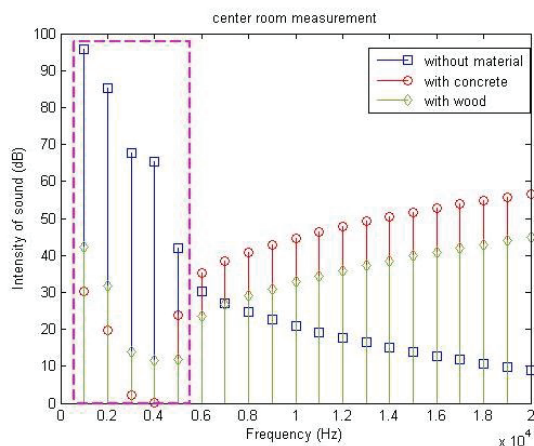


รูปที่ 5 เปรียบเทียบค่าความเข้มเสียงเมื่อใช้วัสดุเป็น
คอนกรีตและไม้ที่ระดับความสูง 2 เมตร

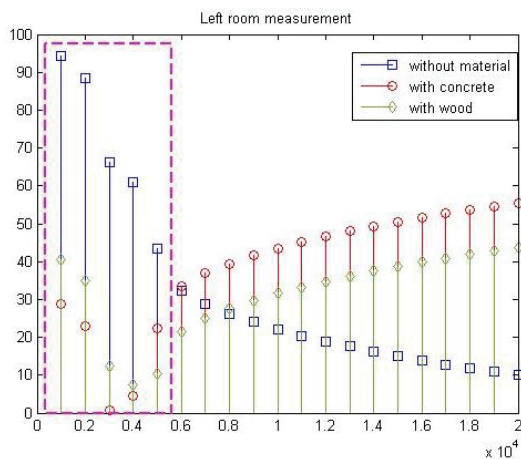


รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าความเข้มเสียงเมื่อใช้วัสดุเป็น
คอนกรีตและไม้ที่ระดับความสูง 3.5 เมตร

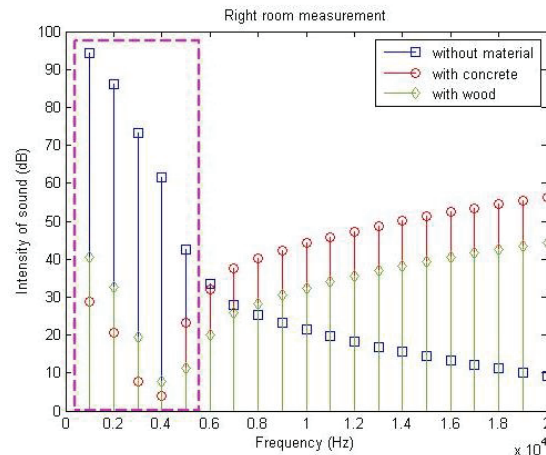
จากรูปที่ 4-6 จะเห็นได้ว่าการใช้คอนกรีตทำโครงสร้างห้องทดสอบจะสามารถลดค่าความเข้มของเสียงในระดับเสียงที่มีความถี่น้อยกว่า 5,000 Hz ได้ดีกว่าการใช้ไม้ แต่เมื่อความถี่มากกว่า 5,000 Hz การใช้ไม้จะลดค่าความเข้มเสียงได้ดีขึ้น และเมื่อพิจารณาตำแหน่งต่าง ๆ ภายในห้องทดสอบ โดยเปรียบเทียบที่ระยะความสูง 1 เมตร จะได้ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 7-9



รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่าความเข้มเสียง
ที่ตำแหน่งกึ่งกลางห้องทดสอบ



รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่าความเข้มเสียง
ที่ตำแหน่งด้านซ้ายของห้องทดสอบ



รูปที่ 9 เปรียบเทียบค่าความเข้มเสียง
ที่ตำแหน่งด้านขวาของห้องทดสอบ

จากรูปที่ 7-9 จะเห็นได้ว่าเมื่อไม่ใช้วัสดุโดยให้คลื่นเสียงเคลื่อนที่โดยอิสระผ่านตัวกลางอากาศภายในห้องทดสอบจะทำให้ค่าความเข้มเสียงมีค่าเกินมาตรฐาน OSHA ที่ค่าความถี่เสียงต่ำ ๆ ดังนั้น การลดความเข้มเสียงจำเป็นต้องอาศัยวัสดุที่ทำจากคอนกรีตมาเป็นโครงสร้างสำหรับห้องทดสอบเสียงที่มีความถี่เสียงไม่เกิน 5,000 Hz ส่วนการลดความเข้มเสียงที่มีความถี่มากกว่า 5,000 Hz จะต้องอาศัยวัสดุที่มีคุณสมบัติคล้ายกับประเภทไม้ และเมื่อพิจารณาที่ความถี่ของเสียงระดับต่ำ (1,000 Hz-5,000 Hz) ซึ่งเป็นความถี่เสียงที่มนุษย์ส่วนใหญ่ได้ยินสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพของวัสดุแต่ละประเภทได้ดังสมการที่ 5

$$eff = \frac{I_{before} - I_{after}}{I_{before}} \times 100\% \quad (5)$$

ค่าประสิทธิภาพของวัสดุแต่ละประเภทที่ความถี่เสียงไม่เกิน 5,000 Hz พิจารณาที่ความสูง 1 เมตรแสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพของวัสดุประเภทคอนกรีตและไม้

ความถี่ (Hz)	ก่อนใช้วัสดุ	ใช้วัสดุคอนกรีต	ใช้วัสดุไม้	ประสิทธิภาพของคอนกรีต (%)	ประสิทธิภาพของไม้ (%)
1,000	95.34	29.77	41.61	68.78	56.36
2,000	87.64	22.06	33.09	68.79	56.37
3,000	71.31	5.74	17.58	68.78	56.36
4,000	65.59	3.51	11.85	65.11	56.37
5,000	42.62	22.95	11.11	20.63	33.05
เฉลี่ย				58.45	51.70

จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติคล้ายประเภทคอนกรีตจะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการลดค่าความเข้มเสียงเป็น 58.45% และเมื่อใช้วัสดุประเภท

ไม้ ทำให้ได้ประสิทธิภาพในการลดค่าความเข้มเสียงเป็น 51.70% โดยวัสดุทั้งสองประเภทนี้ทำให้ค่าความเข้มเสียงอยู่ในมาตรฐานของ OSHA

5. สรุปผลการจำลอง

จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า ค่าความเข้มเสียงจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้สำหรับการสะท้อนเสียง โดยวัสดุที่มีค่าความหนาแน่นน้อยจะมีประสิทธิภาพการลดค่าความเข้มเสียงได้ดีเมื่อทำงานกับเสียงที่มีค่าความถี่สูง ส่วนวัสดุที่มีค่าความหนาแน่นมาก จะมีประสิทธิภาพการลดค่าความเข้มเสียงได้ดีเมื่อทำงานกับเสียงที่มีค่าความถี่ต่ำ โดยเมื่อพิจารณาที่ความถี่การได้ยินของมนุษย์ในระดับปกติ ค่าประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุนิคอนกรีตกับไม้มีค่าเป็น 58.45% และ 51.70% จากผลการจำลองดังกล่าวสามารถเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบห้อง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันเสียงรบกวนโดยอาศัยการใช้งานจากคุณสมบัติของวัสดุประเภทคอนกรีตและไม้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Smith, J.P. Kiel, D.H. and Hurst, C.J. Intensity Measurements and Radiated Noise Reduction for Freon Compressor. International Compressor Engineering Conference, School of Mechanical Engineering, Purdue University, 1992.
- [2] Okubo, N., Nakane, N., Miyano, H. and Nogiwa, Y. 3-Dimensional Acoustic Intensity Measurement by Use of 4 Microphones. Proceeding on IMAC, 1985; 3: 652.
- [3] Lawson, M. V. The Sound Field for Singularities in Motion. Proceeding of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science, A286559, 1965.
- [4] Timothy, H. Study and Research Regarding Sound Reduction Material with The Purpose of Reducing Sound Pollution. Master Thesis, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2014.
- [5] Barron, R. F. Industrial Noise Control and Acoustics. New York: Marcel Dekker, 2013.
- [6] Gade, S. Sound Intensity and its Application in Noise Control. *Sound and Vibration*, 1985; 14-26.
- [7] Occupational Safety and Health Administration. [Online] Available: <https://www.osha.gov/>.



ผลกระทบของปัจจัยในกระบวนการบรรจุที่มีต่อปริมาตร เครื่องดื่มที่มีส่วนผสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

Effects of Factors in Packaging Process on Volume of Carbon Dioxide Mixed Beverage

ชานิดา กัมพลานนท์* และ นภัสวงศ์ โอสธสิลป์

Chanida Kampalanon* and Napassavong Osothsilp

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok 10330 Thailand

E-mail: chanida.kampalanon@gmail.com*, Napassavong.O@chula.ac.th

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่มได้ให้ความสำคัญกับปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ที่ถูกบรรจุลงภายในบรรจุภัณฑ์ เนื่องจาก ปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ภายในบรรจุภัณฑ์จะส่งผลต่อปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการบรรจุ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบหลักของปัจจัย และผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องโดยมีปัจจัยที่ทำการทดลอง 5 ปัจจัยได้แก่ 1. ความยาวของท่อระบาย 2. ระดับของวาล์วปิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 3. ระดับของวาล์วที่ไล่อากาศและไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 4. ค่าความดันภายในถังเก็บ และ 5. ค่าระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลางชนิด Faced Central Composite (CCF) ซึ่งมีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 32 การทดลอง ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบหลักต่อปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง คือ ความยาวท่อระบาย ส่วนปัจจัยที่มีผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง ได้แก่ 1. ความยาวของท่อระบายกับระดับของวาล์วที่ไล่อากาศและไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 2. ระดับของวาล์วที่ไล่อากาศและไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับค่าความดันภายในถังเก็บ และ 3. ค่าความดันภายในถังเก็บกับค่าระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บ

ABSTRACT

The beverage industry has focused on the volume of product water within packaging because it affects the amount of waste that occurs in the packaging process. This research aims to study the main effects and interaction effects of factors of the volume of product water within the can. Five factors were studied, which are the length of vent tube, the level of the CO₂ diaphragm valve, the level of the drain valve, the pressure inside the tank, and the product level inside the tank. The researcher applied the experimental design technique of the Central Composite Face-Centered (CCF) design type to investigate the effects. The results showed that the length of vent tube had significant effect on the volume of product water. Moreover, the significant interaction effects were the interactions between the length of vent tube and the level of the drain valve, the level of the drain valve and the pressure inside the tank, and the pressure inside the tank and product level inside the tank.

Received 10 April 2018

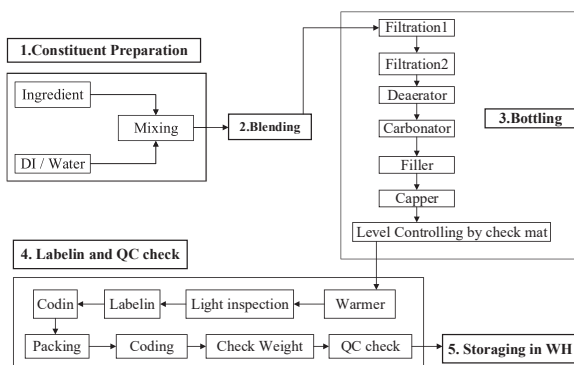
Revised 15 May 2018

Accepted 18 May 2018

1. บทนำ

อุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่มีส่วนผสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มการเติบโตของธุรกิจในตลาดที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะมีความต้องการของผู้บริโภคเพิ่มมากขึ้น และปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่มีส่วนผสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีการแข่งขันทางการตลาดที่สูงทำให้โรงงานผลิตต้องวางแผนการเพิ่มคุณภาพสินค้า และลดต้นทุนการผลิตควบคู่กันเพื่อสร้างความได้เปรียบในการแข่งขันทางการตลาด

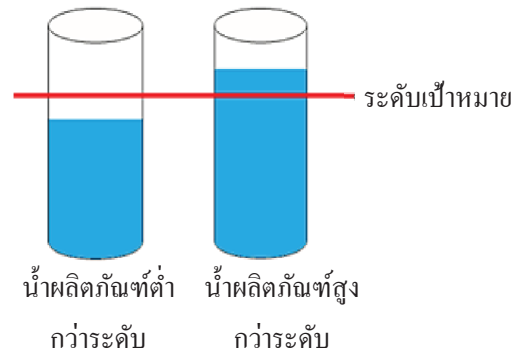
กระบวนการผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่มีส่วนผสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะประกอบด้วย 5 กระบวนการ ได้แก่ 1. กระบวนการเตรียมส่วนผสม 2. กระบวนการกวน 3. กระบวนการบรรจุ และปิดฝา 4. กระบวนการติดฉลากภาชนะบรรจุและตรวจสอบผลิตภัณฑ์ และ 5. กระบวนการจัดเก็บ กระบวนการผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของโรงงานกรณีศึกษาแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพกระบวนการผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่มีส่วนผสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ปัจจุบันกระบวนการบรรจุของโรงงานกรณีศึกษามีมูลค่าความสูญเสียคิดเป็นร้อยละ 80.92 ของมูลค่าความสูญเสียรวมทั้งกระบวนการผลิต ซึ่งความสูญเสียในกระบวนการบรรจุเกิดจากปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ที่บรรจุลงในกระป๋องไม่ตรงตามค่าเป้าหมาย ทำให้เกิดของเสียในกระบวนการบรรจุได้สองกรณี คือ น้ำผลิตภัณฑ์ภายใน

กระป๋องต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ (Under filled) และน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ (Overfilled) รูปที่ 2 แสดงกรณีการเกิดของเสียในกระบวนการบรรจุทั้งสองกรณี



รูปที่ 2 กรณีการเกิดของเสียในกระบวนการบรรจุ

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบหลักของปัจจัย และผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง โดยกระบวนการบรรจุนั้นแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่

1. ขั้นตอนการไล่อากาศออกจากกระป๋อง (Deaerator)

ขั้นตอนการไล่อากาศออกจากกระป๋องเริ่มจากอากาศภายในกระป๋องถูกไล่ออกจากกระป๋องโดยใช้แรงดันจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาจากถังเก็บน้ำผลิตภัณฑ์ (Ring bowl) โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะไหลมาทางท่อระบาย (Vent tube) ลงสู่กระป๋อง และไล่อากาศออกจากกระป๋องผ่านทางวาล์วไล่อากาศ

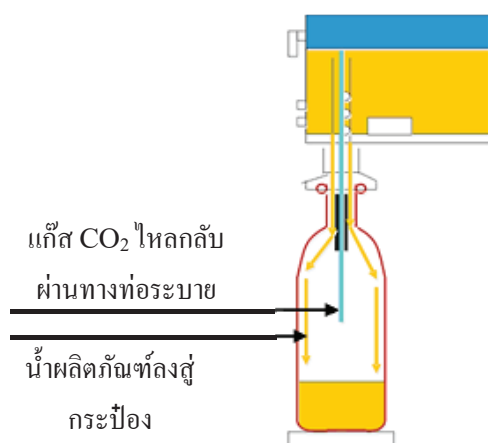
2. ขั้นตอนการเติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbonator)

ขั้นตอนการเติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าสู่กระป๋องผ่านทางท่อระบายเพื่อเป็นการไล่อากาศออกจากกระป๋อง และเพื่อเป็นการปรับความดันภายในกระป๋องให้พร้อมเข้าสู่กระบวนการเติม

3. ขั้นตอนการเติม (Filler)

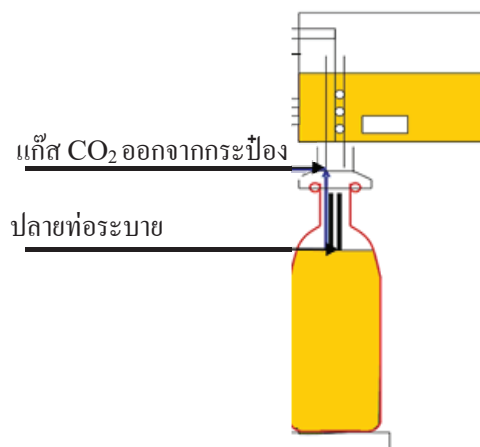
ขั้นตอนการเติมเริ่มจากความดันภายในกระป๋องน้อยกว่าความดันภายในถังเก็บน้ำผลิตภัณฑ์ทำให้

น้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บถูกดันด้วยแรงดันเป็นผลให้น้ำผลิตภัณฑ์ไหลเข้าสู่กระป๋อง และเมื่อน้ำผลิตภัณฑ์ไหลเข้าสู่กระป๋องแล้ว น้ำผลิตภัณฑ์จะเข้าไปแทนที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต้องไหลกลับไปยังถังเก็บน้ำผลิตภัณฑ์ผ่านทางท่อระบายเช่นเดิม ขั้นตอนการเติมน้ำผลิตภัณฑ์เข้าสู่บรรจุภัณฑ์แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนการเติมน้ำผลิตภัณฑ์เข้าสู่บรรจุภัณฑ์

นอกจากนั้นลักษณะเครื่องบรรจุของโรงงานกรณีศึกษามีลักษณะระบบการบรรจุประเภทบรรจุจนถึงระดับที่กำหนด (Level-sensing filler) ทำให้เมื่อน้ำผลิตภัณฑ์ถูกบรรจุจนถึงปลายท่อระบายซึ่งเป็นระดับที่กำหนด ระบบควบคุมจะปิดการไหลของน้ำผลิตภัณฑ์ทันที [1] เมื่อน้ำผลิตภัณฑ์หยุดไหลลงสู่กระป๋อง วาล์วปิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะทำหน้าที่ปิดทางท่อระบายเพื่อปิดการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างภายในกระป๋องกับภายในถังเก็บน้ำผลิตภัณฑ์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ยังคงเหลืออยู่ภายในกระป๋องจะถูกปล่อยออกทางวาล์วไล่อากาศ ซึ่งในขั้นตอนนี้วาล์วไล่อากาศทำหน้าที่เป็นวาล์วไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยขั้นตอนดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4 และสุดท้ายหลังจากกระป๋องบรรจุน้ำผลิตภัณฑ์เรียบร้อยแล้วจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องปิดฝาต่อไป



รูปที่ 4 น้ำผลิตภัณฑ์บรรจุถึงปลายท่อระบายและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากกระป๋อง

4. ขั้นตอนการตรวจสอบระดับน้ำผลิตภัณฑ์ (Level Controlling)

ขั้นตอนการตรวจสอบระดับน้ำผลิตภัณฑ์นั้น มีเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบ คือ Check mat เป็นเครื่องเซนเซอร์ตรวจสอบระดับน้ำผลิตภัณฑ์ของแต่ละกระป๋อง ถ้าพบกระป๋องที่มีระดับน้ำผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าเกณฑ์ระดับที่กำหนด กระป๋องนั้นจะถูกคัดออกจากสายการผลิตกลายเป็นของเสีย (Reject)

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มีการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบรรจุก่อนหน้านี้ ได้แก่ กระบวนการบรรจุเครื่องดื่ม กระบวนการบรรจุครีมอัดนม กระบวนการบรรจุขนม และกระบวนการบรรจุปุ๋ย พบว่าสาเหตุที่ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่บรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ไม่ตรงตามค่าเป้าหมายแบ่งออกเป็น 5 หมวดหมู่ดังแสดงในตารางที่ 1

สาเหตุที่แสดงในตารางที่ 1 รวบรวมจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการบรรจุก่อนหน้านี้ คือ งานวิจัยของ Dewa ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดของเสียในกระบวนการบรรจุของเหลวและกระบวนการปิดฝาเพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพ

ตารางที่ 1 สาเหตุที่ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่บรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ไม่ตรงตามค่าเป้าหมาย

หมวดหมู่	สาเหตุ
คน	พนักงานจดค่าปริมาณผลิตภัณฑ์ภายในบรรจุภัณฑ์ไม่ถูกต้อง
	พนักงานยอมรับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐาน
	พนักงานตั้งค่าพารามิเตอร์ผิด
	พนักงานไม่ได้รับการอบรม
เครื่องจักร	หัวบรรจุชำรุด
	ท่อระบายชำรุด
	การสึกหรอของสกรู
	วาล์วชำรุด
	ไม่มีการบำรุงซ่อมแซมเครื่องจักร
วิธีการ	การตั้งค่าความดันไม่เหมาะสม
	อัตราการป้อนเข้าสู่เครื่องบรรจุไม่เหมาะสม
	ความเร็วในการบรรจุผลิตภัณฑ์ไม่เหมาะสม
	ความยาวท่อระบายไม่เหมาะสม
	การเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ที่บรรจุบ่อย
	อุณหภูมิในการบรรจุไม่เหมาะสม
วัสดุ	ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ไม่คงที่
	อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ไม่คงที่
	ผลิตภัณฑ์ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน
การวัด	เครื่องวัดไม่มีการสอบเทียบ
	ระบบการวัดไม่เที่ยงตรง
	เครื่องวัดไม่ได้ทำความสะอาด
	เครื่องวัดไม่ได้รับการซ่อมบำรุง
สภาพแวดล้อม	ปริมาณฝุ่นละอองมาก
	อากาศไม่ถ่ายเท

โดยใช้แผนผังสาเหตุและผลเพื่อระบุสาเหตุที่ส่งผลให้เกิดของเสียในกระบวนการบรรจุ โดยสาเหตุที่วิเคราะห์ได้แบ่งออกเป็น 5 หมวดหมู่ ได้แก่ คน เครื่องจักร วิธีการ

วัสดุ และการวัด [2] ส่วนงานวิจัยของ Baía จะศึกษาการแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับการบรรจุภัณฑ์น้ำหนักรวมโดยใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา และใช้แผนผังสาเหตุและผลเพื่อระบุสาเหตุที่ส่งผลให้เกิดของเสียในกระบวนการบรรจุ แต่สาเหตุที่วิเคราะห์ได้จะมีความแตกต่างกับงานวิจัยของ Dewa เล็กน้อย เนื่องจากงานวิจัยของ Baía เป็นกระบวนการบรรจุของแข็ง โดยสาเหตุที่วิเคราะห์ได้แบ่งออกเป็น 4 หมวดหมู่ ได้แก่ คน เครื่องจักร การวัด และสภาพแวดล้อม [3] นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยของ Desai ที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้แนวทางซิกซ์ ซิกมา เพื่อปรับปรุงกระบวนการบรรจุนม เนื่องจากเกิดปัญหาน้ำหนักนมในกล่องมีค่าปริมาตรไม่ตรงตามค่าเป้าหมาย ซึ่งใช้แผนผังสาเหตุและผลในการวิเคราะห์สาเหตุ โดยสาเหตุที่วิเคราะห์ได้แบ่งออกเป็น 5 หมวดหมู่ ได้แก่ คน เครื่องจักร วิธีการ วัสดุ และ การวัด [4] และงานวิจัยของ วสิน พันธุ์เมฆากุล ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความผันแปรของน้ำหนักบรรจุภายในขวดที่บรรจุด้วยเครื่องบรรจุ Filpac งานวิจัยนี้ใช้แผนผังสาเหตุและผลในการหาสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่จะส่งผลต่อความผันแปรของน้ำหนักบรรจุภายในขวด และออกแบบการทดลอง 2^k แฟกทอเรียล เพื่อหาผลกระทบหลักและผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยที่ส่งผลต่อน้ำหนักบรรจุภายในขวด ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อน้ำหนักบรรจุภายในขวดอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ความเร็วดูด และความเร็วยิงบรรจุ [5] และสุดท้ายงานวิจัยของ หทัยชนก พรหมสร ที่ศึกษาเกี่ยวกับการลดปริมาณของเสียในกระบวนการบรรจุผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับเส้นผมของโรงงานกรณีศึกษา โดยใช้หลักการซิกซ์ ซิกมาในการปรับปรุงกระบวนการ ซึ่งในขั้นตอนการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาได้ใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ คือ แผนผังสาเหตุและผลสามารถสรุปสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมดได้ 4 หมวดหมู่ คือ คน เครื่องจักร วัสดุ และวิธีการ [6]

งานวิจัยนี้ นำปัจจัย 2 ปัจจัยที่ได้จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้าคือ ความยาวของท่อระบาย และค่าความดันภายในถังเก็บมาวิเคราะห์ เนื่องจากผู้วิจัยพบว่าปัจจัยที่

ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่บรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ไม่ตรงตามค่าเป้าหมายในงานวิจัยก่อนหน้านี้มีเพียงปัจจัย 2 ปัจจัยดังกล่าวที่สอดคล้องกับลักษณะการทำงานของเครื่องบรรจุที่ทางโรงงานกรณีศึกษาใช้ดำเนินการบรรจุ โดยเครื่องบรรจุของทางโรงงานกรณีศึกษามีลักษณะเป็นแบบบรรจุจนถึงระดับที่กำหนด และระดับที่กำหนดคือปลายท่อระบาย ทำให้ความยาวของท่อระบายจึงอาจมีผลกระทบอย่างมากต่อปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง และขั้นตอนการเติมของเครื่องบรรจุที่ทางโรงงานกรณีศึกษาใช้ดำเนินการบรรจุนั้นใช้ความดันภายในถังเก็บทำให้น้ำผลิตภัณฑ์ไหลเข้าสู่กระป๋อง ค่าความดันภายในถังเก็บจึงอาจจะมีผลกระทบอย่างมากต่อปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง ส่วนปัจจัยอื่นในหมวดหมู่วิธีการ ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ไม่ได้นำมาวิเคราะห์ เนื่องจากเหตุผลดังต่อไปนี้

1. อัตราการป้อนเข้าสู่เครื่องจักรไม่ได้นำมาวิเคราะห์ เพราะเครื่องบรรจุของโรงงานกรณีศึกษาจะป้อนน้ำผลิตภัณฑ์เข้าสู่ถังเก็บน้ำผลิตภัณฑ์ให้ถึงระดับที่กำหนดก่อนจะเริ่มกระบวนการบรรจุ ปัจจัยอัตราการป้อนเข้าสู่เครื่องจักรจึงไม่มีผลกระทบต่อปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง

2. ความเร็วในการบรรจุผลิตภัณฑ์ไม่ได้นำมาวิเคราะห์ เพราะเครื่องบรรจุของโรงงานกรณีศึกษานั้นจะมีความเร็วในการบรรจุผลิตภัณฑ์มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความดันภายในถังเก็บ ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่ศึกษาปัจจัยเรื่องความเร็วในการบรรจุ เนื่องจากได้ศึกษาปัจจัยเรื่องความดันภายในถังเก็บแล้ว

3. การเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ที่บรรจุบ่อยไม่ได้นำมาวิเคราะห์ เพราะการเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ที่บรรจุบ่อยเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ขึ้นอยู่กับการต้องการของตลาด การจัดการการผลิต เป็นต้น

4. อุณหภูมิในการบรรจุไม่ได้นำมาวิเคราะห์ เพราะโรงงานกรณีศึกษาเคยทำการศึกษาหาอุณหภูมิที่เหมาะสมแล้ว และกำหนดค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการบรรจุผลิตภัณฑ์ ปัจจัยนี้จึงไม่นำมาวิเคราะห์ในงานวิจัย

ส่วนปัจจัยในหมวดหมู่อื่นที่ไม่นำมาวิเคราะห์เนื่องจากเหตุผลดังต่อไปนี้

1. หมวดหมู่คนไม่นำมาวิเคราะห์ เนื่องจากพนักงานของโรงงานกรณีศึกษาได้รับการอบรมเกี่ยวกับกระบวนการบรรจุ และปฏิบัติงานได้ตามวิธีการที่กำหนดแล้ว

2. หมวดหมู่เครื่องจักร เนื่องจากเครื่องจักรของโรงงานกรณีศึกษาได้รับการบำรุง ซ่อมแซม และตรวจสอบการชำรุดอย่างสม่ำเสมอ

3. หมวดหมู่วัสดุ เนื่องจากทางโรงงานกรณีศึกษามีฝ่ายตรวจสอบ และควบคุมคุณสมบัติของน้ำผลิตภัณฑ์ก่อนการบรรจุให้มีความคงที่ในทุก ๆ รอบการผลิต

4. หมวดหมู่การวัด เนื่องจากกระบวนการวัดในกระบวนการบรรจุของโรงงานกรณีศึกษาผ่านการวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis: MSA) ว่าอยู่ในเกณฑ์ที่น่าเชื่อถือ

5. หมวดหมู่สภาพแวดล้อม เนื่องจากกระบวนการบรรจุน้ำผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษาเป็นระบบปิด สภาพแวดล้อมจึงไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการบรรจุ

ปัจจัยในหมวดหมู่ คน เครื่องจักร วัสดุ การวัด และสภาพแวดล้อมมีผลต่อการเกิดปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องไม่ตรงตามค่าเป้าหมายน้อย งานวิจัยนี้จึงเลือกปัจจัยความยาวของท่อระบาย และปัจจัยค่าความดันภายในถังเก็บมาวิเคราะห์ผลกระทบหลักของปัจจัยและผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง และได้ศึกษาปัจจัยที่ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่บรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ไม่ตรงตามค่าเป้าหมายเพิ่มเติมที่แตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้อีก 3 ปัจจัย คือ ระดับของวาล์วที่ไล่อากาศและไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บ และระดับของวาล์วปิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจาก

กระบวนการบรรจุของโรงงานการศึกษาเป็นการบรรจุ น้ำผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเป็นเหตุผลทำให้สาเหตุที่มีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ บรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ไม่ตรงตามค่าเป้าหมายแตกต่างจาก กระบวนการบรรจุน้ำผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีส่วนผสมของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ โดยผู้วิจัยและคณะทีมงานผู้เชี่ยวชาญ ในกระบวนการบรรจุซึ่งประกอบด้วย วิศวกรฝ่ายผลิตและ ควบคุมเครื่องจักร วิศวกรฝ่ายซ่อมบำรุง และวิศวกรฝ่าย ควบคุมคุณภาพ ประชุมระดมความคิดและพบว่าปัจจัย ทั้ง 3 ปัจจัยอาจจะมีผลกระทบอย่างมากต่อปริมาตร น้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง โดยปัจจัยระดับของวาล์วที่ ไล่อากาศและไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ถ้าระดับ ของวาล์วที่ไล่อากาศและไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เปิด แคลบไป ทำให้ขั้นตอนการไล่อากาศภายในกระป๋องยังมี ปริมาณอากาศซึ่งมีแก๊สออกซิเจนปะปนอยู่ อาจส่งผลต่อ ปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์และคุณภาพน้ำผลิตภัณฑ์ภายใน กระป๋อง ในทางกลับกันถ้าระดับของวาล์วที่ไล่อากาศและ ไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เปิดกว้างเกินไปในขั้นตอน การไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อาจทำให้มีปริมาณ น้ำผลิตภัณฑ์ซึ่งอยู่ในรูปแบบฟองถูกไล่ออกจากกระป๋อง มาก ส่งผลให้ปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง น้อยกว่าปริมาณเดิม ส่วนปัจจัยค่าระดับน้ำผลิตภัณฑ์ ภายในถังเก็บนั้น ถ้าระดับน้ำผลิตภัณฑ์ในถังเก็บ มากเกินไป จะส่งผลให้มีแรงดันในการเติมน้ำผลิตภัณฑ์ ลงสู่กระป๋องมาก น้ำผลิตภัณฑ์จึงเคลื่อนที่ลงสู่กระป๋อง อย่างรวดเร็ว ทำให้กระบวนการบรรจุมีความเร็วในการ บรรจุน้ำผลิตภัณฑ์ลงสู่กระป๋องสูงเป็นผลให้น้ำผลิตภัณฑ์ เกิดฟอง และฟองไปตะกอนหรือระบายก่อนที่ปริมาตร น้ำผลิตภัณฑ์จะเท่ากับ 250 มิลลิลิตร ในทางกลับกัน ถ้าระดับน้ำผลิตภัณฑ์ในถังเก็บต่ำเกินไป จะส่งผลให้มี แรงดันในการเติมน้ำผลิตภัณฑ์ลงสู่กระป๋องน้อย น้ำผลิตภัณฑ์จึงเคลื่อนที่ลงสู่กระป๋องค่อนข้างช้า ส่งผล ถึงปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องและความเร็ว ในการบรรจุผลิตภัณฑ์ของกระบวนการบรรจุ และปัจจัย ระดับของวาล์วปิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้น วาล์วปิด

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทำหน้าที่ปิดการไหลของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างถังเก็บกับภายในกระป๋อง ถ้ากรณีที่ความดันภายในถังเก็บสูงกว่าภายในกระป๋อง แล้วระดับของวาล์วปิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ ระดับต่ำ จะทำให้วาล์วปิดไม่สนิท อาจมีโอกาที่แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์จะไหลเพิ่มเติมมาจากถังเก็บ ทำให้ ภายในกระป๋องนั้นมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มาก เมื่อปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาก จึงทำให้ปริมาณ ฟองมากด้วย ส่งผลให้ในขั้นตอนสุดท้ายที่มีการไล่แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์อาจทำให้มีปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ซึ่งอยู่ ในรูปแบบฟองถูกไล่ออกจากกระป๋องไปด้วย ส่งผลให้ ปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ในกระป๋องน้อยกว่าปริมาณเดิม แต่ ถ้าในกรณีความดันภายในถังเก็บต่ำกว่าภายในกระป๋อง แล้วระดับวาล์วปิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ระดับสูง จะทำให้วาล์วปิดสนิทส่งผลให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่สามารถที่จะไหลจากกระป๋องไปยังถังเก็บได้ ทำให้ ภายในกระป๋องนั้นมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มาก เมื่อ ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากจึงทำให้ปริมาณฟอง มากด้วย ส่งผลให้ในขั้นตอนสุดท้ายที่มีการไล่แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์อาจทำให้มีปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ ซึ่ง อยู่ในรูปแบบฟองถูกไล่ออกจากกระป๋องไปด้วย ส่งผลให้ ปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ในกระป๋องน้อยกว่าปริมาณเดิม ดังนั้นจากการระดมความคิดของผู้วิจัยและคณะทีมงาน ผู้เชี่ยวชาญจึงทำให้งานวิจัยนี้เลือกระดับของวาล์วที่ ไล่อากาศและไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าระดับ น้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บ และระดับของวาล์วปิดแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์มาวิเคราะห์ผลกระทบหลักของปัจจัย และผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ ปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง

งานวิจัยนี้จึงมีปัจจัย 5 ปัจจัยที่จะทำการทดลองเพื่อ ศึกษาผลกระทบหลักของปัจจัยและผลกระทบร่วมระหว่าง สองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาตรน้ำผลิตภัณฑ์ภายใน กระป๋อง ได้แก่ ความยาวของท่อระบาย ค่าความดันภายใน ถังเก็บ ระดับของวาล์วปิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ระดับ

ของวาล์วที่โล่อากาศและไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ
ค่าระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บ

3. วิธีการ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบการทดลอง
เพื่อศึกษาผลกระทบหลักของปัจจัยและผลกระทบร่วม
ระหว่างสองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์
ภายในกระป๋อง และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย
นำเข้ากับปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง

3.1 รูปแบบการทดลอง

ผู้วิจัยเลือกการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิว
ผลตอบแบบส่วนประสมกลางชนิด Faced Central
Composite (CCF) แบบครึ่งหนึ่งในการออกแบบ
การทดลองเนื่องด้วยเหตุผล ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสม
กลาง แบบครึ่งหนึ่งจะมีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ
32 การทดลอง ซึ่งน้อยกว่าการออกแบบพื้นผิวผลตอบ
แบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ที่มีจำนวนการทดลองทั้งหมด
เท่ากับ 46 การทดลอง

2. การออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสม
กลางแบบครึ่งหนึ่ง โดยมีจำนวนปัจจัยนำเข้าเท่ากับ
5 ปัจจัยจะคำนวณค่า α ได้จากสมการที่ 1 [7]

$$\alpha = (2^{k-p})^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

กำหนด k เท่ากับ 5 และ p เท่ากับ 1

จากสมการที่ 1 สามารถคำนวณค่า α ได้เท่ากับ 2
ทำให้ต้องมีการปรับระดับปัจจัยแต่ละปัจจัยเท่ากับ 5 ระดับ
คือ $\pm 2, \pm 1$ และ 0 แต่ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัด คือ
ปัจจัยนำเข้า 2 ปัจจัย ได้แก่ ระดับของวาล์วปิดแก๊ส
คาร์บอนไดออกไซด์ และระดับของวาล์วที่โล่อากาศและ
ไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไม่สามารถปรับระดับปัจจัย
เท่ากับ 5 ระดับได้ เนื่องจากทั้งสองปัจจัยนำเข้านั้นสามารถ
ปรับระดับปัจจัยได้เพียงแค่ 3 ระดับเท่านั้น ดังนั้นจึง
ไม่สามารถทำการออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วน

ประสมกลางได้ ทางผู้วิจัยจึงออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบ
ส่วนประสมกลางชนิด Faced Central Composite แบบ
ครึ่งหนึ่ง โดยการออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสม
กลางชนิด Faced Central Composite จะกำหนดค่า
 $\alpha = 1$ [8], [9] นอกจากนั้น การออกแบบพื้นผิวผลตอบ
แบบส่วนประสมกลางชนิด Faced Central Composite
แบบครึ่งหนึ่งยังให้รายละเอียดความสัมพันธ์ของ
ผลกระทบ (Resolution) เท่ากับระดับ V ซึ่งรายละเอียด
ความสัมพันธ์ของผลกระทบเท่ากับระดับ V หมายความว่า
ผลกระทบหลักของปัจจัยจะไม่ปะปนกับผลกระทบหลัก
ของปัจจัยอื่น ๆ และไม่ปะปนกับผลกระทบร่วมระหว่าง
สองปัจจัย และผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยจะไม่
ปะปนกันเอง แต่ผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยจะ
ปะปนกับผลกระทบร่วมระหว่างสามปัจจัย ซึ่งผลกระทบ
ร่วมระหว่างสามปัจจัย เป็นผลกระทบที่ไม่พิจารณา
เนื่องจากมีโอกาสสูงที่จะไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นผู้วิจัยจึง
สามารถยอมรับได้ทั้งระดับรายละเอียดความสัมพันธ์ของ
ผลกระทบและจำนวนการทดลอง อีกทั้งการออกแบบ
พื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลางชนิด Faced Central
Composite แบบครึ่งหนึ่งมีการทดลองซ้ำที่จุดศูนย์กลาง
(Center Runs) โดยมีจำนวนการทดลองซ้ำขึ้นอยู่กับค่า k
หรือจำนวนปัจจัย ในงานวิจัยนี้มีจำนวนปัจจัยเท่ากับ
5 ปัจจัย จำนวนการทดลองจุดศูนย์กลางจึงทดลองซ้ำเป็น
จำนวน 6 การทดลอง โดยการทดลองที่จุดศูนย์กลางนั้น
จะสามารถทำให้เห็นความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง
(Curvature) ระหว่างปัจจัยและตัวแปรตอบสนองได้
ในกรณีที่ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและตัวแปร
ตอบสนองไม่เป็นเส้นตรง (Non-Linear) และสามารถ
หาค่าประมาณความผิดพลาด (random error) ของการ
ทดลองได้ งานวิจัยนี้ไม่ได้มีการทำซ้ำที่ส่วนการทดลอง
แฟกทอเรียล (Factorial runs) และส่วนของจุดแกน
(Axial runs) เนื่องจากสามารถประมาณค่าความผิดพลาด
ได้จากการทดลองซ้ำที่จุดศูนย์กลางแล้ว อีกทั้งในแต่ละ
การทดลองของการทดลองแฟกทอเรียล และการทดลองที่

จุดแกนจะมีการเก็บตัวอย่าง 100 กระป๋อง จึงทำให้สามารถเห็นค่าผิดปกติ (Outlier) ในแต่ละการทดลองได้

3.2 ปัจจัยนำเข้า

ปัจจัยนำเข้ามีทั้งหมด 5 ปัจจัย โดยสัญลักษณ์แทนปัจจัย และระดับที่ทำการทดลองจะแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยที่จะทำการทดลอง

ปัจจัย	ระดับที่ทำการทดลอง		
	-1	0	1
ความยาวของท่อระบาย (A) หน่วย มิลลิเมตร	106	107	108
ระดับของวาล์วปิดแก๊ส CO ₂ (B) หน่วย ระดับ	1	2	3
ระดับของวาล์วที่ไล่อากาศ และไล่แก๊ส CO ₂ (C) หน่วย ระดับ	1	2	3
ค่าความดันภายในถังเก็บ (D) หน่วย บาร์	2.5	3.0	3.5
ค่าระดับน้ำผลิตก๊าซภายใน ถังเก็บ (E) หน่วย เปอร์เซ็นต์	25	35	45

3.3 ตัวแปรตอบสนอง

ตัวแปรตอบสนองในงานวิจัยนี้ คือ ปริมาณน้ำผลิตก๊าซภายในกระป๋อง

3.4 วิธีการทดลอง

งานวิจัยจะทำการทดลองทั้งหมด 32 การทดลอง โดยในแต่ละการทดลองจะมีการตั้งค่าระดับปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัยแตกต่างกันตามการออกแบบพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลางชนิด Faced Central Composite และในแต่ละการทดลองจะมีการเก็บผลการทดลองโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำกระป๋องที่สุ่มเก็บไปชั่งน้ำหนัก หน่วยเป็นกรัม และคำนวณน้ำหนักของน้ำผลิตก๊าซภายในกระป๋องได้จากการนำน้ำหนักรวมทั้งหมดของน้ำผลิตก๊าซและกระป๋องลบด้วยน้ำหนักของกระป๋องเปล่า และน้ำหนักของ

ฝากระป๋อง โดยกระป๋องเปล่าและฝากระป๋องมีน้ำหนักรวมกันเท่ากับ 11.56 กรัม

2. แปลงน้ำหนักน้ำผลิตก๊าซเป็นปริมาตร น้ำผลิตก๊าซสามารถแปลงได้จากการนำน้ำหนักน้ำผลิตก๊าซหารด้วยความหนาแน่นของน้ำผลิตก๊าซโดยทางโรงงานกำหนดให้ค่าความหนาแน่นของน้ำผลิตก๊าซในทุกกรอบการผลิตมีค่าอยู่ในช่วง 1.0094-1.010 กรัม/มิลลิลิตร ผู้วิจัยจึงใช้ความหนาแน่นเฉลี่ยซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.0097 กรัม/มิลลิลิตรในการคำนวณหาปริมาตรน้ำผลิตก๊าซซึ่งแบบการทดลองและผลการทดลองแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แบบการทดลองและผลการทดลอง

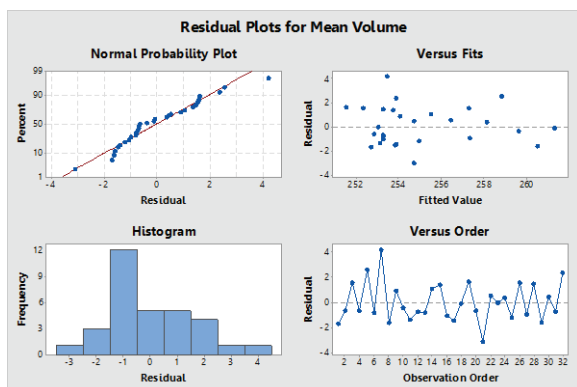
Std Order	Run Order	Factors					Mean Volume
		A	B	C	D	E	
1	25	-1	-1	-1	-1	1	253.73
2	5	1	-1	-1	-1	-1	261.39
3	27	-1	1	-1	-1	-1	256.35
4	22	1	1	-1	-1	1	256.97
5	8	-1	-1	1	-1	-1	258.86
6	19	1	-1	1	-1	1	253.13
7	24	-1	1	1	-1	1	258.48
8	17	1	1	1	-1	-1	252.42
9	26	-1	-1	-1	1	-1	253.89
10	14	1	-1	-1	1	1	256.58
11	9	-1	1	-1	1	1	254.93
12	29	1	1	-1	1	-1	252.26
13	18	-1	-1	1	1	1	261.22
14	23	1	-1	1	1	-1	252.95
15	10	-1	1	1	1	-1	259.23
16	30	1	1	1	1	1	255.17
17	3	-1	0	0	0	0	258.85
18	21	1	0	0	0	0	251.64
19	16	0	-1	0	0	0	252.21
20	28	0	1	0	0	0	254.73
21	1	0	0	-1	0	0	250.98
22	32	0	0	1	0	0	256.24
23	15	0	0	0	-1	0	255.09
24	2	0	0	0	1	0	252.17
25	7	0	0	0	0	-1	257.65
26	11	0	0	0	0	1	251.72
27	4	0	0	0	0	0	252.59
28	6	0	0	0	0	0	252.48
29	13	0	0	0	0	0	252.47
30	20	0	0	0	0	0	252.58
31	12	0	0	0	0	0	252.56
32	31	0	0	0	0	0	252.52

4. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 ผู้วิจัยได้นำข้อมูลไปวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง โดยใช้โปรแกรมมินิแทป (Minitab) และเลือกใช้ Stepwise Regression แบบวิธีการลดตัวแปรอิสระ (Backward Elimination) ในการทดสอบที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลองเริ่มจากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองว่าผลการทดลองมีความเหมาะสมที่จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ในการทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยหรือไม่ โดยการกระจายตัวส่วนตกค้างของปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์แสดง ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การกระจายตัวส่วนตกค้างของปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์

จากรูปที่ 5 สรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องได้ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) จะสามารถดูได้จากกราฟ Normal Probability Plot ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) ที่จัดเรียงตัวอยู่ตามแนวเส้นตรง และมีค่า P-value ของการทดสอบการ

แจกแจงแบบปกติเท่ากับ 0.096 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ

2. การทดสอบสมมติฐานของค่าความแปรปรวนคงที่ (Variance Stability) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Fitted Value ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้างรอบแนวแกนศูนย์ และข้อมูลไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม หรือรูปแบบที่คล้ายกรวยปากเปิด จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีค่าความแปรปรวนคงที่

3. กราฟอิสรโตแกรมจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ซึ่งสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ

4. การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของข้อมูล (Independence of Residual) จะสามารถดูได้จากกราฟ Residual Versus Observation Order ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของส่วนตกค้างที่ไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้ม หรือรูปร่างที่แน่นอน จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง

ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมมินิแทปดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าเทอมที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 หรือเทอมของปัจจัยที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ประกอบด้วย A, A², AC, CD และ DE โดยสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องแสดงในสมการที่ 2 ซึ่งสมการนี้มีค่า R-Sq เท่ากับ 72.97 เปอร์เซ็นต์ และค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 63.56 เปอร์เซ็นต์

$$\begin{aligned} \text{Mean Volume} = & 253.29 - 1.28A + 0.59C - \\ & 0.45D - 0.17E + 2.72 A^2 - 2.03 AC + \\ & 1.03 CD + 1.02 DE \end{aligned} \quad (2)$$

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมมินิแทป

Term	Coef	SE. Coef	P- Value
Constant	253.285	0.479	0.000
A	-1.279	0.422	0.005
A ²	2.718	0.638	0.000
AC	-2.027	0.448	0.000
CD	1.029	0.448	0.030
DE	1.018	0.448	0.032

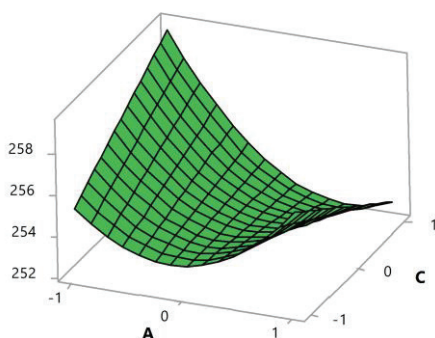
จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นจะเห็นว่าเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง ทำให้สามารถใช้กราฟพื้นผิวตอบตอบ (Surface Plot) ในการอธิบายความสัมพันธ์ของเทอมปัจจัย AC, CD และ DE ได้ ส่วนเทอมปัจจัย A และ A² เนื่องจากการอธิบายปัจจัย A ในเทอมของผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย A และ C แล้ว ฉะนั้นจึงไม่จำเป็นต้องอธิบายผลกระทบหลักของ A

4.3 ผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัย

เทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยระหว่าง A และ C จะใช้กราฟพื้นผิวตอบดังรูปที่ 6 ในการอธิบายความสัมพันธ์พบว่า เมื่อระดับวาล์วไต่อากาศและไต่แก๊ส CO₂ (C) อยู่ในระดับต่ำ เมื่อความยาวท่อระบาย (A) เปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปปานกลาง จะส่งผลกระทบให้ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องลดลง เนื่องจากเมื่อระดับวาล์วไต่อากาศและไต่แก๊ส CO₂ อยู่ในระดับต่ำ จะมีช่องว่างให้ปริมาณแก๊ส CO₂ และน้ำผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปแบบฟองออกจากกระป๋องมาก ซึ่งความยาวท่อระบายอยู่ในระดับต่ำจะทำให้มีระยะเวลาในการเติมน้ำผลิตภัณฑ์ลงสู่กระป๋องมากกว่าเมื่อความยาวท่อระบายอยู่ระดับปานกลาง จึงทำให้มีโอกาสน้ำปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์และปริมาณฟองภายในกระป๋องมีค่ามากกว่า ดังนั้นหลังจากผ่านขั้นตอนการไต่แก๊ส CO₂ ที่ระดับวาล์วไต่อากาศและไต่แก๊ส CO₂ อยู่ในระดับต่ำ ปริมาณฟองภายในกระป๋องที่ความยาวท่อระบายระดับปานกลางจะมีปริมาณน้อยกว่าที่ความยาวท่อระบายระดับต่ำ เมื่อเวลาผ่านไปฟองเหล่านั้นจะกลายเป็นน้ำผลิตภัณฑ์ทำให้เมื่อ

ระดับวาล์วไต่อากาศและไต่แก๊ส CO₂ อยู่ในระดับต่ำ และมีความยาวท่อระบายที่ระดับต่ำจะส่งผลกระทบต่อให้ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องสูงกว่าที่ความยาวท่อระบายระดับปานกลาง และที่ระดับวาล์วไต่อากาศและไต่แก๊ส CO₂ อยู่ในระดับต่ำ เมื่อความยาวท่อระบายเปลี่ยนแปลงจากระดับปานกลางไปสูง จะส่งผลกระทบให้ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องเพิ่มขึ้น เนื่องจากความยาวท่อระบายอยู่ระดับสูง จะทำให้มีระยะเวลาในการเติมน้ำผลิตภัณฑ์ลงสู่กระป๋องน้อยกว่าเมื่อความยาวท่อระบายอยู่ระดับปานกลาง จึงทำให้มีปริมาณฟองภายในกระป๋องน้อย ดังนั้นหลังจากผ่านขั้นตอนการไต่แก๊ส CO₂ ที่ระดับวาล์วไต่อากาศและไต่แก๊ส CO₂ อยู่ในระดับต่ำ ที่ความยาวท่อระบายอยู่ระดับสูง จึงสูญเสียปริมาณฟองภายในกระป๋องน้อยมาก จึงทำให้ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง เมื่อระดับวาล์วไต่อากาศและไต่แก๊ส CO₂ อยู่ในระดับต่ำ ที่ความยาวท่อระบายระดับสูงจึงมีค่ามากกว่าที่ความยาวท่อระบายระดับปานกลาง แต่ในทางกลับกันเมื่อระดับวาล์วไต่อากาศและไต่แก๊ส CO₂ อยู่ระดับสูง เมื่อความยาวท่อระบายเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปปานกลางจะส่งผลกระทบต่อให้ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากเมื่อระดับวาล์วไต่อากาศและไต่แก๊ส CO₂ อยู่ระดับสูง จะมีช่องว่างให้ปริมาณแก๊ส CO₂ และน้ำผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปแบบฟองออกจากกระป๋องน้อยมาก ซึ่งความยาวท่อระบายอยู่ระดับต่ำจะทำให้มีระยะเวลาในการเติมน้ำผลิตภัณฑ์ลงสู่กระป๋องมากกว่าเมื่อความยาวท่อระบายอยู่ระดับปานกลาง จึงทำให้เมื่อความยาวท่อระบายอยู่ระดับต่ำ มีโอกาสน้ำปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์และปริมาณฟองภายในกระป๋องมากกว่า ดังนั้นหลังจากผ่านขั้นตอนการไต่แก๊ส CO₂ ที่ระดับวาล์วไต่อากาศและไต่แก๊ส CO₂ อยู่ระดับสูง ปริมาณฟองภายในกระป๋องที่ความยาวท่อระบายระดับต่ำจะมีปริมาณมาก เพราะมีปริมาณฟองเพียงเล็กน้อยที่ออกจากกระป๋อง และเมื่อเวลาผ่านไปฟองเหล่านั้นจะกลายเป็นน้ำผลิตภัณฑ์ทำให้เมื่อระดับวาล์วไต่อากาศ

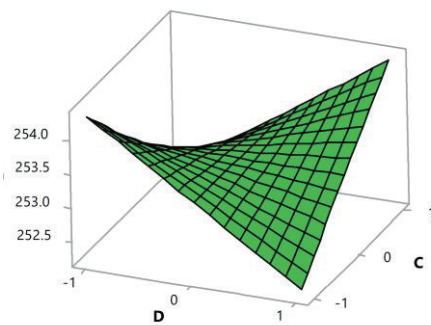
และไถ่แก๊ส CO_2 อยู่ในระดับสูง เมื่อความยาวท่อระบายระดับต่ำมีค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องสูงกว่าที่ความยาวท่อระบายระดับปานกลางอย่างชัดเจน และที่ระดับวาล์วไถ่อากาศและไถ่แก๊ส CO_2 อยู่ในระดับสูง เมื่อความยาวท่อระบายเปลี่ยนแปลงจากระดับปานกลางไปสูง จะส่งผลกระทบต่อให้ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากความยาวท่อระบายอยู่ที่ระดับสูงจะทำให้มีระยะเวลาในการเติมน้ำผลิตภัณฑ์ลงสู่กระป๋องน้อยกว่า จึงทำให้มีปริมาณฟองภายในกระป๋องน้อย ดังนั้นหลังจากผ่านขั้นตอนการไถ่แก๊ส CO_2 ที่ระดับวาล์วไถ่อากาศและไถ่แก๊ส CO_2 อยู่ในระดับสูง ที่ความยาวท่อระบายอยู่ที่ระดับปานกลางจึงสูญเสียปริมาณฟองภายในกระป๋องมากกว่าที่ความยาวท่อระบายอยู่ที่ระดับสูงเพียงเล็กน้อย เพราะระดับวาล์วไถ่อากาศและไถ่แก๊ส CO_2 อยู่ในระดับสูง จะมีช่องว่างให้ปริมาณแก๊ส CO_2 และน้ำผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปแบบฟองออกจากกระป๋องน้อยมาก ดังนั้นค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องเมื่อระดับวาล์วไถ่อากาศและไถ่แก๊ส CO_2 อยู่ในระดับสูง ที่ความยาวท่อระบายระดับสูงจึงมีค่ามากกว่าที่ความยาวท่อระบายระดับปานกลางเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 6 กราฟพื้นผิวผลตอบแสดงความสัมพันธ์ของ
เทอมปัจจัยระหว่าง A และ C ที่มีผลกระทบต่อ
ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง

เทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยระหว่าง
C และ D จะใช้กราฟพื้นผิวตอบดังรูปที่ 7 ในการอธิบาย
ความสัมพันธ์พบว่า เมื่อระดับวาล์วไถ่อากาศและไถ่แก๊ส

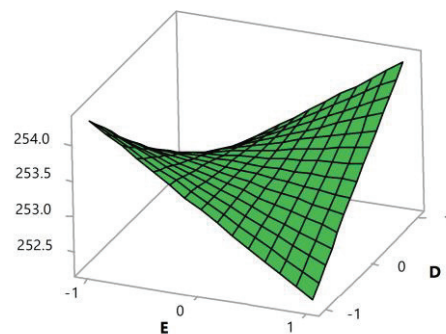
CO_2 (C) อยู่ในระดับต่ำ เมื่อความดันภายในถังเก็บ (D) เปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูง จะส่งผลกระทบต่อให้ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องลดลง เนื่องจากเมื่อวาล์วไถ่อากาศและไถ่แก๊ส CO_2 อยู่ในระดับต่ำ จะมีช่องว่างให้ปริมาณแก๊ส CO_2 ออกจากกระป๋องมาก ทำให้มีปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปแบบฟองออกไปจากกระป๋องจำนวนมาก ส่งผลให้ปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องจึงน้อย ซึ่งถ้าความดันภายในถังเก็บอยู่ที่ระดับที่สูงก็จะส่งผลให้เกิดปริมาณฟองในกระป๋องมากกว่าความดันภายในถังเก็บอยู่ที่ระดับที่ต่ำ เมื่อปริมาณฟองมากจึงทำให้ในขั้นตอนการไถ่แก๊ส CO_2 มีการสูญเสียปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปแบบฟองมาก จึงสรุปได้ว่า ที่ระดับวาล์วไถ่อากาศและไถ่แก๊ส CO_2 อยู่ในระดับต่ำ ความดันภายในถังเก็บอยู่ที่ระดับต่ำ จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องสูงกว่าความดันภายในถังเก็บที่ระดับสูง แต่เมื่อระดับวาล์วไถ่อากาศและไถ่แก๊ส CO_2 อยู่ในระดับสูง เมื่อความดันภายในถังเก็บเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูง จะส่งผลกระทบต่อให้ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อวาล์วไถ่อากาศและไถ่แก๊ส CO_2 อยู่ในระดับสูง จะมีช่องว่างให้ปริมาณแก๊ส CO_2 ออกจากกระป๋องน้อย ทำให้มีปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปแบบฟองออกไปจากกระป๋องจำนวนน้อย ส่งผลให้ปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องจึงมาก ซึ่งถ้าความดันภายในถังเก็บอยู่ที่ระดับที่สูง ก็จะส่งผลให้เกิดปริมาณฟองในกระป๋องมากกว่าความดันภายในถังเก็บอยู่ที่ระดับที่ต่ำ แต่น้ำผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปแบบฟองไม่ได้ออกจากกระป๋องในปริมาณที่มาก เพราะระดับวาล์วไถ่อากาศและไถ่แก๊ส CO_2 อยู่ในระดับสูง ทำให้เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งฟองจะเปลี่ยนเป็นน้ำผลิตภัณฑ์เป็นผลให้ที่ระดับวาล์วไถ่อากาศและไถ่แก๊ส CO_2 อยู่ในระดับสูง ความดันภายในถังเก็บอยู่ที่ระดับสูง จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องสูงกว่าความดันภายในถังเก็บที่ระดับต่ำ



รูปที่ 7 กราฟพื้นผิวผลตอบแทนแสดงความสัมพันธ์ของ
เทอมปัจจัยระหว่าง C และ D ที่มีผลกระทบต่อ
ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง

เทอมของผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยระหว่าง D และ E จะใช้กราฟพื้นผิวตอบดังรูปที่ 8 ในการอธิบายความสัมพันธ์พบว่า เมื่อระดับความดันภายในถังเก็บ (D) อยู่ในระดับต่ำ เมื่อระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บ (E) เปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูง จะส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องลดลง เนื่องจากที่ระดับความดันภายในถังเก็บอยู่ที่ระดับต่ำจะส่งผลกระทบต่อความเร็วในการบรรจุให้มีค่าต่ำ ทำให้ปริมาณการเกิดฟองน้อยเป็นผลให้ปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องมีค่ามาก ซึ่งระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บที่ระดับต่ำจะทำให้ความเร็วในการบรรจุต่ำกว่าระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บที่ระดับสูง ฉะนั้นระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บที่ระดับต่ำ จึงมีปริมาณฟองน้อยกว่าระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บที่ระดับสูง จึงสามารถสรุปได้ว่าที่ระดับความดันภายในถังเก็บอยู่ที่ระดับต่ำนั้น ระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บที่ระดับต่ำจะมีค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องมากกว่าระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บที่ระดับสูง ในทางกลับกัน เมื่อระดับความดันภายในถังเก็บอยู่ที่ระดับสูง เมื่อระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บเปลี่ยนแปลงจากระดับต่ำไปสูง จะส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อระดับความดันภายในถังเก็บอยู่ที่ระดับสูงจะส่งผลกระทบต่อความเร็วในการบรรจุให้มีค่าสูง ประกอบกับเมื่อระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บมีค่าสูงด้วยจึงทำให้มี

ความเร็วในการบรรจุมาก เมื่อความเร็วในการบรรจุมากก็ทำให้ในขณะบรรจุน้ำผลิตภัณฑ์ลงสู่กระป๋อง ฟองที่เกิดจากการบรรจุด้วยความเร็วมากจะเคลื่อนที่ไปอยู่บริเวณขอบรอบ ๆ กระป๋อง เป็นผลให้สิ่งที่สัมผัสสลายของท่อระบาย คือ น้ำผลิตภัณฑ์ ปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องจึงมีค่ามาก แต่เมื่อระดับความดันภายในถังเก็บอยู่ที่ระดับสูงแต่ระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บมีค่าต่ำ จะทำให้ความเร็วในการบรรจุไม่มากพอที่จะเป็นผลให้ฟองที่เกิดจากการบรรจุด้วยความเร็วเคลื่อนที่ไปอยู่บริเวณขอบรอบ ๆ กระป๋อง ดังนั้นฟองที่เกิดขึ้นจึงลอยอยู่บนน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง ทำให้สิ่งที่สัมผัสสลายของท่อระบาย คือ ฟอง ปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องจึงมีค่าน้อย จึงสามารถสรุปได้ว่าที่ระดับความดันภายในถังเก็บอยู่ที่ระดับสูงนั้นระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บที่ระดับสูงจะมีค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องมากกว่าระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บที่ระดับต่ำ



รูปที่ 8 กราฟพื้นผิวผลตอบแทนแสดงความสัมพันธ์ของ
เทอมปัจจัยระหว่าง D และ E ที่มีผลกระทบต่อ
ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง

5. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบหลักของปัจจัยและผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง เนื่องจากปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่อมูลค่าความสูญเสียในกระบวนการบรรจุ โดยปัจจัยที่นำมาศึกษา

พิจารณาจากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวข้องกับสาเหตุที่ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่บรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ไม่ตรงตามค่าเป้าหมาย และพิจารณาจากการระดมความคิดของผู้วิจัยและผู้เชี่ยวชาญในกระบวนการบรรจุ ทำให้ปัจจัยที่ทำการทดลองมี 5 ปัจจัย ได้แก่ ความยาวของท่อระบาย ระดับของวาล์วปิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ระดับของวาล์วที่ไล่อากาศและไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าความดันภายในถังเก็บ และค่าระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บ จากผลการศึกษาผลกระทบหลักของปัจจัยและผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องพบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบหลักต่อปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องคือ ความยาวท่อระบาย (A) ส่วนปัจจัยที่มีผลกระทบร่วมระหว่างสองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋อง ได้แก่ ความยาวของท่อระบายกับระดับของวาล์วที่ไล่อากาศและไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

(AC) ระดับของวาล์วที่ไล่อากาศและไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับค่าความดันภายในถังเก็บ (CD) และค่าความดันภายในถังเก็บกับค่าระดับน้ำผลิตภัณฑ์ภายในถังเก็บ (DE) และเนื่องจากงานวิจัยนี้ศึกษาเพียงว่าปัจจัยใดมีผลต่อปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องทางผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอแนะให้ในอนาคตมีการศึกษาหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ปริมาณน้ำผลิตภัณฑ์ภายในกระป๋องตรงตามค่าเป้าหมาย เพื่อเป็นการลดของเสียในกระบวนการบรรจุของโรงงานผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่มีส่วนผสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทางโรงงานกรณีศึกษา ผู้จัดการโรงงาน และพนักงานทุกคนที่ให้ข้อมูล และให้ทำการทดลองในกระบวนการบรรจุ รวมทั้งให้ความร่วมมือในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yam, K.L. The Wiley encyclopedia of packaging technology. John Wiley & Sons, New York, 2010.
- [2] Dewa, M., Naicker, A. and Singh, R. Root Cause Analysis for Reduction of Waste on Bottle Filling and Crowning Operations. SAIIE25 Proceedings, 9th – 11th July 2013, Stellenbosch, South Africa, 2013: 568-1-568-11.
- [3] Baía, A.P. Achieving Customer Specifications Through Process Improvement Using Six Sigma: Case Study of Nutrisoil – Portugal. Quality Management Journal, 2015; 22(2): 48-60.
- [4] Desai, D., Kotadiya, P., Makwana, N. and Patel, S. Curbing Variations in Packaging Process Through Six Sigma Way in a Large-Scale Food-Processing Industry. Springer, 2014; 11: 119-129.
- [5] วสิน พันธ์เมฆากุล. การลดความผันแปรของน้ำหนักรับบรรจุผลิตภัณฑ์ขวด ของเครื่องบรรจุ Filpac โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2552.
- [6] หทัยชนก พรหมสร. การลดปริมาณของเสียในกระบวนการบรรจุเครื่องดื่มยัดผสมแบบกระป๋อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.
- [7] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. สำนักพิมพ์ท็อป: กรุงเทพมหานคร, 2551.
- [8] ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร, 2545.
- [9] Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiments. Edit 8th, John Wiley & Sons, New York, 2009.



ผลกระทบของเครื่องมือตรวจวัดต่อการตรวจวัดการถ่ายแรงของ เสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้การรับแรงในแนวแกน

Effects of Instrumentation Devices on Load Transfer Measurement of Deep Cement Mixing Piles under Axial Loading

ธนัญญ์ โยนจอหอ พรเกษม จงประดิษฐ์* และ ศิริวรรณ ไวยจิตา
TananatYonjoho, Pornkasem Jongpradist* and Siriwan Waichita
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's University of Technology Thonburi,
Bangmod, Thung Khru, Bangkok 10140, Thailand
*E-mail: pornkasem.jon@kmutt.ac.th, Telephone Number: 0-2470-9305

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาผลกระทบของอุปกรณ์ตรวจวัดต่อการตรวจวัดการถ่ายแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้การรับแรงในแนวแกนในชั้นดินกรณีศึกษา โดยใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อประเมินอิทธิพลของความถี่และขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัด การศึกษานี้พิจารณาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบ strain gauge ที่ติดตั้งบนแท่งทรงกระบอกตันแล้วฝังที่แกนกลางเสาเข็มดินซีเมนต์ในขณะก่อสร้าง จากการศึกษาพบว่าความถี่และขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ฝังจะส่งผลกระทบต่อผลการตรวจวัดการถ่ายแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ถึงแม้ไม่กระทบต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่หัวเข็มและการทรุดตัวอย่างเด่นชัด เมื่ออัตราส่วนระหว่างความถี่ของอุปกรณ์ตรวจวัดต่อเสาเข็มดินซีเมนต์และขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัดยิ่งมากจะส่งผลกระทบต่อผลการตรวจวัดการถ่ายแรงในเสาเข็มดินซีเมนต์มากขึ้น ผลการศึกษาเสนอแนะสำหรับการเลือกวัสดุและขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่สัมพันธ์กับเสาเข็มดินซีเมนต์ เพื่อจำกัดค่าความคลาดเคลื่อนของผลการตรวจวัดอย่างเหมาะสม

ABSTRACT

This study aimed at investigating the effects of installed instrumentation devices on load transfer measurement in deep cement mixing (DCM) piles under axial loading by series of numerical analyses. The configuration of the installed devices focused in this study is cylindrical bar on which the strain gauges are attached, before embedding into DCM piles during construction. The numerical study showed that, the stiffness and size of the instrument device have strong effect on the load transfer of DCM pile. Although insignificant effect on the load-settlement curves can be seen. The greater of stiffness ratio and area between the device and DCM pile are, the larger error of load transfer calculation is seen. The findings of this study are used to establish a guideline for the selection of an appropriate device material and its dimension in order to control the allowable measurement error.

1. บทนำ

ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา เทคนิคการทำเสาเข็มดินซีเมนต์หรือ Deep Cement Mixing (DCM) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในด้านการปรับปรุงฐานรากของถนน สะพาน เขื่อนขนาดเล็ก โครงสร้างกำแพงกันดิน และในพื้นที่ดินอ่อน ปัจจุบันเทคนิค DCM เริ่มมีการนำไปใช้ในการรองรับอาคารบ้านเรือนขนาดเล็ก จึงทำให้ความเข้าใจในพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ขณะรับแรงและกลไกการถ่ายแรงมีความจำเป็นยิ่งขึ้น

ประเด็นที่พบในการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้เงื่อนไขสภาพการรับแรงในแนวแกนในปัจจุบันคือยังอาศัยองค์ความรู้การตรวจวัดการถ่ายแรงในเสาเข็มคอนกรีตมาใช้ที่เป็นการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (strain gauges) กับเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) จากนั้นนำค่าความเครียดที่อ่านได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งความลึกต่าง ๆ ไปแปลผลเป็นแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็ม โดยคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดและค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (elastic modulus) ของเสาเข็ม คอนกรีตการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายแรงในเสาเข็มดินซีเมนต์ได้มีความพยายามในการนำ strain gauges ไปติดกับวัสดุต่างๆ เช่น เหล็ก [1], Polyvinyl chloride (PVC) plastic pipe [2], Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) plastic pipe [4] และยาง [5] ที่มีขนาด

ต่าง ๆ กัน แล้วฝังที่แกนกลางเสาเข็มดินซีเมนต์ในขณะที่ก่อสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) เพื่อทำการตรวจวัดค่าความเครียดในแต่ละความลึกจากนั้นแปลผลเป็นแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์ตามองค์ความรู้จากวิธีของเสาเข็มคอนกรีตโดยนำค่าความเครียดที่อ่านได้ในแต่ละความลึกคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดและค่าความแกร่งของเสาเข็มดินซีเมนต์ อย่างไรก็ตามค่าความแกร่งระหว่างเสาเข็มคอนกรีตกับเหล็กเสริมจะมีความต่างกันประมาณ 10 เท่า ในขณะที่เสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าความแกร่งต่ำกว่าเสาเข็มคอนกรีตมากจึงเป็นที่น่าสงสัยเกี่ยวกับการแปลผลจากความเครียดที่อ่านได้ในเสาเข็มดินซีเมนต์ตามแนวคิดของเสาเข็มคอนกรีตว่าจะยังคงความน่าเชื่อถือมากน้อยเพียงใด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความแกร่งและขนาดของตัวติดตั้ง strain gauge รูปทรงกระบอกตัน [4] ต่อการตรวจวัดการถ่ายแรงในเสาเข็มดินซีเมนต์ภายใต้การรับแรงในแนวแกนโดยวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) เพื่อได้ข้อจำกัดของวิธีตรวจวัดแบบนี้และได้ข้อแนะนำสำหรับช่วงความแกร่งของวัสดุและขนาดที่เหมาะสม

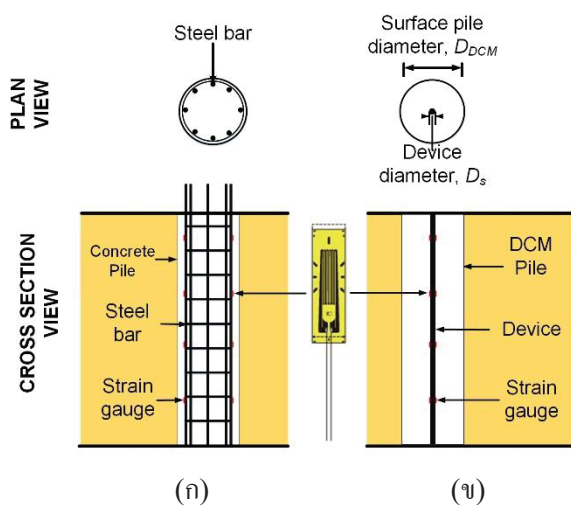
2. วิธีการศึกษา

2.1 พฤติกรรมถ่ายแรงในเสาเข็มดินซีเมนต์

ที่ผ่านมาสมมติฐานหลักที่ใช้คือ อุปกรณ์ที่ฝังกับเนื้อเสาเข็มดินซีเมนต์จะเสียรูปไปด้วยกัน (compatible) จึงถือว่าค่าความเครียดที่อ่านได้เป็นตัวแทนของเสาเข็มดินซีเมนต์ จากนั้นนำค่าความเครียดที่อ่านได้มาแปลผลเป็นแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์ในแต่ละความลึกได้โดยการคำนวณตามสมการที่ 1

$$P_i = A_p \times E_p \times \varepsilon_i \quad (1)$$

เมื่อ P_i หมายถึง แรงตามแนวแกนที่ระดับความลึกต่าง ๆ (กิโลนิวตัน), A_p หมายถึง พื้นที่หน้าตัดเสาเข็ม (ตารางเมตร), E_p หมายถึง ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นของเสาเข็ม (กิโลนิวตันต่อตารางเมตร) และ ε_i หมายถึง

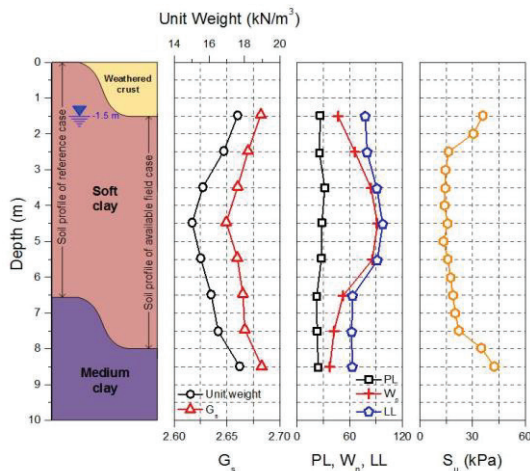


รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการถ่ายแรงสำหรับ
(ก) เสาเข็มคอนกรีต (ข) เสาเข็มดินซีเมนต์ [3]

ค่าความเครียดที่อ่านได้จาก strain gauges ที่ระดับความลึกต่าง ๆ

2.2 กรณีศึกษา

งานนี้เลือกกรณีศึกษาการทดสอบน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) จังหวัด ปทุมธานี [6] เป็นกรณีต้นแบบ ลักษณะของชั้นดินของกรณีศึกษาแสดงดังรูปที่ 2 และมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ -1.5 เมตร



รูปที่ 2 สภาพชั้นดินของกรณีศึกษาที่ใช้ในการวิเคราะห์ [7]

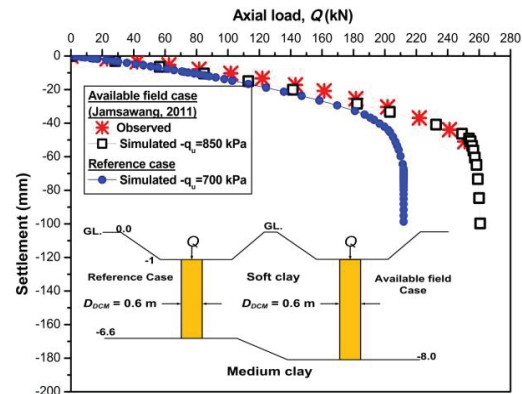
3. การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

การศึกษานี้ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม PLAXIS 2D วิเคราะห์แบบสมมาตรแนวแกน (2D-Axisymmetric) ภายใต้เงื่อนไขการรับแรงในแนวแกน ที่ทำการแปรเปลี่ยนค่าคุณสมบัติและขนาดของวัสดุที่ใช้ติด strain gauges

3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 1 แสดงพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ได้จากค่าคุณสมบัติของวัสดุจริง [8-9] และใช้ในการศึกษานี้ พารามิเตอร์ดินสำหรับการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ 2 โดยได้ผ่านการทดสอบเทียบกับผลทดสอบดินบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียโดยงานวิจัยก่อนหน้านี้ [7] เพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษานี้ ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขกรณีต้นแบบถูก

นำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัดในสนามดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า ผลจากการวิเคราะห์มีความสอดคล้องกับข้อมูลการตรวจวัดวิธีการวิเคราะห์และชุดพารามิเตอร์ที่ใช้จึงมีความเหมาะสมสำหรับการใช้ในการศึกษา [6]



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบผลการตรวจวัดในสนามกับผลจากวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข [8-9]

Material	Model	E' (MPa)	ν'	γ (kN/m ³)
Rubber	LE	100	0.48	8.81
PE Plastic Pipe (1)	LE	350	0.40	9.32
PE Plastic Pipe (2)	LE	700	0.40	9.32
ABS Plastic Pipe (1)	LE	1,400	0.34	10.79
ABS Plastic Pipe (2)	LE	2,180	0.34	10.79
PVC Plastic Pipe	LE	4,100	0.40	13.73
Steel	LE	197,000	0.3	78.5

หมายเหตุ: LE=Linear Elastic, PE=Polyethylene

3.2 แบบจำลองและเงื่อนไขขอบเขต

แบบจำลองการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4 ประกอบด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เมตร ยาว 5.6 เมตร (ลดความยาวลงจากตัวต้นแบบเพื่อให้เหมาะสมกับแบบจำลองย่อส่วนที่กำลังดำเนินการ-ไม่ได้แสดงผลการศึกษาในบทความนี้) มีแผ่นเหล็ก (steel plate)

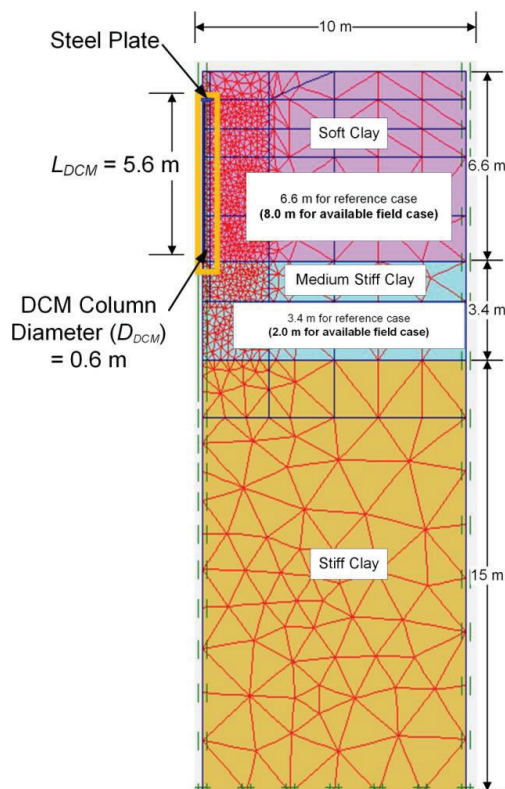
บริเวณด้านบนของเสาเข็มเพื่อกระจายแรงกระทำให้สม่ำเสมอทั้งหน้าตัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ และภายในเสาเข็มดินซีเมนต์จะมีการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4, 8, 12 และ 16 เซนติเมตรยาว 5.6 เมตรในแต่ละกรณีของการวิเคราะห์จะพิจารณาค่าตรวจวัดที่ความลึกต่าง ๆ โดยกำหนดชั้นดิน

ให้มีความกว้าง 10 เมตร ลึก 25 เมตรตามทิศทางแกน x และ y เงื่อนไขขอบที่ใช้ด้านล่างสุดของแบบจำลองได้ทำการจำกัดไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง เงื่อนไขขอบสำหรับด้านข้างของแบบจำลองจะทำการจำกัดไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ด้านข้างตามทิศทางของแกน x โดยทำการวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำ

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข [7]

Material	Model	E_{50}^{ref}, E' (MPa)	E_{oed}^{ref} (MPa)	E_{ur}^{ref} (MPa)	ν', ν_{ur}	m	K_o^{NC}	γ (kN/m ³)	C' (kPa)	ϕ' (deg)	R_f	OCR	p^{ref} (kPa)
Weathered Crust	MC	5	-	-	0.25	1	0.600	17	8	22	-	-	-
Soft Clay	HS	5	5	15	0.20	1	0.625	15	6	22	0.9	1.1	100
Medium Clay	HS	20	20	100	0.20	1	0.625	15	10	22	0.9	2.0	65
Stiff Clay	HS	60	60	180	0.20	1	0.625	18	18	22	0.9	2.5	95
DCM ($q_u=700$ kPa)	MC	70	-	-	0.33	-	0.577	15	328	25	-	-	-

หมายเหตุ: HS=Hardening Soil, MC=Mohr-Coulomb



รูปที่ 4 โครงตาข่ายและเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

4. ผลการศึกษา

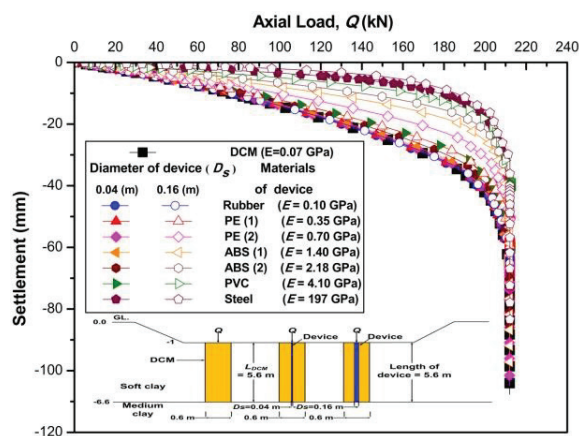
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์

รูปที่ 5 แสดงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่ให้กับการทรุดตัวที่หัวเสาเข็มดินซีเมนต์กรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและกรณีมีอุปกรณ์ที่ค่าความแกร่งต่าง ๆ จากสัญลักษณ์ที่บแสดงกรณีขนาดอุปกรณ์ที่เล็กที่สุดในการศึกษา (4 เซนติเมตร) ในขณะที่สัญลักษณ์โป่งแสดงผลของกรณีที่มีอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในการศึกษา (16 เซนติเมตร)

สำหรับกรณีอุปกรณ์ขนาดเล็ก ในรูปที่ 5 พบว่า เส้นโค้งกรณีต่าง ๆ มีความคล้ายกันยกเว้นกรณีอุปกรณ์ติดตั้งเป็นเหล็ก (ค่าความแกร่งมากที่สุดในการศึกษา) เมื่อพิจารณาอย่างละเอียดจะเห็นได้ว่าที่น้ำหนักบรรทุกเดียวกันการทรุดตัวของกรณีที่มีอุปกรณ์ติดตั้งแกร่งกว่ามีค่าน้อยกว่า อย่างไรก็ตามค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มทุกกรณีที่คำนวณตามวิธีของ De Beer [10] นั้นมีค่าประมาณ 200 กิโลนิวตัน แสดงว่าความแกร่งและ

ขนาดของอุปกรณ์ติดตั้งไม่ส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มดินซีเมนต์ นอกจากนี้ ไม่ส่งผลการทรุดตัวในภาพรวมเช่นเดียวกัน หากค่าความแกร่งและขนาดของอุปกรณ์ติดตั้งไม่สูงมากเกินไป

เมื่อพิจารณากรณีขนาดอุปกรณ์ใหญ่ที่น้ำหนักบรรทุกเดียวกันค่าการทรุดตัวน้อยลงตามลำดับเมื่อความแกร่งของอุปกรณ์มีค่ามากขึ้น แสดงให้เห็นว่าขนาดอุปกรณ์ส่งผลค่อนข้างมากต่อพฤติกรรมทรุดตัว อย่างไรก็ตามเช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้านี้ หากใช้วิธีคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกตามวิธีของ De Beer ค่าที่ได้ไม่ต่างกัน ทั้งนี้หากใช้วิธีการอื่นค่าแต่ละกรณีที่มีความแกร่งต่างกันอาจให้ค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกต่างกัน

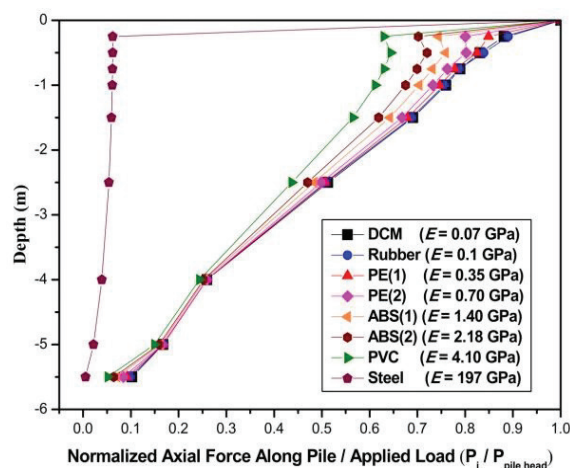


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์กรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและกรณีมีอุปกรณ์ที่ค่าความแกร่งต่าง ๆ

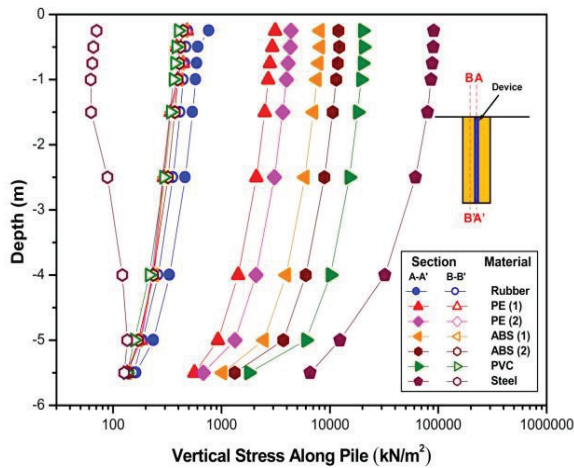
4.2 พฤติกรรมถ่ายแรงตามความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์

รูปที่ 6 แสดงการถ่ายแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์กรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและกรณีมีอุปกรณ์ที่ค่าความแกร่งต่าง ๆ พบว่า หากมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีค่าความแกร่งสูงกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ส่งผลให้ค่าแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์ตามความลึกด้วยการคำนวณดังสมการที่ 1 นั้นมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด และมีค่าน้อยเมื่อค่าความแกร่งเพิ่มมากขึ้น จากการตรวจสอบพบว่าเป็นผลจากการที่ความเค้นใน

แนวตั้งที่ส่งถ่ายมาที่อุปกรณ์ตรวจวัดมากกว่าส่วนที่ส่งถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยหน้าตัด A-A' และ B-B' แสดงการกระจายค่าความเค้นในแนวตั้งตามความลึกบริเวณอุปกรณ์ตรวจวัดและเสาเข็มดินซีเมนต์ตามลำดับ ทำให้สามารถอธิบายกลไกการถ่ายแรงได้ว่า เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ที่แกร่งกว่าลงไปเสาเข็มดินซีเมนต์ในขณะที่รับแรงร่วมกัน อุปกรณ์ที่แกร่งกว่าจะรับแรงด้วยอัตราส่วนต่อพื้นที่ที่มากกว่า ดังนั้นแรงที่เนื้อเสาเข็มดินซีเมนต์รับจึงน้อยกว่า ทำให้ค่าความเครียด (ทั้งที่เกิดในอุปกรณ์และเนื้อดินซีเมนต์ซึ่งมีค่าเท่ากันตามหลัก strain compatibility) ลดลง ส่งผลให้การทรุดตัวของเข็มลดลง อย่างไรก็ตามแรงผลลัพธ์ (ในอุปกรณ์และเนื้อดินซีเมนต์) ที่แต่ละความลึกยังคงไม่ต่างไปจากเดิม เพราะในภาพรวมยังคงเป็นกลไกการถ่ายแรงสู่ดินรอบข้าง จากสิ่งที่ค้นพบข้างต้นบ่งเป็นนัยว่าอัตราส่วนแรงที่รับโดยอุปกรณ์ส่งผลต่อการตรวจวัดการถ่ายแรงโดยตรง ดังนั้นนอกจากความแกร่งของอุปกรณ์ติดตั้ง (สัมพันธ์กับเสาเข็ม) แล้วขนาดหน้าตัด (สัมพันธ์กับหน้าตัดเสาเข็ม) จะมีบทบาทที่สำคัญเช่นเดียวกัน



รูปที่ 6 การถ่ายแรงตามความลึกในเสาเข็มดินซีเมนต์กรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและกรณีมีอุปกรณ์ที่ค่าความแกร่งต่าง ๆ เมื่อให้แรงที่หัวเข็มเท่ากับน้ำหนักบรรทุกออกแบบ



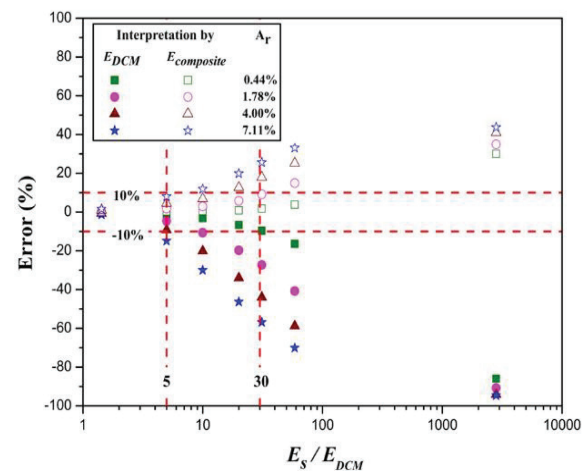
รูปที่ 7 การกระจายความเค้นในแนวดิ่งตามความลึกของเสาเข็มดินซีเมนต์เมื่อให้น้ำหนักบรรทุกทุกออกแบบ

4.3 ผลกระทบจากขนาดและความแกร่งของอุปกรณ์ต่อความคลาดเคลื่อนการตรวจวัดการถ่ายแรง

จากผลการค้นพบในส่วนก่อนหน้านี้ เพื่อที่จะพิจารณาอิทธิพลของทั้งอัตราส่วนความแกร่ง และขนาดหน้าตัดของอุปกรณ์ตรวจวัดสัมพันธ์กับเสาเข็มดินซีเมนต์ร่วมกัน ส่วนนี้วิเคราะห์เชิงตัวแปร (parametric study) ด้วยการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนต่าง ๆ เนื่องจากกรณีวิเคราะห์มีจำนวนมาก และเพื่อการนำไปสู่ข้อแนะนำในทางปฏิบัติ จึงนำผลการวิเคราะห์มาคำนวณในรูปแบบของค่าความผิดพลาดในการวัดแรงโดยเทียบกับกรณีอ้างอิงที่ไม่มีอุปกรณ์ตรวจวัด รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดของการแปลผลจากการตรวจวัดการถ่ายแรงในเสาเข็มดินซีเมนต์กับอัตราส่วนความแกร่งของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ 40 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์เนื่องจากแรงที่ความลึกต่าง ๆ ไม่เท่ากัน การคำนวณค่าความผิดพลาดในการศึกษานี้จึงใช้พื้นที่ได้กราฟการกระจายแรงตามความลึกและหารกลับด้วยความยาวของเสาเข็มเป็นตัวแทนแรงในแต่ละกรณีศึกษา ซึ่งค่าความผิดพลาดคำนวณตามสมการที่ 2 ทั้งนี้ทุกกรณีมีความยาวเสาเข็มเท่ากัน

$$Error = \left(\frac{F_{DCM} - F_s}{F_{DCM}} \right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ Error หมายถึง ค่าความผิดพลาด (เปอร์เซ็นต์), F_{DCM} หมายถึง ตัวแทนแรงตามความลึกของกรณีที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (กิโคโนวตัน) และ F_s หมายถึง ตัวแทนแรงตามความลึกของกรณีมีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (กิโคโนวตัน)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดของแปลผลการตรวจวัดการถ่ายแรงกับอัตราส่วนความแกร่งของอุปกรณ์ตรวจวัดต่อเสาเข็มดินซีเมนต์

จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์ตรวจวัดต่อเสาเข็มดินซีเมนต์ (A_r) มีค่ามาก จะส่งผลให้การแปลผลความเครียดเป็นแรงที่ถ่ายลงสู่เสาเข็มดินซีเมนต์ตามความลึกดังสมการที่ 1 มีค่าความผิดพลาดในการตรวจวัดมีค่าสูงขึ้น สำหรับกรณีที่อัตราส่วนความแกร่งของอุปกรณ์ตรวจวัดต่อเสาเข็มดินซีเมนต์น้อย ปัจจัยด้านขนาดของอุปกรณ์จะมีผลกระทบต่อการตรวจวัดน้อย ในทางตรงกันข้ามผลกระทบจากขนาดของอุปกรณ์จะสูงขึ้นหากอัตราส่วนความแกร่งมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้หากหน้าตัดอุปกรณ์เล็กพอ (0.44%) สามารถควบคุมค่าผิดพลาดไม่ให้เกิน 10% ได้ด้วยใช้วัสดุที่ค่าอัตราส่วนความแกร่งไม่เกิน 30 เท่า หากพิจารณาหน้าตัดเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยหน้าตัดผสม (composite section) โดยใช้วิธีการแปรผลการตรวจวัดตามสมการที่ 1 แต่มีการปรับเปลี่ยนการคำนวณจากค่า E_{DCM} เป็น $E_{composite}$ โดยคำนวณได้จากสมการที่ 3

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีหน้าตัดผสมแสดงด้วยสัญลักษณ์โป่งในรูปที่ 8 พบว่า ค่าความผิดพลาดของการแปลผลการตรวจวัดการถ่ายแรงมีค่าที่ลดลง แต่ความผิดพลาดเป็นการแปลผลได้แรงที่มากขึ้น หากควบคุมค่าผิดพลาดไม่ให้เกิน 10% สามารถใช้วัสดุอะไรก็ได้ในการศึกษานี้ (ยกเว้นเหล็ก) เมื่อใช้วัสดุติดตั้งขนาดเล็กพอ (0.44%) หรือสามารถใช้ขนาดที่ใหญ่ขึ้นได้ (1.78%) กับวัสดุที่ค่าอัตราส่วนความแข็งแรงไม่เกิน 30 เท่า แสดงให้เห็นว่าสามารถปรับลดความคลาดเคลื่อนได้จากการใช้ค่าความแข็งแรงของหน้าตัดผสม อย่างไรก็ตาม วิธีนี้จะสามารถแก้ไขความคลาดเคลื่อนจากการแปรผลการถ่ายแรงได้เท่านั้น แต่ไม่ครอบคลุมถึงเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับค่าการทรุดตัว

$$E_{composite} = \left[\frac{(E_{DCM} \times A_{DCM}) + (E_s \times A_s)}{A_{DCM} + A_s} \right] \quad (3)$$

เมื่อ $E_{composite}$ หมายถึง ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของวัสดุหน้าตัดผสม (กิโลนิวตันต่อตารางเมตร), E_{DCM} หมายถึง ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของเสาเข็มดินซีเมนต์ (กิโลนิวตันต่อตารางเมตร), E_s หมายถึง มอดุลัสยืดหยุ่นของอุปกรณ์ตรวจวัด (กิโลนิวตันต่อตารางเมตร), A_{DCM} หมายถึง พื้นที่หน้าตัดในส่วนของเสาเข็มดินซีเมนต์ (ตารางเมตร) และ A_s หมายถึง พื้นที่หน้าตัดในส่วนของอุปกรณ์ตรวจวัด (ตารางเมตร)

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาผลกระทบของความแข็งแรงและขนาดอุปกรณ์ตรวจวัดต่อการตรวจวัดการถ่ายแรงในเสาเข็มดินซีเมนต์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ความแข็งแรงและขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัดจะส่งผลกระทบต่อเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่ให้กับค่าการทรุดตัว โดยเมื่ออัตราส่วนความแข็งแรงและพื้นที่หน้าตัดระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดกับเสาเข็ม

ดินซีเมนต์มีค่ามากขึ้น จะทำให้เสาเข็มเกิดการทรุดตัวที่น้อยลง แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็มกับวิธีการหาค่าที่อ้างอิงกับความชันส่วนสุดท้ายของเส้นโค้ง

2) ค่าความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุปกรณ์ตรวจวัดที่มีขนาดหน้าตัดใหญ่ต่อเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยเฉพาะเมื่ออัตราส่วนความแข็งแรงต่างกันมาก

3) จากผลการศึกษาที่ได้สามารถนำมาพัฒนาเป็นข้อแนะนำสำหรับการเลือกวัสดุและขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่เหมาะสมเพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการตรวจวัดมีค่าต่ำกว่า 10% สามารถทำได้ดังนี้

- สำหรับการแปลผลตามแนวคิดของเสาเข็มคอนกรีตควรเลือกขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีอัตราส่วนพื้นที่ต่ำกว่า 4.0% สำหรับกรณีที่อุปกรณ์ตรวจวัดมีค่าความแข็งแรงมากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่เกิน 5 เท่า แต่ในกรณีที่อัตราส่วนค่าความแข็งแรงของอุปกรณ์ตรวจวัดต่อเสาเข็มดินซีเมนต์อยู่ระหว่าง 5 ถึง 30 เท่า ควรเลือกขนาดอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีอัตราส่วนพื้นที่ต่ำกว่า 0.44%

- สำหรับการแปลผลตามแนวคิดของของหน้าตัดผสมสำหรับกรณีที่อุปกรณ์ตรวจวัดมีค่าความแข็งแรงมากกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่เกิน 5 เท่า ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านขนาด แต่ในกรณีที่ค่าความแข็งแรงของอุปกรณ์ตรวจวัดสูงกว่าเสาเข็มดินซีเมนต์อยู่ระหว่าง 5 ถึง 30 เท่า ควรเลือกขนาดอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีอัตราส่วนพื้นที่ต่ำกว่า 1.78% อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ยังเป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเท่านั้นควรมีการทดสอบโดยติดตั้ง strain gauges กับวัสดุที่มีขนาดและความแข็งแรงที่ต่างกันเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อยืนยันผลการศึกษานี้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์ เลขที่ทุน CE-KMUTT-6212

เอกสารอ้างอิง

- [1] Isenhower, W. M., Arrellaga, J.A., Wang, S.T. and Johnson, J. O. Experience with Geojet Piles in Sandy Clays. Soil Improvement for Big Digs, Geotechnical Special Publication 1998; 81, pp. 72-82.
- [2] Kataoka, K., Goto., T., Ogino, T., Shimizu, K. and Nakano, K. Bearing Capacity of a Soil-Cement Column in Soft Ground. Central Research Laboratory, Osaka Cement Co., Ltd., Osaka, Japan, 1992; 149-166.
- [3] Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd, (2018). Strain Gages. [Online] available: <http://www.kyowa-ei.com/>
- [4] Duan, J. and Oweis, I. Load Transfer of Cement-Soil Column by Full Scale Load Test in Soft Clay. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Apr 13-17, 2004, New York, USA, 8(33).
- [5] Piromyaporn, S. Field Behavior of Soil Cement Column Under Axial Loading. Master of Engineering Thesis, Geotechnical Engineering Program, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2009.
- [6] Jamsawang, P., Bergado, D.T. and Voottipruex, P. Field Behavior of Stiffened Deep Cement Mixing Columns. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 2011; 164(1): 33-49.
- [7] Phutthananon, C., Jongpradist, J., Yensri, P. and Jamsawang, P. Dependence of Ultimate Bearing Capacity and Failure Behavior of T-Shaped Deep Cement Mixing Piles on Enlarged Cap Shape and Pile Strength. *Computers and Geotechnics*, 2018; 97: 27-41.
- [8] Material Properties of PVC. The European Council of Vinyl Manufacturers, Belgium, 2012, [Online] available: <http://www.pvc.org/en/>
- [9] Material Properties. Engineering Tool Box, 2009, [Online] available: <https://www.engineeringtoolbox.com/>
- [10] De Beer, E.E. and Walays, M. Franki Piles with Over Expanded Bases. La Technique des Travaux, Belgium, 1986; 333, pp. 48.



การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการปรับระดับ ประตูน้ำของเหมืองฝาย กรณีศึกษา อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย

Development of a Decision Support System for Weir Sluice Gate Level Adjustment Case Study: Mae Chan, Chiang Rai

เบญญา สุนทรานนท์^{1,2} สมรวี อารัมกุล⁴ ภาสกร แหม่ประเสริฐ^{*,3} ชุโชค อายุพงษ์^{2,3} และ มานพ แก้วโมราเจริญ²

Benya Suntaranont^{1,2}, Somrawee Aramkul⁴, Paskorn Champrasert^{*,3},
Chochoke Ayupong^{2,3} and Manop Kaewmoracharoen²

¹บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ถ.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ถ.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

³ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการภัยพิบัติทางธรรมชาติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ถ.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

⁴ภาควิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ถ.โชตนา อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50300

¹Graduate School, Chiang Mai University, Suthep, Mueang Chiang Mai District, Chiang Mai 50200

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,

Chiang Mai University, Suthep, Mueang Chiang Mai District, Chiang Mai 50200

³CENDIM: Center of Excellence in Natural Disaster Management, Faculty of Engineering,
Chiang Mai University, Suthep, Mueang Chiang Mai District, Chiang Mai 50200

⁴Department of Computing, Faculty of Science and Technology,

Chiang Mai Rajabhat University, Chotana, Mueang Chiang Mai District, Chiang Mai 50300

*E-mail: paskorn@eng.cmu.ac.th, Telephone Number: 053-942074

บทคัดย่อ

ในเขตพื้นที่ทางภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยมีการบริหารจัดการน้ำด้วยองค์กรเหมืองฝาย โดยมี แก่ฝาย ซึ่งได้รับเลือกจากกลุ่มผู้ใช้น้ำเป็นผู้ควบคุมฝาย แก่ฝายเป็นผู้ดูแลระดับการเปิดหรือปิดประตูน้ำเพื่อจัดสรรน้ำเข้าสู่พื้นที่ การเกษตร แก่ฝายปรับระดับประตูน้ำเหมืองฝายตามการคาดการณ์ระดับน้ำและกฎเกณฑ์ดั้งเดิมของแก่ฝาย แต่ด้วยการที่ สภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ลักษณะทางน้ำต่างจากที่ผ่านมาอย่างชัดเจน ประสิทธิภาพของแก่ฝายอาจจะ ไม่เพียงพอในการปรับระดับประตูน้ำเหมืองฝายอย่างถูกต้อง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการพัฒนาระบบสนับสนุนการ ตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย โดยมีพื้นที่ศึกษาที่อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย งานวิจัยนี้เริ่มจากการ สสำรวจระบบเหมืองฝาย เพื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำในแม่น้ำที่จะใช้ในการบริหารจัดการน้ำในปัจจุบัน จากนั้นจึงได้พัฒนา ระบบสนับสนุนการตัดสินใจการบริหารจัดการน้ำโดยการมีส่วนร่วมกับชุมชน ระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่นำเสนอนี้ ประกอบด้วย 1) สถานีโทรมาตรวัดระดับน้ำ 2) แบบจำลองทางชลศาสตร์เพื่อคำนวณปริมาณน้ำที่ออกจากเหมืองฝาย และ 3) เว็บไซต์สำหรับการแสดงผลระดับประตูน้ำที่เหมาะสม หลังจากการติดตั้งระบบสนับสนุนการตัดสินใจ พบว่า ระบบ ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้จริง ข้อมูลสถานการณ์น้ำถูกแสดงผลได้อย่างถูกต้อง และระดับประตูน้ำที่ระบบ แนะนำสามารถลดความคลาดเคลื่อนของปริมาณน้ำในการบริหารจัดการน้ำเพื่อการเกษตรได้

Received 6 September 2017

Revised 31 May 2018

Accepted 21 June 2018

ABSTRACT

Weirs and canals are applied in water resource management system in the upper northern area of Thailand. GAE PHAI is a weir controller who is elected from local villagers. GAE PHAI estimates the water level and adjusts the weir sluice gate levels for providing the water to agriculture areas. The levels of sluice gates are adjusted from the estimated water level and traditional rules by GAE PHAI. However, with the climate changes, the hydrological characteristics are lucidly changed. GAE PHAI's experiences may not be enough to adjust the sluice gate levels correctly. Thus, this research proposed to develop a decision support system for weir sluice gate level adjustment. The study area is Mae Chan, Chiang Rai. This research started with surveying of weir and canals system to analyze the volume of river water of the present method of water resource management. Then, with the community cooperation, the decision support system of water resource management is developed. The proposed decision support system consists of 1) water level monitoring stations, 2) a flow through weirs model, and 3) a website to show the suggested sluice gate level results. After the deployment of the decision support system in the study area, the results show that the proposed system is practically used, the water level data is reported accurately, and the sluice gate levels suggested from the system can reduce the water volume error for farming irrigation.

1. บทนำ

การบริหารจัดการน้ำในรูปแบบองค์กรเหมืองฝาย เป็นภูมิปัญญาท้องถิ่นที่ใช้ในเขตภาคเหนือที่มีมาตั้งแต่ สมัยพ่อขุนมั่งราย มีการบันทึกเรื่องเหมืองฝายเป็นครั้งแรก บนศิลาจารึกสมัยสุโขทัยหลัก ลพ.2 ของพระญาสุวาทิ สิทธิ [1] ในสมัยการปกครองของพ่อขุนมั่งรายได้มีการ กล่าวถึงความสำคัญของการบริหารจัดการน้ำในรูปแบบ เหมืองฝาย เพื่อนำเอาน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติเข้ามาใช้ในการ ทำการเกษตร และป้องกันการเกิดน้ำท่วมเมืองใน ฤดูน้ำหลากบ่อยครั้ง [2] โดยพ่อขุนมั่งรายทรงตรา กฎหมายมั่งรายศาสตร์ขึ้นสำหรับการปกครองเหมืองฝาย อย่างมีระเบียบวินัยและมีประสิทธิภาพเพื่อป้องกัน ความขัดแย้ง [3] มั่งรายศาสตร์นี้ถูกใช้มาอย่างต่อเนื่อง ในรูปของ “กฎเหมืองฝาย” ที่กลุ่มผู้ใช้น้ำถือปฏิบัติมา จนถึงปัจจุบันในรูปแบบองค์กรเหมืองฝายโดยใช้ตัวแทน จากผู้ใช้น้ำเป็นผู้จัดสรรบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ตนเอง รับผิดชอบโดยการปรับระดับประตูน้ำเหมืองฝาย [4]

ระบบการบริหารจัดการน้ำในรูปแบบเหมืองฝายถูก นำมาใช้ เนื่องจากภูมิประเทศภาคเหนือตอนบนของ ประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นภูเขาซึ่งเป็นแหล่งต้นน้ำลำธารที่ สำคัญ ด้วยความลาดชันของพื้นที่ ส่งผลให้น้ำในแม่น้ำ ลำธารส่วนใหญ่จึงไหลเชี่ยว ก่อให้เกิดความเสียหายทั้งใน ฤดูน้ำหลากและส่งผลให้เกิดน้ำแล้งเนื่องจากน้ำไหลลงสู่

พื้นที่ต่ำอย่างรวดเร็ว [5] ในการจัดการน้ำในรูปแบบ เหมืองฝายจะมี ฝาย หรือแนวกันแม่น้ำใหญ่ ทำหน้าที่ ยกระดับน้ำให้สูงขึ้นเพื่อผันน้ำเข้าสู่ลำเหมืองแทนที่จะ ไหลไปตามลำน้ำหลัก สำหรับใช้ในการเกษตรและอุปโภค บริโภคของชุมชน [6] บริเวณตัวฝายจะมีประตูกั้นน้ำเพื่อ เปิดน้ำลงสู่ลำน้ำหลักในเวลาที่ไม่ได้จ่ายน้ำเข้าสู่ลำเหมือง และปิดประตูกั้นน้ำเมื่อต้องการยกระดับน้ำเพื่อผันน้ำเข้าสู่ ลำเหมือง และในส่วนของลำเหมือง บางแห่งจะมีประตู กั้นน้ำเพื่อกั้นไม่ให้น้ำเข้าพื้นที่ในช่วงที่ไม่ต้องการน้ำ โดย ลำเหมืองจะส่งน้ำไปยังพื้นที่รับน้ำด้านท้ายเหมืองซึ่งมี ระดับต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 1

องค์กรเหมืองฝายเป็นองค์กรทางสังคมประกอบด้วย ผู้บริหารการใช้น้ำและผู้ใช้น้ำที่มีโครงสร้างเป็นระเบียบ แบบแผน [3] โดยจะมีสัญญาประชาคมร่วมกันของผู้ใช้น้ำ ว่าจะต้องมีการจัดการดูแลและซ่อมแซมเหมืองฝาย ร่วมกันทุก ๆ ปี และมีบทลงโทษสำหรับผู้ฝ่าฝืนกฎระเบียบ ของเหมืองฝาย โครงสร้างการบริหารองค์กรเหมืองฝาย ประกอบด้วย 1) แก่ฝาย ทำหน้าที่เป็นประธานในการเจรจา ต่อบริหารจัดการน้ำ และมีอำนาจในการตัดสินใจ เปิดปิดประตูฝายและประตูเหมือง ตลอดจนดูแลและ บำรุงรักษาฝาย 2) แก่เหมือง ทำหน้าที่ดูแลเหมืองที่ รับผิดชอบ 3) ล่ามฝาย ทำหน้าที่ประสานงานกับผู้ใช้งาน และเก็บรวบรวมรายชื่อผู้ใช้น้ำ โดยทั้งหมดจะทำงาน

ร่วมกันเพื่อจัดสรรน้ำให้ชุมชนมีน้ำใช้อย่างทั่วถึงและยุติธรรม [2]



รูปที่ 1 ภาพถ่ายทางอากาศของฝายโป่งน้ำร้อน แม่น้ำจัน

แต่เนื่องด้วยสภาพภูมิอากาศและสภาพภูมิประเทศที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ไหลในแม่น้ำมีรูปแบบการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ดังนั้นข้อมูลปริมาณน้ำในอดีตที่เคยใช้เป็นแนวทางการบริหารจัดการน้ำจึงไม่สามารถนำมาใช้ในการบริหารจัดการปริมาณน้ำที่ไหลในปัจจุบันได้อย่างถูกต้อง [7] นอกจากนี้การตัดสินใจเปิดปิดประตูน้ำในอดีตอาศัยประสบการณ์ของแก่ฝายโดยไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณน้ำและความต้องการใช้น้ำที่ชัดเจน ส่งผลให้เกิดการขัดแย้งในการจัดสรรปันน้ำ โดยในฤดูแล้งจะมีการกักเก็บน้ำไว้ในฝายด้านบน (ด้านต้นน้ำ) มากเกินไปจนน้ำเหลือน้อยไม่เพียงพอต่อการกสิกรรมในพื้นที่การเกษตรของเหมืองฝายด้านล่าง (ด้านท้ายน้ำ) แต่ในฤดูน้ำหลากเหมืองฝายด้านบนจะปล่อยน้ำจากฝายมากเกินไปจนทำให้เกิดน้ำท่วมในพื้นที่ด้านล่าง [8]

งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาการบริหารจัดการน้ำอย่างเป็นระบบและเน้นการมีส่วนร่วมของชุมชน จึงได้ออกแบบและพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย ซึ่งประกอบด้วย 1) สถานีโทรมาตรวัดระดับน้ำเพื่อวัดระดับน้ำและคำนวณปริมาณน้ำที่เข้าสู่ฝาย 2) แบบจำลองทางชลศาสตร์เพื่อคำนวณปริมาณน้ำที่ออกจากเหมืองฝาย และ 3) เว็บไซต์แสดงข้อมูลสถานการณ์น้ำปัจจุบันและ

เสนอแนะระดับประตูน้ำที่เหมาะสม เพื่อให้กลุ่มผู้ใช้น้ำได้รับข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในการบริหารจัดการน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบการจัดการเหมืองฝายของกลุ่มน้ำแม่จันได้ถูกศึกษาปัญหาการจัดการน้ำ อภิญา จันทรอินทร์ [8] พบว่าในระบบการจัดการเหมืองฝายของกลุ่มน้ำแม่จัน มีความขัดแย้งขององค์กรเหมืองฝายในช่วงฤดูแล้ง ฝายด้านท้ายน้ำมีความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรเป็นปริมาณมากแต่น้ำไม่เพียงพอเนื่องจากฝายกั้นหน้าดึงน้ำไปใช้ โดยกลุ่มผู้ใช้น้ำไม่มีข้อมูลปริมาณน้ำที่เป็นปัจจุบัน รวมไปถึงไม่มีกฎ ระเบียบ ข้อตกลงที่ชัดเจน คณะวิจัยจึงได้มีการลงพื้นที่สำรวจปัญหาด้านการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่กลุ่มน้ำแม่จันโดยการสัมภาษณ์กลุ่มผู้ใช้น้ำเพื่อศึกษาความต้องการทางด้านข้อมูลและเทคโนโลยีเพื่อช่วยในการบริหารจัดการน้ำ และบรรเทาปัญหาความขัดแย้งขององค์กรเหมืองฝายด้านการบริหารจัดการน้ำ

นอกจากนี้ การบริหารจัดการน้ำได้ถูกศึกษาในรูปแบบต่าง ๆ เช่นการบริหารจัดการน้ำในอ่างเก็บน้ำเพื่อใช้ในการอุปโภคบริโภค โดยมีการศึกษาในส่วนของ การหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) [9], การทำนายปริมาณน้ำ (Prediction) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการบริหารจัดการน้ำ และระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการบริหารจัดการน้ำ [11, 12] และการจำลองการไหลของน้ำที่ผ่านเหมืองฝาย [13] ดังมีรายละเอียดดังนี้

Baltar, A. M., และ Fontane, D. G. [9] ได้ศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อการบริหารจัดการน้ำด้วยพาดิเคิลสวอร์ม เปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) พบว่าเมื่อประยุกต์ใช้กับปัญหาการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ วิธีพาดิเคิลสวอร์มให้ผลที่ดีกว่าวิธีเชิงพันธุกรรม การศึกษาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการบริหารจัดการน้ำชลประทานของ Noory, H. และคณะ [10] การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีพาดิเคิลสวอร์มแบบต่อเนื่อง (Continuous

Particle Swarm Optimization; CPSO) ซึ่งได้ถูกประยุกต์ใช้กับการวางแผนใช้น้ำเพื่อปลูกพืชหลายชนิดในพื้นที่รับน้ำ โดยเปรียบเทียบกับวิธีโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming; LP) และวิธีพาทิเคิลสวอร์มแบบดิสครีต (Discrete Particle Swarm Optimization; DPSO) พบว่าวิธีพาทิเคิลสวอร์มแบบดิสครีต สามารถหาค่าที่เหมาะสมได้รวดเร็วและแม่นยำกว่าวิธีโปรแกรมเชิงเส้น และวิธีพาทิเคิลสวอร์มแบบต่อเนื่อง

การบริหารจัดการน้ำยังมีการศึกษาในรูปแบบของการทำนายปริมาณน้ำ ซึ่งสามารถนำมาใช้ประกอบการตัดสินใจและประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองการไหลของน้ำในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้การบริหารจัดการน้ำมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ระเบียบวิธี จาติเกตุ และชอุโชค อายุพงศ์ [11] ได้ศึกษาการพยากรณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในหัวข้อการพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าฝายแม่แดงโดยเปรียบเทียบวิธีการซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนและโครงข่ายประสาทเทียมหลายชั้น พบว่าซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดในการทำนายปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจในการบริหารจัดการน้ำ

การพยากรณ์ระดับน้ำด้านท้ายน้ำจากข้อมูลระดับน้ำด้านต้นน้ำของแม่น้ำแม่จัน ได้ถูกศึกษาโดย Pornnapa Panyadee และคณะ [12] พบว่าการทำนายระดับน้ำในแม่น้ำด้วยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมและพาทิเคิลสวอร์มสามารถนำมาใช้ช่วยในการแจ้งเตือนการเกิดน้ำท่วมฉับพลันได้

การบริหารจัดการน้ำในรูปแบบเหมืองฝาย ได้ถูกจำลองการไหลของน้ำด้วยแบบจำลอง (LIAT Model) โดยการศึกษาของ Somrawee Aramkul และคณะ [13] โดยจำลองลักษณะการเรียงตัวของฝายที่มีความต่อเนื่องกันบนแม่น้ำด้วยลักษณะทางกายภาพของฝายที่แตกต่างกัน แบบจำลองสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามการเรียงตัวของเหมืองฝายในแม่น้ำแต่ละสาย จากการศึกษา

พบว่า แบบจำลองสามารถจำลองการไหลของน้ำผ่านเหมืองฝายได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

อย่างไรก็ดี ในงานวิจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมา [9, 10, 11, 12, 13] ยังไม่ได้มีการเสนอแนะระดับการเปิดประตูน้ำของเหมืองฝายที่เหมาะสมต่อความต้องการน้ำในพื้นที่และยังไม่ได้บูรณาการภูมิปัญญาท้องถิ่นจากองค์กรเหมืองฝายและยังขาดความร่วมมือร่วมของชุมชน ในการวิจัยนี้จึงได้นำเสนอระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการบริหารจัดการน้ำสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝายให้เหมาะสมกับความต้องการน้ำในการทำการเกษตรในพื้นที่ โดยเน้นการมีส่วนร่วมของชุมชน องค์กรเหมืองฝาย แก่เหมืองและแก่ฝาย โดยมีพื้นที่ศึกษาคืออำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย

3. พื้นที่กรณีศึกษา

แม่น้ำแม่จันเป็นแม่น้ำสายหลักในเขตอำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 1,692 เมตร เป็นแม่น้ำสายใหญ่ ไหลแรง แม่น้ำแม่จันไหลผ่านตำบลป่าตึง 19 หมู่บ้าน, ตำบลแม่จัน 6 หมู่บ้าน, ตำบลสันทราย 8 หมู่บ้าน, ตำบลจอมสวรรค์ 10 หมู่บ้าน, ตำบลจันจว้า 6 หมู่บ้าน, ตำบลจันจว้าใต้ 6 หมู่บ้าน, และตำบลป่าสัก ในเขตอำเภอเชียงแสนอีก 10 หมู่บ้าน รวมความยาวของลำน้ำทั้งหมด 77 กิโลเมตร มีพื้นที่รับน้ำประมาณ 1,197 ตารางกิโลเมตร และเป็นพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาของกลุ่มน้ำโขง [14]

ด้วยลักษณะภูมิประเทศของอำเภอแม่จันเป็นที่ราบลุ่มระหว่างหุบเขา โดยมีแม่น้ำจันซึ่งเป็นแม่น้ำสายหลักไหลเข้าสู่ตัวเทศบาลตำบลแม่จันทางทิศตะวันตก ไหลขึ้นทิศเหนือจนมาเทศบาลฝั่งทิศตะวันตก (รูปที่ 2) และไหลออกจากเทศบาลไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือลงสู่แม่น้ำโขง จากสภาพภูมิประเทศดังกล่าว ทำให้น้ำในแม่น้ำแม่จันไหลเร็วและแรง เป็นเหตุให้อำเภอแม่จันประสบปัญหาน้ำท่วมฉับพลันในฤดูน้ำหลาก และในฤดูแล้งมีอัตราการไหลน้อยไม่เพียงพอต่อการเพาะปลูกส่งผลให้เกิดปัญหาระกบแล้ง [16] จึงมีการสร้างฝายทดน้ำเพื่อบรรเทาปัญหาดังกล่าวตลอดแนวทางน้ำ โดยมีฝายกั้นลำน้ำจัน 16 ฝาย

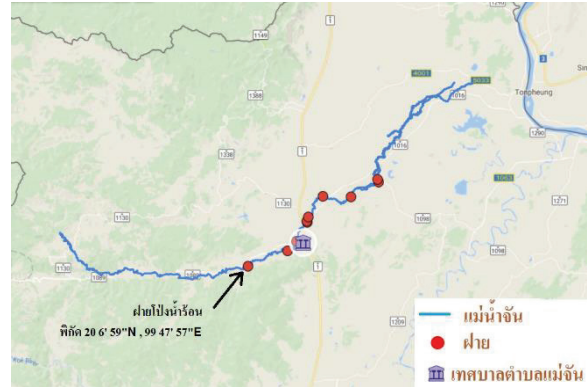
[8] ฝ่ายทั้งหมดเรียงตัวตามความยาวแม่น้ำจันซึ่งเป็นแม่น้ำหลักและมีบางฝ่ายเรียงตัวตามความยาวลำน้ำย่อยของแม่น้ำจัน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกบริเวณต้นน้ำของลำน้ำแม่จันเป็นพื้นที่ศึกษาซึ่งมีฝ่ายที่อยู่ในพื้นที่ต้นน้ำ จำนวน 7 ฝ่าย

การบริหารจัดการน้ำในองค์กรเหมืองฝายในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่จัน มีการจัดการดูแลโดยองค์กรเหมืองฝาย มีการผันน้ำเข้าพื้นที่ย่อยด้วยลำเหมืองใหญ่ โดยมี “แด” กั้นลำเหมืองใหญ่เพื่อแบ่งน้ำเข้าสู่ไร่นาตามลำเหมืองเล็ก มีคันกั้นลำเหมืองเล็กเป็นคันน้ำล้นเรียกว่า “ปุม” เพื่อให้ น้ำไหลเข้าช่องคันนาแปลงต่อแปลง โดยช่องคันนานี้เรียกว่า “ต้าง” [15] ซึ่งกลุ่มผู้ใช้น้ำจะใช้เป็นหน่วยนับเพื่อเก็บเงินจากเจ้าของต้างแต่ละต้างเพื่อนำมาใช้ในการดูแลและบำรุงรักษาเหมืองฝาย โดยปกติการเปิดประตูกั้นน้ำเข้าพื้นที่ย่อยแต่ละพื้นที่ที่ใช้น้ำจากลำเหมืองกรณีศึกษานี้จะเปิดประตูรับน้ำทิ้งไว้เป็นระยะเวลานาน และจะปรับค่าระดับประตูน้ำเมื่อมีความต้องการเปลี่ยนแปลงการไหลหรือต้องการกั้นน้ำไม่ให้ น้ำไหลเข้าพื้นที่ในบางช่วงเวลาตามการประชุมของแก้มืองและแก้มฝ่าย



(ก) อำเภอแม่จัน เชียงราย

รูปที่ 2 แม่น้ำแม่จัน อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย



(ข) ตำแหน่งของฝายกั้นน้ำ และเครื่องมือวัดระดับน้ำ

บนแม่น้ำจัน จังหวัดเชียงราย

รูปที่ 2 (ต่อ) แม่น้ำแม่จัน อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย

รูปที่ 2 (ข) แสดงพื้นที่ศึกษาซึ่งประกอบด้วยฝ่ายทั้งหมด 7 ฝ่ายในพื้นที่ต้นน้ำ ในการทดสอบแบบจำลองทางชลศาสตร์เพื่อคำนวณปริมาณน้ำที่ออกจากเหมืองฝายได้เลือก ฝ่ายโป่งน้ำร้อน ซึ่งเป็นฝ่ายแรกสุดด้านต้นน้ำเพื่อวิเคราะห์ผลการประมาณค่าระดับประตูน้ำของระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้น

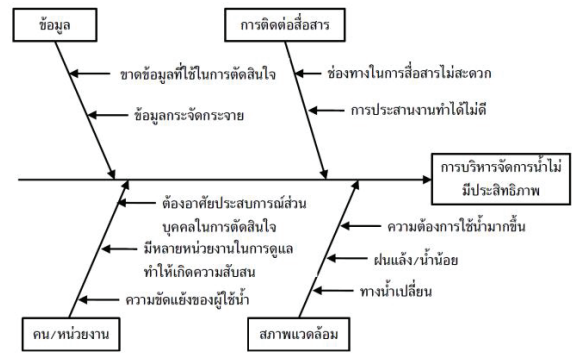
4. การออกแบบและพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย

การออกแบบและพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝายนี้เน้นที่การมีส่วนร่วมของชุมชน ในการทำงานจึงสามารถแบ่งกระบวนการทำงานได้เป็น 3 ขั้นตอน ขั้นตอนที่หนึ่งคือ การวิเคราะห์ความต้องการระบบเพื่อการออกแบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่ตรงตามความต้องการของกลุ่มผู้ใช้น้ำ ขั้นตอนที่สอง คือ การออกแบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจโดยใช้การประยุกต์พื้นฐานการคำนวณทางชลศาสตร์ เพื่อสร้างแบบจำลองทางชลศาสตร์เพื่อคำนวณปริมาณน้ำที่ออกจากเหมืองฝาย และคำนวณหา ระดับของการปรับระดับประตูน้ำที่เหมาะสมในการจัดสรรน้ำไปยังพื้นที่การเกษตร เพื่อให้แบบจำลองทางชลศาสตร์มีความถูกต้องและสอดคล้องกับสภาพพื้นที่ จึงได้มีการใช้ข้อมูลจากสถานีโทรมาตรวัดระดับน้ำ เพื่อได้

ข้อมูลปริมาณน้ำที่เข้าไปยังเหมืองฝาย และขั้นตอนสุดท้าย คือ การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ โดยเน้นการพัฒนาระบบแสดงผลให้เหมาะสมกับกลุ่มผู้ใช้งานและ เข้ากันได้กับอุปกรณ์สื่อสารของผู้ใช้งานระบบ

4.1 การวิเคราะห์ความต้องการระบบ

ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบเพื่อการได้มาซึ่งความต้องการของระบบ ได้มีการดำเนินการจัดประชุมเพื่อ รับฟังความคิดเห็น (Focus Group) ของผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง กับการใช้งานระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับ ระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย ผู้เข้าร่วมประชุม ได้แก่ ตัวแทนจากหน่วยงานราชการและองค์กรปกครองส่วน ท้องถิ่น แก่เหมืองและแก่ฝายผู้ดูแลจัดการน้ำองค์กรเหมือง ฝายลุ่มน้ำแม่จัน และตัวแทนเกษตรกรผู้ใช้น้ำ จากการ ประชุมดังกล่าวได้ข้อสรุปว่า ทุกภาคส่วนต้องการให้มีการ แก้ปัญหาเกี่ยวกับการบริหารจัดการน้ำ โดยมุ่งประเด็น ไปที่การบริหารจัดการน้ำเพื่อการเกษตรในลุ่มน้ำแม่จัน ทางคณะผู้วิจัยจึงได้เจาะลึกไปที่กลุ่มแก่เหมืองและแก่ฝาย ซึ่งเป็นผู้ดูแลจัดการ โดยการจัดทำแบบประเมินความ ต้องการในการสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับ ประตูน้ำของเหมืองฝายร่วมกับการสัมภาษณ์กลุ่มเพื่อ รวบรวมปัญหาและทราบถึงความต้องการของผู้ใช้ โดย ปัญหาที่พบในการบริหารจัดการน้ำ สามารถแบ่งได้เป็น ประเด็นต่าง ๆ ได้แก่ 1) ด้านข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจ ขาดข้อมูลสนับสนุนที่ใช้ในการตัดสินใจ และข้อมูล ที่มีอยู่อย่างกระจัดกระจายทำให้ไม่สามารถใช้ประโยชน์ จากข้อมูลที่มีอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ 2) ด้านการ ติดต่อสื่อสาร ขาดการประสานงานและการติดต่อสื่อสาร ที่ดี ทั้งช่องทางในการติดต่อสื่อสารมีน้อยและไม่สะดวก 3) ด้านบุคคล ต้องอาศัยประสบการณ์ส่วนบุคคลในการ บริหารจัดการ มีหลายหน่วยงานที่ต้องติดต่อทำให้เกิด ความสับสน นอกจากนั้นยังมีปัญหาความขัดแย้งระหว่าง ผู้ใช้น้ำด้วยกันเอง และ 4) ด้านสภาพแวดล้อมทั้งสภาพ ภูมิอากาศและภูมิประเทศ ตลอดจนความต้องการในการ ใช้น้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังแสดงในแผนผัง สาเหตุและผล หรือแผนผังก้างปลา ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนผังสาเหตุ (แผนผังก้างปลา) แสดงปัญหาในการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่จัน

จากการวิเคราะห์ปัญหาและสาเหตุ จึงได้แนวทาง ในการจัดทำระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับ ปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย และมีการจัดทำ แบบสอบถามความต้องการระบบเพื่อทราบความต้องการ ของผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง จากผลการประเมินแบบสอบถาม ความต้องการระบบ สามารถสรุปเป็นความต้องการของ ระบบในด้านต่าง ๆ ดังนี้ 1) ความต้องการด้านข้อมูล ระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำ ของเหมืองฝายจะต้องให้ข้อมูลที่ชัดเจน ถูกต้อง แม่นยำ มีการปรับปรุงข้อมูลให้ทันสมัยอยู่เสมอ และสามารถ เข้าถึงข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว 2) ความต้องการด้านการ ออกแบบ ระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับ ประตูน้ำของเหมืองฝายจะต้องมีการจัดรูปแบบที่ผู้ใช้ สามารถใช้งานได้ง่ายเนื่องจากผู้ใช้งานหลักส่วนใหญ่เป็น ผู้สูงอายุ นอกจากนั้นระบบจะต้องมีความยืดหยุ่นสามารถ เลือกดูข้อมูลได้จากหลายช่องทาง เช่น สามารถดูข้อมูลได้ ทั้งจากคอมพิวเตอร์และสมาร์ตโฟน หรือสามารถ ได้รับข้อมูลสำคัญทั้งจากทางข้อความสั้นผ่านทาง โทรศัพท์มือถือ จากวิทยุชุมชน หรือจากทางเครือข่าย สังคมออนไลน์ เป็นต้น 3) ความต้องการด้านการนำไปใช้ ประโยชน์ ระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับ ประตูน้ำของเหมืองฝาย จะต้องสามารถแสดงข้อมูลที่ ตรงกับความต้องการของผู้ใช้งาน และเป็นประโยชน์ต่อ

การบริหารจัดการน้ำ ทั้งยังสามารถเป็นแหล่งข้อมูลให้ผู้ที่สนใจนำไปประยุกต์ใช้งานอื่น ๆ ได้

จากการสัมภาษณ์เชิงลึกเพื่อจัดลำดับความสำคัญถึงความต้องการของชุมชนและกลุ่มผู้ใช้น้ำต่อระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่จะพัฒนาขึ้น พบว่ามีความต้องการข้อมูลปริมาณน้ำที่เป็นปัจจุบันและสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ง่าย เพื่อรองรับการบริหารจัดการน้ำในภาวะวิกฤตทั้งการขาดแคลนน้ำใช้ด้านการเกษตรในช่วงน้ำแล้งและการเกิดน้ำท่วมในช่วงน้ำหลาก และระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่จะพัฒนาขึ้นควรเน้นการเสนอแนะทางเลือกในการเปิดและปิดประตูน้ำเพื่อให้จัดสรรน้ำเพียงพอต่อความต้องการในการเพาะปลูก เพื่อให้สามารถจัดสรรน้ำให้พื้นที่การเกษตรแต่ละส่วนได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

4.2 การออกแบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจ

จากความต้องการดังกล่าวเมื่อนำมาพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการบริหารจัดการน้ำ จึงสามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วนคือ

1) สถานีโทรมาตรวัดระดับน้ำ เพื่อวัดระดับน้ำและคำนวณปริมาณน้ำที่เข้าสู่ฝาย สถานีโทรมาตรวัดระดับน้ำได้ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นติดตั้งในพื้นที่ต้นน้ำแม่จัน ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) จุดที่ติดตั้งเป็นจุดผู้นำชุมชนใช้เป็นจุดสังเกตระดับน้ำเพื่อเฝ้าระวังน้ำหลาก ลักษณะสถานีเป็นสถานีขนาดเล็กวัดระดับน้ำโดยใช้อัลตราโซนิกเซนเซอร์ สถานีถูกติดตั้งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการพัฒนาระบบสารสนเทศในการเฝ้าระวังและติดตามสถานการณ์น้ำ จังหวัดเชียงราย (เว็บไซต์ www.crfflood.com) [14] โดยมีสถานีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ 4 สถานี มีการจัดทำความสัมพันธ์ของระดับน้ำและอัตราการไหล จึงสามารถใช้ข้อมูลที่ได้จากสถานีสำหรับการคำนวณในแบบจำลองทางชลศาสตร์เพื่อคำนวณปริมาณน้ำที่ออกจากเมืองฝาย และนำข้อมูลสถานการณ์น้ำจากสถานีและข้อมูลระดับการเปิดประตูน้ำของเมืองฝายแสดงผลยังระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่พัฒนาขึ้น

2) แบบจำลองทางชลศาสตร์เพื่อคำนวณปริมาณน้ำที่ออกจากเมืองฝายและคำนวณหาระดับการเปิดประตูน้ำของเมืองฝายที่เหมาะสมเพียงพอต่อความต้องการน้ำในภาคการเกษตร ดังมีรายละเอียดดังนี้

สำหรับการคำนวณปริมาณน้ำที่ออกจากเมืองฝาย ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้สมการคำนวณอัตราการไหล [17] (สมการที่ (1)) สมการการไหลต่อเนื่อง [18] และ [19] (สมการที่ (2)) และสมการพลังงาน [20] (สมการที่ (3)) ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานทางชลศาสตร์เพื่อหาระดับเปิดประตูกั้นน้ำของเมืองที่เหมาะสมกับความต้องการน้ำ โดยมีสมมุติฐานว่าการไหลผ่านประตูน้ำที่พิจารณาเป็นการไหลที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานการไหล

$$Q = AV \quad (1)$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2)$$

$$E = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z \quad (3)$$

โดยสมการที่ (1) อธิบายความสัมพันธ์ของอัตราการไหล (Q) กับอัตราเร็ว (V) ของของไหลที่เคลื่อนที่ในพื้นที่การไหล (A) และเมื่อน้ำไหลจากหน้าตัดที่ 1 พื้นที่หน้าตัด A_1 ด้วยความเร็ว V_1 ไปยังหน้าตัดที่ 2 พื้นที่หน้าตัด A_2 ด้วยความเร็ว V_2 โดยมีสมมุติฐานว่าอัตราการไหลที่ไหลระหว่างหน้าตัดทั้งสองมีค่าเท่ากัน ไม่มีการสูญเสียจากการไหลระหว่างจุดสองจุดที่พิจารณา จะได้ความสัมพันธ์ของการไหลระหว่างจุดสองจุดดังสมการที่ (2) และสมการที่ (3) คือ สมการพลังงานการไหลของเบอร์นูลลี สมการที่ (3) อธิบายพลังงานการไหลของของไหล (E) ที่มีน้ำหนักจำเพาะของของเหลวคือ γ ไหลภายใต้ความดัน (P) ด้วยความเร็ว (V) ที่ระดับ Z

3) คำนวณความต้องการน้ำ เพื่อหาความต้องการใช้น้ำของแต่ละลำเหมือง โดยพิจารณาความต้องการใช้น้ำของพืชเป็นหลักเนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรม โดยความต้องการใช้น้ำของพืชมีค่าเท่ากับปริมาณการคายระเหย [21] ซึ่งปริมาณการคายระเหยสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการคาย

ระเหยจริงกับปริมาณการคายระเหยของพืชอ้างอิง โดยมีสมการทั่วไปในการหาปริมาณการใช้น้ำของพืช หรือการคายระเหย ดังสมการที่ (4)

$$K_t = K_s \cdot K_c \cdot E_{tr} \quad (4)$$

สมการที่ (4) ปริมาณการใช้น้ำของพืช หรือการคายระเหยจริง (Actual Evapotranspiration, E_t) มีค่าเท่ากับปริมาณการคายระเหยของพืชอ้างอิง (Reference Corp Evapotranspiration, E_{tr}) คูณด้วยสัมประสิทธิ์ศักยภาพการคายระเหยของดิน (Soil Coefficient, K_s) คูณด้วยสัมประสิทธิ์พืช (Corp Coefficient, K_c) [21, 22, 23] โดยสัมประสิทธิ์ศักยภาพการคายระเหยของดิน และสัมประสิทธิ์ของพืช ได้จากการสำรวจ ทดสอบ และเก็บเป็นฐานข้อมูลของแต่ละพื้นที่ และปริมาณการคายระเหยของพืชอ้างอิง ได้จากการสำรวจ และทดสอบตามชนิดของพืชที่ปลูกในพื้นที่ที่สนใจ

ปริมาณการคายระเหยของพืชอ้างอิงของพืชแต่ละชนิด ได้ถูกทดลองและรวบรวมข้อมูลไว้โดยกรมชลประทาน [24] เนื่องจากพื้นที่กรณีศึกษาใช้พื้นที่ทำการเกษตรที่รับน้ำจากลำเหมือง เป็นพื้นที่เพาะปลูกพื้นที่ใหญ่และไม่มีบ้านพักอาศัย ความต้องการน้ำใช้ในการศึกษาจึงใช้ความต้องการน้ำเพื่อการเพาะปลูกเท่านั้นในการวิจัยนี้จึงไม่ได้พิจารณาความต้องการน้ำอุปโภคบริโภคในครัวเรือน

เมื่อได้ความต้องการน้ำของพืชในแต่ละเดือนแล้ว จึงได้มาเทียบอัตราส่วนกับข้อมูลขนาดพื้นที่เพาะปลูกของพืชแต่ละชนิดที่ใช้ในการศึกษา โดยใช้ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกพืชแต่ละชนิดเบื้องต้นจากฐานข้อมูลจากการสำรวจบัญชีรายชื่อเกษตรกรในอำเภอแม่จัน¹ และลงพื้นที่สำรวจเก็บข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกเพิ่มเติมเนื่องจากต้องแบ่งพื้นที่เพาะปลูกตามรูปแบบการส่งน้ำของระบบเหมืองฝาย โดยแยกพื้นที่เพาะปลูกที่รับน้ำตามลำเหมือง

4) เว็บไซต์แสดงข้อมูลสถานการณ์น้ำปัจจุบันและเสนอแนะระดับประตูน้ำที่เหมาะสม เพื่อให้กลุ่มผู้ใช้น้ำได้รับข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในการบริหารจัดการน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ

4.3 การพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย

จากการวิเคราะห์ปัญหาและความต้องการระบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการน้ำ ระบบสนับสนุนการตัดสินใจนี้แสดงผลผ่านทางเว็บไซต์ การพัฒนาระบบจึงประกอบด้วย 1) ระบบฐานข้อมูล เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากสถานีตรวจวัดที่คณะผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาขึ้นเพื่อวัดระดับน้ำในลำน้ำแม่จัน เก็บข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับฝายและการทำการเกษตรที่ใช้น้ำจากลำน้ำแม่จัน 2) ส่วนสนับสนุนการตัดสินใจ จะนำเอาข้อมูลที่รวบรวมได้มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเปิดปิดประตูน้ำ และ 3) ส่วนติดต่อผู้ใช้ในการแสดงผลข้อมูลพื้นฐานและข้อมูลที่ได้จากระบบสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อให้ผู้เกี่ยวข้องสามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ต่อได้ดังแสดงในรูปที่ 4

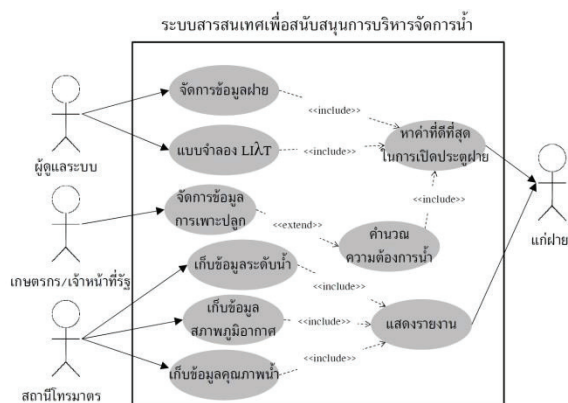


รูปที่ 4 องค์ประกอบระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย

โดยการทำงานของระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย ประกอบไปด้วย

¹ สำนักงานเกษตรอำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย ปี พ.ศ. 2558

ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องได้แก่ 1) ผู้ดูแลระบบ (Administrator) ทำหน้าที่จัดการข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับฝาย เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเปิดปิดประตูฝาย 2) เกษตรกรและเจ้าหน้าที่เกษตร (Farmer/Officer) ทำหน้าที่จัดการข้อมูลการเพาะปลูกที่ต้องการน้ำจากฝาย 3) สถานีโทรมาตรวัดระดับน้ำขนาดเล็ก (Telemetry Stations) ส่งข้อมูลมาเก็บรวบรวมเพื่อใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย 4) ผู้ดูแลเหมืองฝาย (Weir Controller) แก่เหมือง แก่ฝาย



รูปที่ 5 แผนผังยูสเคส (Use Case Diagram)

ระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำ
ของเหมืองฝาย

รูปที่ 5 แสดงแผนผังยูสเคส แสดงการทำงานของ ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบ โดยผู้ดูแลระบบจะทำการใส่ข้อมูลและคุณสมบัติของฝาย ได้แก่ ชื่อฝาย พิกัด ขนาดของฝาย จำนวนประตู ขนาดของประตู ขนาดของเหมือง และขนาดของประตูเหมือง เป็นต้น นอกจากนี้ผู้ดูแลระบบ จะทำการสร้างแบบจำลองทางน้ำและฝาย (LIAT Model) [13] แสดงลักษณะการเชื่อมต่อของลำน้ำ เกษตรกรผู้ใช้น้ำ หรือเจ้าหน้าที่รัฐใส่ข้อมูลเกี่ยวกับพื้นที่การเกษตร ได้แก่ พิกัด พื้นที่ปลูก ช่วงระยะเวลาที่ทำการปลูก เป็นต้น ระบบจะนำข้อมูลการเกษตรเพื่อคำนวณหาความต้องการน้ำที่ต้องใช้ ในส่วนของสถานีโทรมาตรวัดระดับน้ำ จะวัดค่าระดับน้ำและคำนวณเป็นอัตราการไหลตามความสัมพันธ์

ระหว่างระดับน้ำและอัตราการไหลที่ได้จากสำรวจเก็บข้อมูลหนึ่งปี ข้อมูลต่าง ๆ จะถูกแสดงผลในระบบ จากนั้นระบบจะนำค่าข้อมูลฝาย ข้อมูลความต้องการน้ำ และข้อมูลที่ได้จากสถานีวัดมาประกอบกันเพื่อคำนวณหาค่าที่ดีที่สุดในการเปิดประตูฝายเพื่อจัดสรรน้ำให้ตรงกับความต้องการ

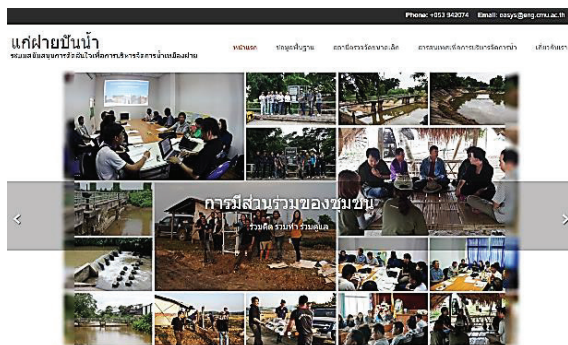
5. ผลการวิจัย

ระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย ได้ถูกพัฒนาขึ้นและติดตั้งในลำน้ำแม่จัน อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย โดยได้วิเคราะห์ผลของการทำงานใน 3 ด้านคือ 1) การแสดงผลของระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย 2) การประมาณค่าระดับประตูน้ำ และ 3) ความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

5.1 การแสดงผลของระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย

จากการรวบรวมความต้องการระบบจากผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง และสำรวจพื้นที่เพื่อเก็บข้อมูล เพื่อทำการออกแบบระบบการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝายตามที่ได้นำเสนอไปในหัวข้อก่อนหน้านี้ คณะวิจัยได้ทำการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย ในรูปแบบเว็บไซต์ที่ชื่อว่า “แก่ฝายปันน้ำ” มีการจัดกลุ่มข้อมูลที่ต่าง ๆ ให้เป็นหมวดหมู่ง่ายต่อการเข้าถึง สามารถแสดงผลได้บนอุปกรณ์ที่หลากหลาย (Responsive) อาทิเช่น บนจอคอมพิวเตอร์ จอแท็บเล็ต และสมาร์ตโฟน (รูปที่ 6) โดยเว็บไซต์ “แก่ฝายปันน้ำ” (เว็บไซต์ <http://nahmchan.oasys-lab.com/>) ประกอบด้วยเมนูหลัก 3 เมนู คือ 1) ข้อมูลพื้นฐาน เป็นการรวบรวมข้อมูลทางกายภาพของฝายต่าง ๆ ที่อยู่ในพื้นที่ศึกษา พิกัด และผู้รับผิดชอบ ตลอดจนภาพถ่ายทางอากาศ และลักษณะการเรียงตัวของฝาย 2) ข้อมูลโทรมาตร ซึ่งจะทำการแสดงข้อมูลจากสถานีโทรมาตรวัดระดับน้ำจำนวน 4 สถานี ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1 และรูปที่ 7 โดยข้อมูลปริมาณน้ำที่ได้จากสถานีโทรมาตรขนาดเล็กมีการ

แสดงผลข้อมูลในลักษณะภูมิสารสนเทศ และข้อมูลเชิงตัวเลขในรูปแบบของกราฟ และข้อมูลละเอียดในแต่ละสถานี ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้มีปรับปรุงให้เป็นปัจจุบันโดยอัตโนมัติ 3) ระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย ประกอบด้วย 3 ส่วน ส่วนแรกคือ ระบบฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ สำหรับให้ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง สามารถปรับปรุงภูมิสารสนเทศเกี่ยวกับพื้นที่การทำเกษตร และข้อมูลเกี่ยวกับเหมืองฝาย เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องการในพื้นที่ที่ทำการศึกษ ส่วนที่สองเป็นส่วนการสร้างแผนผังโครงข่ายลำน้ำ เป็นการเชื่อมต่อลักษณะของลำน้ำที่ประกอบด้วยฝายต่าง ๆ โดยแทนลักษณะของลำน้ำบริเวณแต่ละฝายด้วยภาพกราฟิก และมีการนำข้อมูลทางกายภาพของฝายที่ได้จากในส่วนแรก เพื่อทำการเตรียมข้อมูลสำหรับการทำงานในส่วนที่สาม คือ ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ โดยในส่วนนี้จะนำข้อมูลที่ได้ออกสองส่วนแรก มาทำการคำนวณและหาค่าที่ดีที่สุดในการกำหนดระดับประตูฝาย เพื่อทำการจัดสรรปริมาณน้ำให้ตรงกับความต้องการ



(ก) เปิดเว็บไซต์บนคอมพิวเตอร์



(ข) เปิดเว็บไซต์บนสมาร์ตโฟน

รูปที่ 6 การแสดงผลเว็บไซต์บนอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน



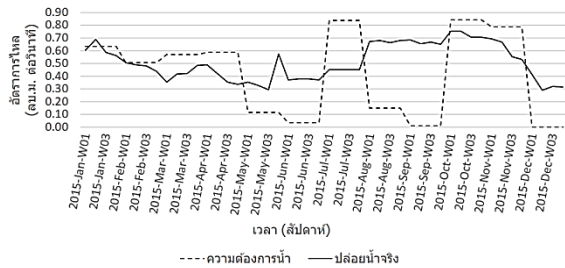
รูปที่ 7 จุดติดตั้งสถานีวัดปริมาณน้ำบนแม่น้ำจัน

ตารางที่ 1 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดระดับน้ำที่ใช้ในการศึกษา

รหัสสถานี	สถานที่ติดตั้ง	พิกัดสถานี	
		Latitude	Longitude
STK06	สะพานลานทอง	20.10727	99.76459
STK07	ป่าดง	20.13028	99.834078
STK10	สันทราย-ป่าซาง	20.18309	99.87558
STK11	วัดสันทราย	20.18157	99.88709

5.2 ผลการประมาณค่าระดับประตูน้ำ

จากการสำรวจความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรและอุปโภคบริโภคของพื้นที่ย่อยแต่ละพื้นที่ที่ใช้น้ำจากแม่น้ำจันเพื่อเป็นข้อมูลการบริหารจัดการน้ำ รวมไปถึงข้อมูลน้ำที่ปล่อยผ่านลำเหมืองไปยังพื้นที่การเกษตรได้ถูกรวบรวมและนำมาเป็นข้อมูลเพื่อคำนวณระดับประตูน้ำจากสมการทางชลศาสตร์ ฝายโป่งน้ำร้อนซึ่งเป็นฝายแรกจากด้านต้นน้ำของแม่น้ำจัน ได้ถูกเลือกเพื่อศึกษาแนวทางการเปิดประตูน้ำเพื่อผันน้ำไปยังพื้นที่การเกษตร โดยรวบรวมข้อมูลการเปิดประตูน้ำของแก่งฝายโป่งน้ำร้อนตลอดทั้งปี พ.ศ. 2558 พบว่าประตูระบายน้ำถูกเปิดให้สูงกว่าระดับน้ำที่ไหลตลอดเวลา ซึ่งจะทำให้ น้ำที่ไหลเข้าลำเหมืองมากหรือน้อยตามปริมาณน้ำที่ไหลในแม่น้ำและไม่สอดคล้องกับความต้องการน้ำของแต่ละพื้นที่ดังแสดงในรูปที่ 8



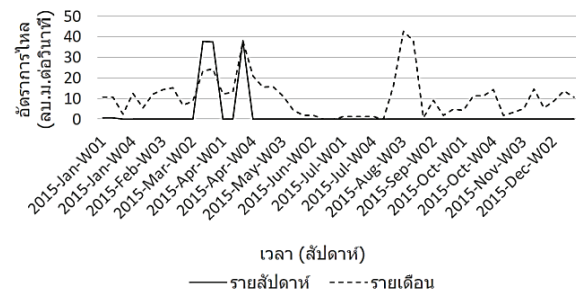
รูปที่ 8 การปล่อยน้ำจริงเทียบกับความต้องการน้ำ
จากฝายโป่งน้ำร้อน

รูปที่ 8 แสดงอัตราการไหลของน้ำที่ปล่อยผ่านลำเหมืองจริง เทียบกับความต้องการน้ำจากลำเหมืองฝายโป่งน้ำร้อน โดยแกนตั้งคืออัตราการไหลในหน่วยลูกบาศก์เมตรต่อวินาที แกนนอนคือระยะเวลาปล่อยน้ำในหน่วยสัปดาห์ จะเห็นได้ว่าเมื่อมีปริมาณน้ำไหลในแม่น้ำน้อย ฝายโป่งน้ำร้อนซึ่งเป็นฝายแรกด้านต้นน้ำ จะได้รับน้ำไหลเข้าลำเหมืองมากที่สุด และฝายถัดไปจะได้น้ำน้อยลงตามลำดับ นอกจากปริมาณน้ำที่ไหลผ่านลำเหมืองไม่สอดคล้องกับความต้องการน้ำของพื้นที่แล้ว ในช่วงน้ำน้อย ฝายด้านท้ายน้ำได้รับน้ำไม่เพียงพอที่จะผันน้ำไปยังพื้นที่เกษตร

จากการประยุกต์ใช้สมการทางชลศาสตร์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของระดับประตูน้ำ คำนวณระดับประตูน้ำให้ฝายด้านต้นน้ำปล่อยน้ำแค่เพียงพอกับความต้องการใช้น้ำตามข้อมูลความต้องการน้ำเพื่อการเกษตรและอุปโภคบริโภคของพื้นที่ โดยเปรียบเทียบสองกรณีคือ กรณีที่หนึ่ง ปรับระดับประตูน้ำเดือนละหนึ่งครั้ง และกรณีที่สอง ปรับระดับประตูน้ำสัปดาห์ละหนึ่งครั้ง

จากการคำนวณปริมาณน้ำที่ผ่านประตูน้ำโดยปรับระดับประตูน้ำรายสัปดาห์และรายเดือน โดยใช้ข้อมูลอัตราการไหลของน้ำเฉลี่ยจากสัปดาห์ที่ผ่านมา และเดือนที่ผ่านมาตามลำดับ พบว่าเมื่อปรับค่าระดับประตูน้ำตามค่าระดับประตูน้ำที่คำนวณได้เพื่อกันน้ำ ณ เวลาปัจจุบัน จะมีความคลาดเคลื่อนของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าลำเหมืองเนื่องจากปริมาณน้ำที่ไหลผ่านฝายจริงแตกต่างจากปริมาณน้ำผ่านฝายที่ใช้ในการคำนวณ โดยมีผลความคลาดเคลื่อน

เปรียบเทียบระหว่างการเปิดประตูน้ำรายสัปดาห์และรายเดือน ดังรูปที่ 9



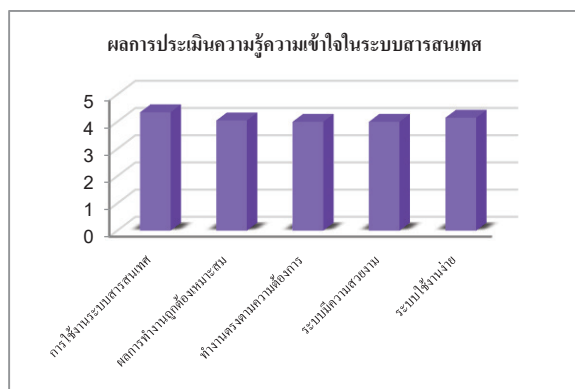
รูปที่ 9 ค่าความคลาดเคลื่อนของการปล่อยน้ำเข้าลำเหมือง
ของฝายโป่งน้ำร้อน

รูปที่ 9 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการปล่อยน้ำเข้าลำเหมืองฝายโป่งน้ำร้อนจากการจำลองสถานการณ์การไหล โดยแกนตั้งคือค่าอัตราการไหลที่คลาดเคลื่อนจากความต้องการน้ำของน้ำในหน่วยลูกบาศก์เมตรต่อวินาที แกนนอนคือระยะเวลาปล่อยน้ำในหน่วยสัปดาห์ จะเห็นได้ว่าการปรับระดับประตูน้ำแบบรายเดือน จะให้ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าลำเหมืองคลาดเคลื่อนกว่าการปรับระดับประตูน้ำแบบรายสัปดาห์ โดยการปรับประตูน้ำรายเดือนมีปริมาณน้ำความคลาดเคลื่อนจากปริมาณน้ำที่ต้องการเฉลี่ย 10.51% และการปรับประตูน้ำรายสัปดาห์มีปริมาณน้ำความคลาดเคลื่อนจากปริมาณน้ำที่ต้องการเฉลี่ย 2.39% ดังนั้น หากแก้เหมืองและแก้ฝายเพิ่มความถี่ในการปรับระดับประตูน้ำได้มากขึ้น จะทำให้การไหลของน้ำผ่านประตูน้ำมีความแม่นยำมากขึ้น

5.3 ความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

หลังจากได้ทำการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝายเรียบร้อยแล้ว ได้จัดอบรมเชิงปฏิบัติการ โดยมีผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องเข้าอบรม 70 คน ประกอบด้วยกลุ่มผู้ดูแลเหมืองฝาย เกษตรกรในพื้นที่ และเจ้าหน้าที่รัฐ และได้ทำการประเมินความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมการอบรม โดยมีคะแนนความพึงพอใจสูงสุดคือ 5 คะแนน พบว่าผู้เข้าร่วมอบรมมีความพึงพอใจเฉลี่ย 4.11 อยู่ในระดับดี

โดยมีระดับคะแนนสูงสุด 3 อันดับแรก คือ มีความพึงพอใจในการใช้งานระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่ได้พัฒนาขึ้น มีคะแนน 4.35 รองลงมาคือ ระบบสนับสนุนการตัดสินใจฯ ที่พัฒนาขึ้นใช้งานง่าย คะแนน 4.15 และผลการทำงานของระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้อง เหมาะสม ระดับคะแนน 4.05 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 10 จากผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปได้ว่าระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝายสามารถทำงานได้ถูกต้อง เหมาะสม สามารถใช้งานได้ง่าย และตรงตามความต้องการของผู้ใช้งาน



รูปที่ 10 ผลการประเมินความพึงพอใจต่อระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย

6. สรุปผลการวิจัย

จากการประยุกต์ใช้สมการทางสถิติเพื่อหาค่าระดับการเปิดประตูน้ำที่เหมาะสมเพื่อเป็นข้อมูลให้กับระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการจัดสรรน้ำอย่างเหมาะสมกับความต้องการน้ำของพื้นที่การเกษตร สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจเพื่อวางแผนบริหารจัดการน้ำองค์กรเหมืองฝายได้ โดยความถี่ของการเปลี่ยนแปลงระดับประตูน้ำ มีผลต่อความแม่นยำของปริมาณน้ำที่ปล่อยผ่านลำเหมืองไปยังพื้นที่การเกษตร

กล่าวคือถ้าสามารถปรับระดับประตูน้ำรายเดือนตามค่าระดับประตูที่คำนวณได้จะมีความคลาดเคลื่อนจากปริมาณน้ำที่ต้องการเฉลี่ย 10.51% และถ้าสามารถปรับระดับประตูน้ำรายสัปดาห์ตามค่าระดับประตูน้ำที่คำนวณได้จะมีความคลาดเคลื่อนจากปริมาณน้ำที่ต้องการเฉลี่ย 2.39%

การพัฒนา ระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปรับระดับประตูน้ำของเหมืองฝาย ต้องการความร่วมมือและข้อมูลจากชุมชนและกลุ่มผู้ใช้น้ำของแต่ละพื้นที่แบบจำลองและระบบสนับสนุนการตัดสินใจนี้สามารถประยุกต์ใช้กับพื้นที่อื่น ๆ ที่มีการบริหารจัดการน้ำด้วยองค์กรเหมืองฝาย โดยการปรับแบบจำลองให้สอดคล้องกับการเรียงตัวของฝายบนทางน้ำที่ต้องการศึกษา

ในการศึกษาได้ใช้ข้อมูลน้ำในปัจจุบันเพื่อคำนวณระดับประตูน้ำที่จะเปิดถัดไป จึงมีความคลาดเคลื่อนจากการไหลของน้ำจริงเนื่องจากค่าระดับประตูที่คำนวณได้ขึ้นกับปริมาณน้ำที่ไหลด้วย ดังนั้นในการคำนวณระดับประตูน้ำให้สอดคล้องกับน้ำที่ไหลจริง ควรมีการทำนายค่าปริมาณน้ำล่วงหน้า และใช้ปริมาณน้ำที่ทำนายคำนวณหา ระดับการเปิดประตูน้ำให้เหมาะสมกับความต้องการใช้น้ำของแต่ละพื้นที่ หากมีการพัฒนาแบบจำลองในระยะต่อไป ควรได้รับความร่วมมือจากกลุ่มผู้ใช้น้ำในชุมชน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและความต้องการน้ำที่แท้จริงของชุมชน รวมไปถึงปัญหาที่เกิดขึ้นซึ่งแตกต่างกันไปในแต่ละชุมชน

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และขอขอบคุณเทศบาลตำบลแม่จัน อ.แม่จัน จ.เชียงราย รวมไปถึงองค์กรเหมืองฝาย (แก่งเหมือง แก่งฝาย) และกลุ่มผู้ใช้น้ำ เกษตรกรที่อำนวยความสะดวกในการลงพื้นที่เพื่อเก็บข้อมูล และอนุเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] เพ็ญสุภา สุขคตะ ใจอินทร์. พื้นที่เหมืองฝาย “ปิดฝืน” กฎหมายมั่งราชศาสตร์. 2554; [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://botkwamdee.blogspot.com/2011/09/p1-2mr.html>
- [2] เอกวิทย์ ณ ถลาง. ภูมิปัญญาล้านนา หนังสือชุดภูมิปัญญาชาวบ้าน กับกระบวนการเรียนรู้และการปรับตัวของชาวบ้านไทย. มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, 2544.
- [3] วันเพ็ญ สุรฤกษ์. พัฒนาการทางประวัติศาสตร์ความเป็นมาและการจัดการเกี่ยวกับระบบชลประทานในภาคเหนือของประเทศไทย. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยสังคม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- [4] พรพิไล เลิศวิชา สุพชัย เมธิน และ นนรัชช นามเทพ. เหมืองฝาย จัดการน้ำ จัดการคน บนพื้นฐานภูมิศาสตร์และวัฒนธรรม. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2552.
- [5] สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ. ยุทธศาสตร์การวิจัย (พ.ศ. 2555-2559) ภาคเหนือ. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ, 2554.
- [6] ธงชัย ภูวนาถจิตร, ไพบุลย์ วงศ์ใหญ่ และ นิรันดร์ แ่งคำ. การจัดการน้ำด้วยภูมิปัญญาเหมืองฝาย โดยชุมชนมีส่วนร่วม กรณีศึกษา สหกรณ์ผู้ใช้น้ำจันจว้า จำกัด ในพื้นที่ลุ่มน้ำคำ อำเภอแม่จัน จังหวัดเชียงราย. ศูนย์ความหลากหลายทางชีวภาพ, มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย, 2555.
- [7] Bates, Bryson, et al. climate change and Water: technical Paper vi. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2008.
- [8] อภิญา จันทรอิน. การจัดการความขัดแย้งขององค์กรเหมืองฝายช่วงฤดูแล้งในลุ่มน้ำแม่จัน จังหวัดเชียงราย. การค้นคว้าแบบอิสระ, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2547.
- [9] Baltar, A. M., and Fontane, D. G. Use of Multiobjective Particle Swarm Optimization in Water Resources Management. Journal of water resources planning and management, 2008; 134(3): 257-265.
- [10] Noory, H., Liaghat, A. M., Parsinejad, M., and Haddad, O. B. Optimizing Irrigation Water Allocation and Multicrop Planning Using Discrete PSO Algorithm. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2011; 138(5): 437-444.
- [11] ระวีเวช จาติเกตุ และ ชูโชค อายุพงศ์. การพยากรณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าฝายแม่แตง เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล และเขื่อนแม่งวดอุดมธารา ภายใต้โครงการเพิ่มปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำเขื่อนแม่งวดอุดมธารา. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2558; 14-30.
- [12] Panyadee, P., Champrasert, P., and Aryupong, C. Water Level Prediction Using Artificial Neural Network with Particle Swarm Optimization Model. 2017 Fifth International Conference on Information and Communication Technology, Malacca, Malaysia, 2017.
- [13] Aramkul, S., Champrasert, P., and Suntaranont, B. A Modular Framework of River Operations for Water Resource Management System. 2017 Fifth International Conference on Information and Communication Technology, Malacca, Malaysia, 2017.
- [14] ชูโชค อายุพงศ์ และ ภาสกร แซ่มประเสริฐ. การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการน้ำ การเตือนภัยน้ำท่วมและเฝ้าระวังสาธารณภัยแผ่นดินไหว จังหวัดเชียงราย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2557.
- [15] นิคม พรหมมาเทพย์. เรื่องบ่าเก่าเล่าล้านนา: เหมืองฝาย แม่จันจว้าถึงก้างจ้อง. ม.ป.ท., 2546.
- [16] สำนักประชาสัมพันธ์เขต 3 เชียงใหม่. อำเภอแม่จันเดินทางจับเคลื่อนแก้ปัญหากล้งแล้งในพื้นที่พร้อมบริหารจัดการตามนโยบายรัฐบาล, 2559; [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.prdnorth.in.th/ct/news/viewnews.php?ID=160107094709>

- [17] Pedlosky, J. Geophysical fluid dynamics. Springer. 1987; 10-13: ISBN 978-0-387-96387-7.
- [18] Ferguson, R. I. Hydraulics and Hydraulic Geometry. Physical Geography, 1986; 10(1), 1-31.
- [19] Leopold, L. B., and Maddock, T. The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications. US Government Printing Office, 1953; 252.
- [20] Bernoulli, D., Bernoulli, J., and Bernoulli, J. Hydrodynamics and hydraulics. Dover Pubns, 1968.
- [21] Te Chow, V., Maidment, D. R., and Mays, L. W. (1962). APPLIED HYDROLOGY. Journal of Engineering Education, 308, 1959.
- [22] Chow, V. T., Maidment, D.R., and Mays, L. W. Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York, 1988.
- [23] ส่วนการใช้น้ำชลประทาน. คู่มือการหาปริมาณการใช้น้ำของพืช ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง และค่าสัมประสิทธิ์ของพืช. สำนักอุทกวิทยาและการบริหารน้ำ, กรมชลประทาน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2554.
- [24] กลุ่มมาตรฐานวางโครงการ. ปริมาณความต้องการใช้น้ำของพืช. สำนักบริหารโครงการ, กรมชลประทาน, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2554.



การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงต้นทุนในการลดจุดดำใน อุตสาหกรรมฉีดพลาสติกโดยใช้แนวทางซิกซ์ซิกม่า Cost Efficiency Analysis for Black Dot Defect in Plastic Injection Process by Six Sigma Approach

ศุภโชค เสงฆนงแบน* และ จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์

Suphachok Sengnongban and Jeerapat Ngaoprasertwong

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand

*E-mail: aepsuphachok@gmail.com, Telephone Number: +6683-255-5355

บทคัดย่อ

ปัญหาในกระบวนการฉีดพลาสติกที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของงานมากที่สุดคือจุดดำ (Black dot) วิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาด้านนี้มีด้วยกันหลายวิธี โดยงานวิจัยนี้จะเน้นที่การเลือกวิธีการลดปัญหาดังกล่าวข้างต้น ทั้งในส่วนของราคาต่อหน่วย ปริมาณการผลิตต่อครั้ง เพื่อเลือกวิธีการและค่าใช้จ่ายให้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภท สำหรับโรงงานกรณีศึกษาก่อนการปรับปรุงด้วยวิธีการถอดสกรูชุดทำความสะอาด มีค่าใช้จ่ายเป็นเงิน 72,500 บาทต่อเดือน (ค่าเครื่องจักร ค่าล่วงเวลา ค่าขนส่ง ค่าอุปกรณ์ เป็นต้น) โดยงานวิจัยนี้จะนำทฤษฎีซิกซ์ซิกม่า (Six Sigma) ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอน Define, Measure, Analyze, Improve และ Control (DMAIC) มาใช้ และใช้ Cause and Effect Diagram, Cause and Effect Matrix และ Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) ในการคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อจุดดำ และใช้ 2^k Factorial Design ในการหาปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญกับจุดดำ ผลที่ได้จากวิธีแรก คือ การถอดสกรูชุดทำความสะอาดนั้นสามารถลดจุดดำจากเดิมลงได้ 50% ซึ่งวิธีนี้เหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานที่มีราคาต่อหน่วยค่อนข้างสูงหรือชิ้นงานที่มีการผลิตจำนวนมาก วิธีที่สอง คือ การใช้สารเคมีเพิ่มเข้าไปในกระบวนการล้างกระบอกฉีดพลาสติก โดยวิธีนี้จะให้ผลการลดจุดดำได้ประมาณ 25% ซึ่งวิธีนี้เหมาะกับการชิ้นงานที่มีราคาต่อหน่วยไม่สูงมาก และการผลิตปริมาณน้อยต่อครั้ง โดยหลังจากที่นำวิธีการลดจุดดำและคำนวณค่าใช้จ่ายที่ใช้ไปสำหรับวิธีที่ได้เลือกให้เหมาะสมกับชนิดและประเภทของงานนั้น สามารถลดค่าใช้จ่ายที่คิดเป็นมูลค่าเพิ่มได้ถึง 148,000 บาทต่อปี

ABSTRACT

Black dot is one of major quality problems in plastic injection process. The methods used to solve this problem are several different ways. This research aims to determine appropriate reduction black dot method in different conditions including price per unit and production volume per session. This finding could provide properly process and cost for each plant type. In this study, expense before process improving to decrease black dot by removing and polishing screw was 72,500 baht per month (include machine costs, overtime, shipping costs, equipment costs, etc.). Six Sigma approach; Define, Measure, Analyze, Improve and Control (DMAIC) was used to improve reducing black dot method Cause and Effect Diagram, Cause and Effect Matrix and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) were used to select factors which affected to black dot defect. 2^k Factorial Design was applied for determination significant factor impacting black dot. The result showed removing and polishing screw can reduce black dot by 50%.

Received 10 July 2018

Revised 26 July 2018

Accepted 26 July 2018

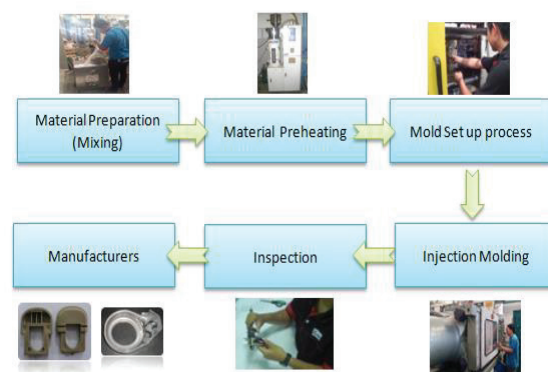
This process was appropriate for high unit price and mass production. Second method was purging, adding chemical for screw-barrel cleaning process. The process could reduce black dot by 25%. It was suitable for low unit price and low production volume. After applying the black dot reduction method and calculating the cost efficiency to appropriate plant type, the total cost of reduction valued 148,000 baht per year.

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการฉีดพลาสติกมีการแข่งขันทางด้านราคาค่อนข้างสูง ส่งผลให้โรงงานต้องควบคุมคุณภาพของสินค้าเพื่อให้เกิดของเสียน้อยที่สุดโดยของเสียหากเกิดขึ้นนั้นไม่เพียงแต่จะสูญเสียโอกาสในการขาย อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายที่ซ่อนอยู่อีกด้วย เช่น หากเกิดของเสียขึ้นแล้ว ก็จำเป็นต้องผลิตงานทดแทน ซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายเพิ่ม กล่าวคือ ค่าวัตถุดิบ ค่าเครื่องจักร ค่าแรง ค่าการตรวจสอบ หรือค่าขนส่ง เป็นต้น หากโรงงานไม่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ จะส่งผลกระทบต่อความเชื่อมั่นของลูกค้าโดยปัญหาที่พบบ่อย ได้แก่ จุดดำ (Black dot) ซึ่งมองเห็นได้ชัดเจนหากชิ้นงานนั้นเป็นสีขาวหรือใส

โดยการลดจุดดำได้มีการศึกษาแนวทางการลดจุดดำไว้หลายขั้นตอนด้วยกัน เช่น การถอดสกรูชุดทำความสะอาด การลดอุณหภูมิกระบอกฉีด การร้อนเม็ดพลาสติกที่นำไปบดก่อนการผสม เป็นต้น แต่สิ่งที่ต้องพิจารณาควบคู่กันไปด้วย คือ ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการลดจุดดำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในกระบวนการลดจุดดำเทียบกับจำนวนของเสียที่ลดลง เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้และจัดการกับประสิทธิภาพเชิงต้นทุนในอุตสาหกรรมการฉีดพลาสติกต่อไป

งานวิจัยนี้จะดำเนินการตามทฤษฎีซิกซ์ ซิกม่า (Six Sigma) ซึ่งถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อปรับปรุงต้นทุนคุณภาพและความพึงพอใจของลูกค้า [1, 2] และใช้เครื่องมือ Cause and Effect Diagram, Cause and Effect Matrix, Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) [3] และ DOE [4] เพื่อปรับปรุงและวิเคราะห์จุดดำและเทียบกับต้นทุนที่ใช้ในโรงงานให้เหมาะสมกับปัญหาจุดดำที่เกิดขึ้นในแต่ละประเภท



รูปที่ 1 กระบวนการฉีดพลาสติก

2. วิธีการวิจัยและผลการวิจัย

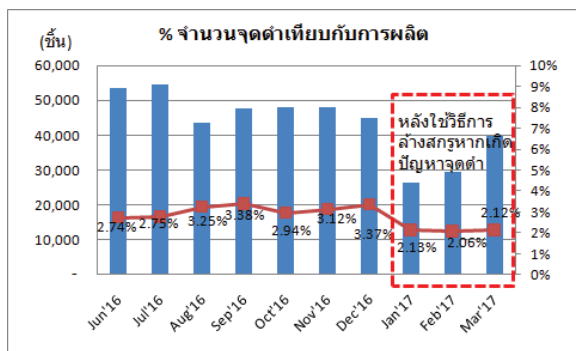
ดำเนินการวิจัยตามแนวทางซิกซ์ซิกม่า (Six Sigma) [5] ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอน Define, Measure, Analyze, Improve และ Control (DMAIC) [6] โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ระบะนิยามปัญหา (Define Phase)

ในกรณีศึกษากระบวนการฉีดพลาสติกนี้ ปัญหาที่พบได้มากที่สุด คือ ชิ้นงานเป็นจุดดำ ซึ่งในอดีตได้มีหลายกรณีศึกษาเพื่อลดปัญหานี้ โดยจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องนั้นพบว่า มีหลากหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องและโรงงานกรณีศึกษานี้ได้นำวิธีต่าง ๆ เช่น การทำความสะอาดถังอบเม็ดพลาสติก การใช้สารเคมีเพิ่มเข้าไปในกระบวนการล้างกระบอกฉีด (Purging) หรือแม้กระทั่งการถอดสกรูเพื่อนำมาขัดและทำความสะอาด ซึ่งหลังจากที่ได้นำวิธีการต่าง ๆ ข้างต้นมาใช้กับโรงงานกรณีศึกษาประมาณสามเดือนนั้น ปัจจัยต่าง ๆ ทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถลดของเสียประเภทจุดดำโดยรวมลงจากเดิมไปได้ 42.5% โดยวิธีที่นำมาใช้มาจากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรม ได้แก่ การถอดสกรูออกมาขัดทำความสะอาด การใช้สารเคมีในการล้างกระบอกฉีด และการร้อนเม็ดพลาสติกหลังการบด เป็นต้น แต่วิธีการลดจุดดำจะเกิด

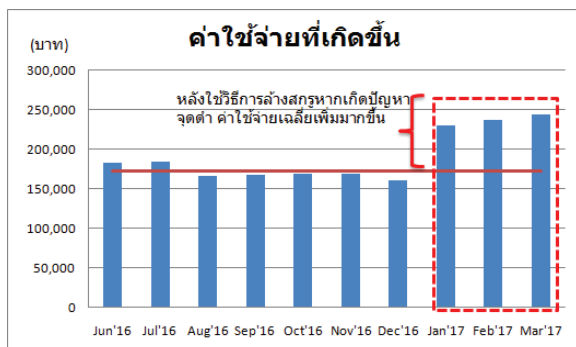
ค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น เช่น เวลาที่ไม่สร้างมูลค่าเพิ่มมากขึ้น จำเป็นต้องทำงานล่วงเวลา ค่าใช้จ่ายในการขนส่งเพิ่มขึ้น ค่าใช้จ่ายในการซื้ออุปกรณ์สนับสนุนกิจกรรมการลดจุดค่า หรือแม้กระทั่งกำลังการผลิตไม่เพียงพอ ทำให้สูญเสียโอกาส เป็นต้น

จากการตรวจสอบข้อมูลของเสียประเภทจุดค่าที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดพลาสติกที่ผ่านมา หลังจากที่ได้ นำวิธีการลดจุดค่าข้างต้นมาใช้นั้นพบว่า ช่วงเดือนมกราคม 2560 ถึงเดือนมีนาคม 2560 มีปริมาณของเสียประเภท จุดค่าลดลงจากเดิมที่ค่าเฉลี่ยที่ 2.10% (จากเดิมที่มีปัญหา ของเสียก่อนหน้าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.02%) ดังรูปที่ 2

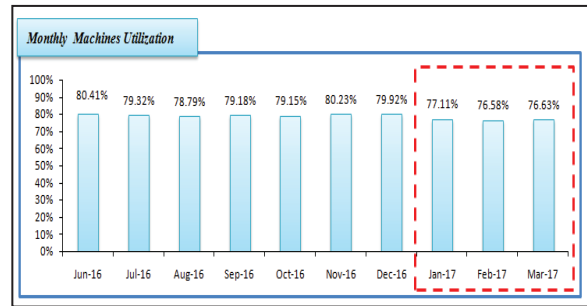


รูปที่ 2 % จุดค่าที่เกิดขึ้นในโรงงานกรณีศึกษา

ในทางกลับกัน ในช่วงที่มีการลดจุดค่านั้น ค่าใช้จ่ายโดยรวมที่เกิดขึ้นนั้นมีมากขึ้นอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3 และยังส่งผลถึง Machine Utilization เฉลี่ยลดลง 3% คิดเป็น 300 ชั่วโมง จากชั่วโมงการผลิตทั้งหมดประมาณ 10,000 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4

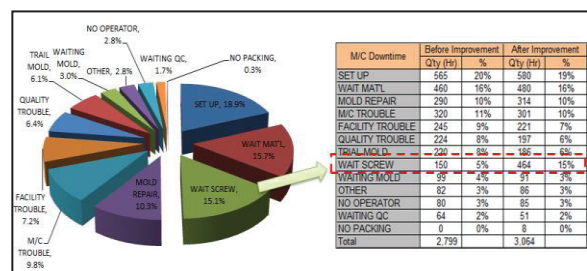


รูปที่ 3 ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นหลังการปรับปรุงปัญหาจุดค่า



รูปที่ 4 % Machine Utilization ของโรงงานกรณีศึกษา

สืบเนื่องจาก Machine Utilization เฉลี่ยที่ลดลง โดยภาพรวมของ Machine downtime ในหัวข้อการจอร์สกรูเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 10% และมาแยกดูปัญหาแต่ละหัวข้อพบว่ามีการจอร์สกรูเพิ่มขึ้นเฉลี่ยจาก 150 ชั่วโมง/เดือน เป็น 464 ชั่วโมง/เดือน (เพิ่มขึ้น 65%) ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เวลาที่ใช้ในการจอร์สกรู Machine downtime

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องหาวิธีการและ ค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมกับกระบวนการลดปัญหาจุดค่า เพื่อเป็นแนวทางที่เหมาะสม โดยที่ทางโรงงานกรณีศึกษา ต้องดูเรื่องค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นควบคู่กันไปด้วย เพื่อ ประยุกต์ใช้กับประเภทของงานฉีดพลาสติกเพื่อให้เกิด ความคุ้มค่าของงานที่แตกต่างกันออกไป

2.2 ระยะตรวจวัดปัญหา (Measure Phase)

ในขณะนี้จะทำ 2 ขั้นตอน คือ การวิเคราะห์ความ แม่นยำและความเที่ยงของระบบการวัด (Measurement System Analysis) และการวิเคราะห์และระบุปัญหา (Problem Identification Analysis)

2.2.1 การวิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการวัด

การวิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการวัด (Gage R&R) เพื่อตรวจสอบความแม่นยำและความเที่ยงตรงของระบบที่ใช้ในการเก็บข้อมูลเนื่องจากการประเมินความสอดคล้อง (Consistency) และความสม่ำเสมอ (Uniformity) ของระบบการวัดด้วยตาหรือความรู้สึกของพนักงาน [7] ดังนั้นจึงเพิ่มขั้นตอนวิเคราะห์ระบบการวัดดังนี้ (1) ให้ผู้จัดการฝ่ายคุณภาพเลือกตัวอย่างงานจากกระบวนการ 30 ชิ้น โดยต้องมีทั้งคุณภาพดี ไม่ดี และก้ำกึ่งกัน ในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน (2) ใช้พนักงาน 3 คน (พนักงานที่เลือกมาต้องเป็นพนักงานที่มีหน้าที่ประจำในการตรวจสอบคุณภาพในกระบวนการฉีดพลาสติก ซึ่งต้องผ่านการฝึกอบรมมาเป็นอย่างดี และผ่านการสอบประเมินแล้ว) (3) ให้พนักงาน 1 คนตรวจสอบชิ้นงานตัวอย่างงานอย่างสุ่ม ประเมินผล และบันทึกผล และทำการเลือกพนักงานคนถัดไปจนครบทุกคน (4) ให้พนักงานคนที่ 1-3 ดำเนินการตรวจสอบซ้ำอีก 1 ครั้ง ดังวิธีในข้อ (3) และ (5) ประเมินผลการวัดเนื่องจากวิธีการวัดนี้เป็นการวัดด้วยสายตาและความรู้สึกของพนักงาน ดังนั้นจึงต้องดำเนินการตามขั้นตอนอย่างเคร่งครัด หากมีชิ้นงานที่ไม่อาจหาข้อสรุปได้ว่าเป็นชิ้นงานดีหรือไม่ ต้องนำไปให้ลูกค้าเป็นผู้ตัดสิน เพื่อให้ได้ผลการวัดที่แม่นยำที่สุด โดยใช้เกณฑ์ในการยอมรับดังตารางที่ 1 โดยเกณฑ์การประเมินดังรูปที่ 6 และผลของระบบการวัดดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าพนักงานที่เลือกมาทั้ง 3 คนผ่านเกณฑ์ในการยอมรับที่ 100%

% Repeatability of Appraisers =	จำนวนครั้งที่การตรวจสอบเหมือนกัน
% Reproducibility of Appraisers =	จำนวนชิ้นงานที่ตรวจสอบ
% Effectiveness of Repeatability of Verification =	จำนวนครั้งที่การตรวจสอบได้เหมือนและถูกต้อง
% Effectiveness of Reproducibility of Verification =	จำนวนชิ้นงานที่พนักงานตรวจสอบได้
	จำนวนชิ้นงานที่ตรวจสอบ

รูปที่ 6 เกณฑ์การประเมินระบบการวัด

ตารางที่ 1 เกณฑ์ในการยอมรับของระบบการวัด

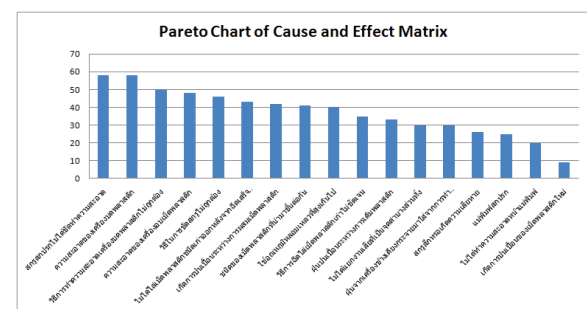
Index	Acceptance Criterion
% Repeatability of Appraisers	100%
% Reproducibility of Appraisers	100%
% Effectiveness of Repeatability of Verification	100%
% Effectiveness of Reproducibility of Verification	100%

ตารางที่ 2 ผลของระบบการวัด

Index	Appraiser 1	Appraiser 2	Appraiser 3	All Appraiser
% Repeatability of Appraisers	100%	100%	100%	
% Reproducibility of Appraisers	100%	100%	100%	
% Effectiveness of Repeatability of Verification				100%
% Effectiveness of Reproducibility of Verification				100%

2.2.2 การวิเคราะห์และระบุปัญหา

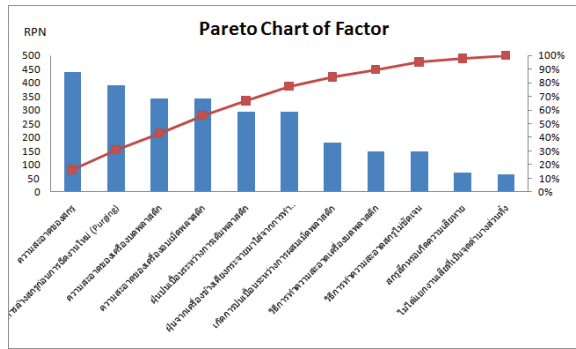
จากการระดมสมองจากทีมงานและพนักงานที่เกี่ยวข้องในโรงงานกรณีศึกษา เพื่อค้นหาสาเหตุและปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดปัญหาจุดดำโดยใช้แผนภูมิพาเรโต พบว่ามีทั้งหมด 17 ปัจจัย ดังแสดงในรูปที่ 7 นำไปวิเคราะห์ลักษณะข้อพร่องและผลกระทบ (FMEA) ดังตารางที่ 3 และได้้นำ 4 ปัจจัย ได้แก่ (1) การทำความสะอาดของสกรู (2) สารที่ใช้ในกระบวนการล้างกระบอกฉีด (3) ความสะอาดของเครื่องบดพลาสติกและ (4) ความสะอาดของเครื่องอบเม็ดพลาสติกที่มีคะแนนสูงเป็นอันดับที่ 1 ถึง 4 และทั้ง 4 ปัจจัยนี้มีผลรวมคะแนนความสำคัญ 56% ของปัจจัยที่เลือกไว้ทั้งหมด ดังรูปที่ 8 โดยปัจจัยที่ 5 และ 6 นั้นเกิดจากฝุ่นที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมและปัจจัยอื่น ๆ นั้นมีโอกาสเกิดน้อย และมีการควบคุมอยู่แล้ว จึงตัดออก และพิจารณาเพียง 4 ปัจจัยหลักเท่านั้น



รูปที่ 7 แผนภูมิพาเรโตเรียงตามคะแนนความสำคัญของเหตุและผล

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ FMEA

No.	แนวโน้มของข้อบกพร่อง	แนวโน้มผลกระทบของข้อบกพร่อง	SEV	สาเหตุของข้อบกพร่องที่คาดว่าจะเกิด	OCC	วิธีการป้องกันควบคุมกระบวนการ	DET	แนวทางปฏิบัติที่เสนอแนะ	RPN
1	ไม่ได้แยกงานเสียบางส่วนที่เป็นจุดค้ำทั้ง	ส่งผลให้จุดค้ำกลับเข้าสู่กระบวนการอีกครั้ง	7	พนักงานที่รวมกับงานเสียประเภทอื่น	3	จัดอุปกรณ์เพิ่มเติมในการคัดแยก ฝึกอบรมพนักงานให้เข้าใจ	3	ทำการแยกงานเสียจุดค้ำออกจากประเภทอื่นเพื่อนำไปตรวจสอบอีกครั้ง	63
2	ไม่ได้ทำความสะอาดหน้าแม่พิมพ์	สิ่งสกปรกปนเปื้อนเข้าไปกับชิ้นงาน	3	แม่พิมพ์สกปรก	3	กำหนดให้ทำความสะอาดหน้าแม่พิมพ์วันละ 1 ครั้ง	3	จัดทำบันทึกการทำความสะอาด	27
3	ไม่ได้ฉีดไล่เม็ดพลาสติกชนิดเก่าออกหลังจากฉีดเสร็จ	เม็ดพลาสติกใหม่ในกระบอกฉีด	8	พนักงานเกิดความผิดพลาด	2	อบรมขั้นตอนการทำงาน หลังการฉีดชิ้นงานเสร็จสิ้น	2	จัดทำบันทึกการ Purging	32
4	ใช้อุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงเกินไป	เม็ดพลาสติกใหม่ในกระบอกฉีด	8	พนักงานปรับพารามิเตอร์เกินค่ามาตรฐาน	2	ทำการทดสอบค่าสูงสุดที่สามารถยอมรับได้และไม่ส่งผลกับจุดค้ำ	2	ตั้งค่าสูงสุดจากเครื่องจักรเพื่อป้องกันการปรับเกินมาตรฐาน	32
5	ชนิดของเม็ดพลาสติกที่นำมาขึ้นคอกัน	สีและชนิดของเม็ดพลาสติกที่นำมาขึ้นคอกันไปส่งผลกับกระบวนการล้าง	5	พนักงานวางแผนขาดความเข้าใจและการวางแผนที่ชัดเจน	4	ฝึกอบรมพนักงานให้เข้าใจถึงลำดับของเม็ดพลาสติกที่ควรขึ้นคอกัน	3	จัดทำมาตรฐานและร้องขอการพิกัดของชุดการสั่งซื้อจากลูกค้าเพื่อจะได้วางแผนไว้ล่วงหน้า	60
6	เกิดการปนเปื้อนของเม็ดพลาสติกใหม่	เม็ดพลาสติกใหม่มีจุดค้ำจากการผลิต	3	ผู้ผลิตส่งของไม่ดียวให้	3	ตรวจสอบเม็ดพลาสติกใหม่ที่มาเข้าทุกครั้ง	3	จัดทำตัวอย่างเม็ดพลาสติกใหม่เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ	27
7	เกิดการปนเปื้อนระหว่างการผสมเม็ดพลาสติก	เม็ดพลาสติกมีการปนเปื้อนเข้าไปในกระบวนการจากการผสมเม็ดใหม่กับเม็ดคด	5	เกิดการปนเปื้อนของถังผสมที่ใช้ร่วมกันและการทำความสะอาดไม่เพียงพอ	6	อบรมขั้นตอนและวิธีการทำความสะอาดตามขั้นตอนอย่างชัดเจน	6	ใช้ระบบปิดและการผสมอัตโนมัติเพื่อลดการปนเปื้อนจากการใช้อุปกรณ์ร่วมกัน	180
8	สกรูไม่ได้ยึดทำความสะอาด	มีคราบเขม่าติดบริเวณสกรู	9	เกิดจากการเผาไหม้จากกระบวนการเกิดขึ้นในกระบอกฉีด	7	ทำการล้างกระบอกฉีดด้วยเม็ดพลาสติกสำหรับล้าง	7	ทำการถอดสกรูออกมาขัดทำความสะอาดตามขั้นตอนที่กำหนด	441
9	ความสะอาดของเครื่องบดพลาสติก	มีเศษพลาสติกชนิดอื่นปนเปื้อนเข้าไปในกระบวนการ	7	มีการใช้เครื่องบดพลาสติกร่วมกันหลายชนิดและการทำความสะอาดไม่ดีพอ	7	อบรมขั้นตอนและวิธีการทำความสะอาดตามขั้นตอนอย่างชัดเจน	7	ใช้ระบบปิดและการบดอัตโนมัติเพื่อลดการปนเปื้อนจากการใช้อุปกรณ์ร่วมกัน	343
10	ความสะอาดของเครื่องอบเม็ดพลาสติก	มีเศษพลาสติกชนิดอื่นปนเปื้อนเข้าไปในกระบวนการ	7	มีการใช้เครื่องอบเม็ดพลาสติกร่วมกันหลายชนิดและการทำความสะอาดไม่ดีพอ	7	อบรมขั้นตอนและวิธีการทำความสะอาดตามขั้นตอนอย่างชัดเจน	7	ใช้ระบบปิดและการอบอัตโนมัติเพื่อลดการปนเปื้อนจากการใช้อุปกรณ์ร่วมกัน	343
11	แม่พิมพ์สกปรก	คราบสกปรกจากแม่พิมพ์ปนเปื้อนไปติดชิ้นงาน	4	ไม่ได้ทำความสะอาดตามรอบเวลา	3	อบรมให้ทำความสะอาดแม่พิมพ์ตามเวลาที่กำหนด	3	จัดทำบันทึกการทำความสะอาด	36
12	สกรูสึกหรอ เกิดความเสียหาย	มีเศษพลาสติกไปเกาะติดสกรูบริเวณที่สึกหรอ	8	ระยะเวลาการใช้งานเป็นเวลานาน	3	จัดทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน	3	กำหนดความถี่ในการตรวจสอบก่อนการเกิดปัญหา	72
13	วิธีทำความสะอาดเครื่องบดพลาสติก	มีเศษพลาสติกชนิดอื่นหลงเหลือจากการทำความสะอาดไม่ดีพอ	5	ไม่ได้กำหนดวิธีการทำความสะอาดให้ชัดเจน	5	จัดอบรมวิธีการทำความสะอาดให้ชัดเจน	6	จัดทำขั้นตอนและวิธีการทำความสะอาดให้ชัดเจน	150
14	วิธีในการล้างกระบอกฉีดก่อนการฉีดงานใหม่ (Purging)	วิธีที่ใช้ทำความสะอาดไม่ได้ไม่เพียงพอ	8	เลือกใช้ชนิดของเม็ดที่ใช้ในการล้างไม่ดีพอ	7	ใช้เม็ดชนิด PP ในการล้าง	7	ใช้เม็ดชนิดพิเศษในการล้าง	392
15	วิธีในการทำความสะอาดสกรูไม่ชัดเจน	สกรูหลังการทำความสะอาดยังมีเศษพลาสติกหลงเหลือ	7	วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ไม่ดีพอ	3	ตรวจสอบก่อนประกอบชิ้นที่	7	จัดทำคู่มือการทำงานสะอาดให้ชัดเจน	147
16	ฝุ่นปนเปื้อนระหว่างการเติมพลาสติก	ฝุ่นปนเปื้อนเข้าไปในกระบวนการ	7	สภาพแวดล้อมของโรงงานกรณีศึกษา	6	ตรวจสอบสภาพแวดล้อมและพื้นที่ก่อนการเติม	7	ใช้ระบบอัดในมิติเพื่อลดการเติม	294
17	ฝุ่นจากเครื่องข้างเคียงกระจ่ายมาใส่จากการทำความสะอาด	ฝุ่นปนเปื้อนเข้าไปในกระบวนการ	7	พื้นที่การทำงานไม่ชัดเจน	6	จัดพื้นที่และวิธีการทำความสะอาดให้ชัดเจน	7	ใช้ระบบอัดในมิติเพื่อลดฝุ่นจากการทำความสะอาด	294



รูปที่ 8 กราฟพารโตเรียงตามลำดับปัจจัยตามค่า RPN

2.3 ระยะวิเคราะห์สาเหตุปัญหา (Analysis Phase)

จากการวิเคราะห์ FMEA พบว่าลำดับสูงสุด 4 ปัจจัยแรกที่มีผลต่อการเกิดจุดตำ ได้แก่ การถอดสกรูออกมาขัดทำความสะอาด การใช้สารเคมีช่วยในการล้างกระบอกฉีดก่อนการฉีดงานใหม่ ความสะอาดของเครื่องบดเม็ดพลาสติก และความสะอาดของเครื่องอบเม็ดพลาสติก ผู้วิจัยจึงนำปัจจัยเหล่านี้มาออกแบบการทดลองแบบ 2^k Factorial Design (เป็นรูปแบบการทดลองที่มีปัจจัยเพียง 2 ระดับ โดยกำหนดเป็น High และ Low นิยมใช้กับกรณีที่มีตัวแปรเป็นค่าต่อเนื่องและมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นเนื่องจากในการคำนวณรูปแบบจะสมมติให้ความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองในทุก ๆ ปัจจัยเป็นแบบเส้นตรงทั้งหมด) [8] ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้งส่งผลให้จำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 32 การทดลอง

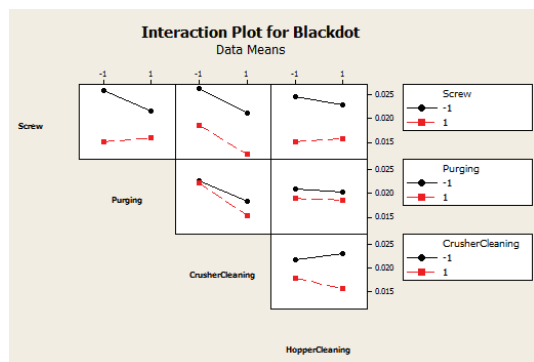
ตารางที่ 4 ระดับปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง 2^4 Factorial Design

Factors	Levels	
	Low (-1)	High (+1)
การทำความสะอาดของสกรู	ไม่ถอดขัด	ถอดขัด
สารที่ใช้ในกระบวนการล้างกระบอกฉีด (Purging)	เม็ดพลาสติก	เม็ดพลาสติกผสม
ความสะอาดของเครื่องบดพลาสติก	ใช้ร่วมกับเม็ดพลาสติกชนิดอื่น	ไม่ใช้ร่วมกับเม็ดพลาสติกชนิดอื่น
ความสะอาดของเครื่องอบเม็ดพลาสติก	ใช้ร่วมกับเม็ดพลาสติกชนิดอื่น	ไม่ใช้ร่วมกับเม็ดพลาสติกชนิดอื่น

โดยผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab สำหรับการลดจุดค่าแสดงผลดังรูปที่ 9 โดยปัจจัยหลัก 4 ปัจจัย ได้แก่ การถอดสกรูทำความสะอาด การใช้สารเคมีช่วยในการทำความสะอาดเม็ดพลาสติกที่คงค้างในกระบอกฉีด ความสะอาดของเครื่องบดผสมเม็ดพลาสติก และความสะอาดของเครื่องอบเม็ดพลาสติก มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกับการลดงานเสียประเภทจุดตำอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และมีอันตรกิริยาร่วมระหว่าง 4 ปัจจัย ดังรูปที่ 10 ได้แก่ การถอดสกรูออกมาขัดทำความสะอาดกับการใช้สารเคมีช่วยในการทำความสะอาดเม็ดพลาสติกที่คงค้างในกระบอกฉีด ความสะอาดของเครื่องบดผสมเม็ดพลาสติกกับความสะอาดของเครื่องอบเม็ดพลาสติก การใช้สารเคมีช่วยในการทำความสะอาดเม็ดพลาสติกที่คงค้างในกระบอกฉีดกับความสะอาดของเครื่องบดผสมเม็ดพลาสติก และการถอดสกรูออกมาขัดทำความสะอาดกับความสะอาดของเครื่องอบเม็ดพลาสติกนั้น ต่างมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Factorial Fit: Blackdot versus ScrewPolishinh, Purging, CrusherMethod, HopperMethod						
Estimated Effects and Coefficients for Blackdot (coded units)						
Term	Effect	Coeff	SE Coef	T	P	
Constant	0.019544	0.000252	77.45	0.000		
ScrewPolishinh	-0.008312	-0.004156	0.000252	-16.47	0.000	
Purging	-0.001763	-0.000881	0.000252	-3.49	0.003	
CrusherMethod	-0.005638	-0.002819	0.000252	-11.17	0.000	
HopperMethod	-0.000538	-0.000269	0.000252	-1.07	0.303	
ScrewPolishinh*Purging	0.002662	0.001331	0.000252	5.28	0.000	
ScrewPolishinh*CrusherMethod	-0.000413	-0.000206	0.000252	-0.82	0.426	
ScrewPolishinh*HopperMethod	0.001213	0.000606	0.000252	2.40	0.029	
Purging*CrusherMethod	-0.001412	-0.000706	0.000252	-2.80	0.013	
Purging*HopperMethod	0.000113	0.000056	0.000252	0.22	0.826	
CrusherMethod*HopperMethod	-0.001663	-0.000831	0.000252	-3.29	0.005	
ScrewPolishinh*Purging*CrusherMethod	-0.000463	-0.000231	0.000252	-0.92	0.373	
ScrewPolishinh*Purging*HopperMethod	0.000237	0.000119	0.000252	0.47	0.644	
ScrewPolishinh*CrusherMethod*HopperMethod	-0.000588	-0.000294	0.000252	-1.16	0.261	
Purging*CrusherMethod*HopperMethod	0.000313	0.000156	0.000252	0.62	0.544	
ScrewPolishinh*Purging*HopperMethod	-0.000037	-0.000019	0.000252	-0.07	0.942	
CrusherMethod*HopperMethod						
S = 0.00142741 PRESS = 0.0001304						
R-Sq = 96.68% R-Sq(pred) = 86.70% R-Sq(adj) = 93.56%						
Analysis of Variance for Blackdot (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	4	0.00083419	0.00083419	0.00020855	102.16	
ScrewPolishinh	1	0.00055278	0.00055278	0.00055278	271.30	
Purging	1	0.00002485	0.00002485	0.00002485	12.20	
CrusherMethod	1	0.00025425	0.00025425	0.00025425	124.79	
HopperMethod	1	0.00000231	0.00000231	0.00000231	1.13	
2-Way Interactions	6	0.00010801	0.00010801	0.00001800	8.83	
ScrewPolishinh*Purging	1	0.00005671	0.00005671	0.00005671	27.83	
ScrewPolishinh*CrusherMethod	1	0.00000136	0.00000136	0.00000136	0.67	
ScrewPolishinh*HopperMethod	1	0.00001176	0.00001176	0.00001176	5.77	
Purging*CrusherMethod	1	0.00001596	0.00001596	0.00001596	7.83	
Purging*HopperMethod	1	0.00000010	0.00000010	0.00000010	0.05	
CrusherMethod*HopperMethod	1	0.00002211	0.00002211	0.00002211	10.85	
3-Way Interactions	4	0.00000571	0.00000571	0.00000143	0.70	
ScrewPolishinh*Purging*CrusherMethod	1	0.00000171	0.00000171	0.00000171	0.84	
ScrewPolishinh*Purging*HopperMethod	1	0.00000045	0.00000045	0.00000045	0.22	
ScrewPolishinh*CrusherMethod*HopperMethod	1	0.00000276	0.00000276	0.00000276	1.36	
Purging*CrusherMethod*HopperMethod	1	0.00000078	0.00000078	0.00000078	0.38	
4-Way Interactions	1	0.00000001	0.00000001	0.00000001	0.01	
ScrewPolishinh*Purging*CrusherMethod*HopperMethod	1	0.00000001	0.00000001	0.00000001	0.01	
Residual Error	16	0.00003260	0.00003260	0.00000204		
Pure Error	16	0.00003260	0.00003260	0.00000204		
Total	31	0.00098052				

รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัยที่มีผลต่อจุดตำ



รูปที่ 10 ผลกระทบของปัจจัยร่วมที่มีผลต่อจุดดำ

2.4 ระยะปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improvement Phase: Design of Experiment)

จากระยะที่แล้วพบว่า ปัจจัยทุกตัวมีผลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ต่อการเกิดจุดดำ ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลจากการทดลองต่อ ซึ่งจากสมการ Regression ดังรูปที่ 9 สรุปได้ว่า สำหรับระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้จำนวนของเสียประเภทจุดดำเกิดน้อยที่สุด คือ การถอดสกรูชุดทำความสะอาดตามขั้นตอน การใช้สารเคมีในกระบวนการล้างกระบอกฉีด การใช้เครื่องบดพลาสติกที่ไม่ใช้ร่วมกับเม็ดพลาสติกชนิดอื่น และการใช้เครื่องอบเม็ดพลาสติกที่ไม่ใช้ร่วมกับเม็ดพลาสติกชนิดอื่น

หลังจากนั้น ทำการทดลองเพื่อยืนยันผลกับระดับของปัจจัยที่เลือกในการลดจุดดำ โดยจะต้องใช้เครื่องฉีดพลาสติกชนิดและขนาดเดียวกันแม่พิมพ์ชนิดเดียวกันที่ถูกค้ำอนุมิติ เม็ดพลาสติกชนิดและ Batch เดียวกัน และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฉีดของเครื่องฉีดเหมือนกัน โดยผลการทดลองดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 จำนวนจุดดำหลังการปรับปรุง

เครื่องจักร	จำนวนที่ผลิต (ชิ้น)	จำนวนของเสีย (ชิ้น)	% จุดดำ
A-08	2,080	26	1.25
A-09	2,100	26	1.24
เฉลี่ย	2,090	26	1.25

2.5 ระยะควบคุมกระบวนการ (Control Phase)

จากผลที่ได้ในระบะปรับปรุงพบว่า จำนวนจุดดำที่ลดลงเท่ากับ 50% เมื่อเทียบกับจำนวนจุดดำก่อนการปรับปรุง โดยเมื่อนำจำนวนของเสียที่ลดได้ในแต่ละวิธีเทียบกับค่าใช้จ่ายที่ใช้ไปในแต่ละวิธีได้ พบว่าขั้นตอนการถอดสกรูชุดทำความสะอาดจะให้ผลการลดจุดดำได้มากที่สุดที่ 50% เทียบกับก่อนแก้ไขจากข้อมูลทางด้านสถิติ ดังรูปที่ 11

Index	จำนวนชิ้นงานที่ฉีด	จำนวนจุดดำที่พบ
1. สกรูที่ไม่ได้ถอดชุด	1,000	28
2. สกรูที่ถอดชุด	1,000	13

Test and CI for Two Proportions:

Event = OK

C1	X	N	Sample p
1	972	1000	0.972000
2	987	1000	0.987000

Difference = p (1) - p (2)
 Estimate for difference: -0.015
 95% CI for difference: (-0.0274032, -0.00259682)
 Test for difference = 0 (vs not = 0): Z = -2.37 P-Value = 0.018
 Fisher's exact test: P-Value = 0.026

รูปที่ 11 จำนวนจุดดำที่ลดลงจากการทดลองและวิเคราะห์ทางสถิติ

โดยค่าใช้จ่ายประเมินได้ดังนี้ค่าใช้จ่ายในการถอดสกรูชุดทำความสะอาด = (ค่าเครื่องจักร (บาทคูณชั่วโมง) + ค่าแรงในการถอด (บาทคูณชั่วโมง) + ค่าล่วงเวลา (บาทคูณชั่วโมง) + ค่าขนส่ง (เฉลี่ยบาทต่อเดือน) + ค่าอุปกรณ์ที่ใช้ (บาทต่อครั้ง) + ค่าการเริ่มต้นการดำเนินงานใหม่ (บาทคูณชั่วโมง)) โดยค่าเครื่องจักร ค่าแรง และค่าล่วงเวลานั้นจะคิดตามเกณฑ์มาตรฐานของโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งโรงงานอื่น ๆ สามารถนำค่าใช้จ่ายที่ประเมินไว้ข้างต้นไปปรับใช้ให้เหมาะสมกับเงื่อนไขของแต่ละโรงงานได้

เนื่องจากค่าใช้จ่ายจากการถอดสกรูชุดทำความสะอาดค่อนข้างสูงและเสียเวลาการผลิต ผู้วิจัยเห็นว่าวิธีนี้เหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่มีราคาต่อหน่วยค่อนข้างสูงหรือชิ้นงานที่มียอดการผลิตจำนวนมาก เช่น จากข้อมูลโรงงานกรณีศึกษาชิ้นงานฝาครอบหม้อหุงข้าว ราคาขายอยู่ที่ชิ้นละ 5.50 บาท สามารถผลิตได้วันละ 10,000 ชิ้น มีแผนการผลิตอยู่ที่เดือนละ 120,000 ชิ้น และในแต่ละวันพบปริมาณของเสียประเภทจุดดำอยู่ที่ 2.75% (ก่อนการถอดสกรูชุด) โดยเมื่อนำต้นทุนค่าใช้จ่ายในการถอดสกรูล้าง จะประมาณ

3,000 บาทต่อครั้ง โดยหลังจากทำการปรับปรุงด้วยวิธีการต่าง ๆ ตามที่ทำการศึกษ เมื่อเทียบกันแล้ว วิธีที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานและจำนวนการผลิตประเภทนี้ คือ การถอดสกรูชุดทำความสะอาด

วิธีที่สอง คือ กระบวนการล้างกระบอกฉีดพลาสติก (Purging) โดยวิธีนี้จะให้ผลการลดจุดตำได้ประมาณ 25% โดยที่ค่าใช้จ่ายสำหรับวิธีนี้จะเพิ่มตามส่วนของค่าเม็ดพลาสติกชนิดพิเศษที่ใช้ในกระบวนการล้างกระบอกก่อนการฉีดพลาสติกเท่านั้น ซึ่งน้อยกว่าวิธีแรกมาก ส่งผลให้วิธีนี้เหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีราคาต่อหน่วยอยู่ในระดับปานกลางและเวลาที่ใช้ในการผลิตไม่นานมาก โดยการเลือกวิธีในการลดจุดตำเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพเชิงต้นทุนมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 12

ตัวอย่างการเลือกประเภทงานเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพเชิงต้นทุน

จากรูปที่ 12 ตัวอย่างที่ 1 จุดตำที่ประเมินได้คือ 2.75% จากการทดลอง หากใช้วิธีขัดสกรูจะลดจุดตำได้ประมาณ 50% และวิธี Purging ลดได้ประมาณ 25% ดังนั้นหากชิ้นงานตามตัวอย่างที่ 1 หากเลือกวิธีขัดสกรูจะมีค่าใช้จ่ายเกิดจากการขัด 3,000 บาท + ของเสีย $(1,350 \times 0.55 = 743)$ โดยหากเลือกวิธี Purging จะเสียค่าใช้จ่ายเฉพาะของเสียที่เกิดขึ้น

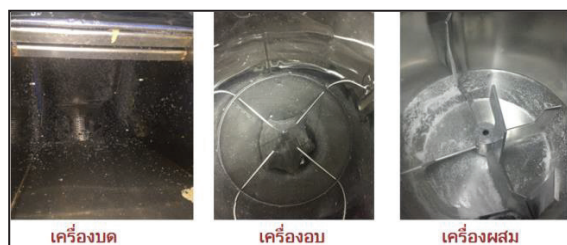
โดยค่าใช้จ่ายในการถอดชุดสกรู $= (300 \times 6) + (50 \times 6) + (75 \times 2) + 500 + 100 + 150 = 3,000$ บาท (ค่าเครื่องจักรนาที่ละ 5 บาท เงินเดือนพนักงานชั่วโมงละ 50 บาท ค่าขนส่งที่ต้องเพิ่มขึ้นเฉลี่ยครั้งละ 500 บาท ค่าอุปกรณ์และสาธารณูปโภคอื่น ๆ เฉลี่ยครั้งละ 100 บาท และค่าการเริ่มการฉีดงานใหม่ 30 นาที คิดเป็นเงิน 150 บาท)

ตัวอย่างที่	ปริมาณการผลิต (ชิ้น)	ราคาต่อหน่วย (บาท)	% NG ที่พบ		ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น	
			วิธีขัดสกรู	วิธี Purging	วิธีขัดสกรู (บาท)	วิธี Purging (บาท)
1	100,000	0.55	1.35%	2.36%	3,743	1,298
2	40,000	12.5	1.35%	2.36%	9,750	11,800
3	120,000	5.5	1.35%	2.36%	11,910	15,576
4	15,000	2.5	1.35%	2.36%	3,506	885

หมายเหตุ : 1. ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นด้วยวิธีขัดสกรูจะต้องบวกค่าใช้จ่ายในการขัดด้วย โดยในกรณีของโรงงานกรณีศึกษาอยู่ที่ 3,000 บาทต่อครั้ง
2. % NG นั้นอาจจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับงานแต่ละประเภท

รูปที่ 12 ตัวอย่างค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นแต่ละวิธีและการเลือกวิธีการให้เหมาะสมกับงานต่างชนิดกัน

และสุดท้ายระบบการทำความสะอาดซึ่งจากเดิมมีการใช้เครื่องบดเม็ดพลาสติกและเครื่องอบเม็ดพลาสติกกับพลาสติกที่ต่างชนิดและต่างสีกัน ซึ่งในบางครั้งการทำความสะอาดที่ไม่ดีพอหรือไม่ถูกต้องอาจส่งผลให้เม็ดพลาสติกต่างชนิดกันสามารถปนเปื้อนเข้าไปได้ ดังรูปที่ 13 โดยในงานวิจัยนี้ โรงงานกรณีศึกษาทำการลงทุนติดตั้งเครื่องบดและเครื่องอบเม็ดพลาสติกที่เป็นระบบปิด (แยกตามชนิดของเม็ดพลาสติกเพื่อลดขั้นตอนการทำความสะอาดออกไป) และการใช้ระบบอัตโนมัติ (ทำการบดกันพลาสติกหลังจากออกมาจากเครื่องฉีดพลาสติกและนำส่งไปยังเครื่องผสมเพื่อทำการผสมก่อนนำไปฉีดอีกครั้ง ซึ่งสามารถลดขั้นตอนและการปนเปื้อนเม็ดพลาสติกต่างชนิดกันที่เป็นต้นเหตุของจุดตำได้) เพื่อลดการใช้ถึงผสมเม็ดพลาสติกใหม่กับเม็ดพลาสติกบดต่างชนิดกัน ซึ่งเป็นต้นเหตุของการปนเปื้อนส่งผลไปยังการเกิดจุดตำซึ่งค่าใช้จ่ายอยู่ที่ประมาณ 150,000 บาทโดยวิธีนี้เป็นการลงทุนระยะยาว การเปลี่ยนมาใช้ระบบปิดและระบบอัตโนมัตินี้สามารถลดได้ทั้งจุดตำที่อาจเกิดจากการทำความสะอาดที่ไม่ดีพอหรือการปนเปื้อนจากการใช้เครื่องบดเครื่องเดียวกัน และยังสามารถลดแรงงานที่ใช้ในการบดผสมเม็ดพลาสติกและในการทำความสะอาดอีกด้วย ซึ่งโรงงานกรณีศึกษาได้ประเมินจุดคุ้มทุนที่ 2 ปี (ลดพนักงานลงได้ 2 คนโดยขยายผลการใช้ระบบอัตโนมัติกับชิ้นงานที่ไม่มีปัญหาจุดตำด้วย) โดยขั้นตอนและกระบวนการทำงานของระบบเดิมนั้นต้องทำการแยก Runner มาบดข้างนอก (ใช้พนักงาน) นำไปผสมในถังผสม (ใช้พนักงาน) และนำไปเติมที่เครื่องอบ (ใช้พนักงาน) ดังรูป 14 โดยระบบการฉีดพลาสติกและการจัดการกับก้านพลาสติกแบบเดิมดังรูปที่ 15 และเปรียบเทียบกับระบบอัตโนมัติดังรูปที่ 16 และ 17



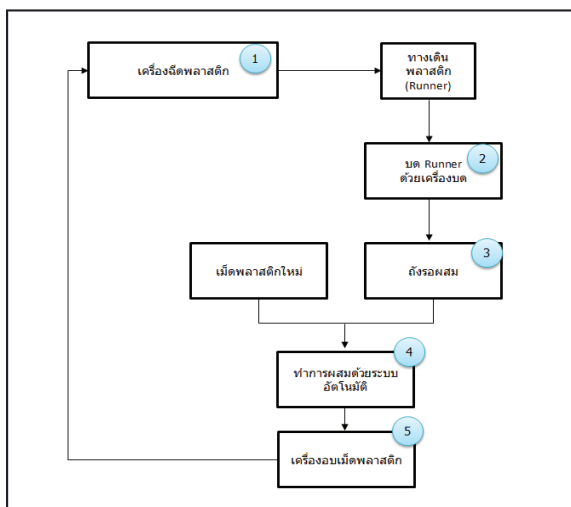
รูปที่ 13 เศษพลาสติกที่อาจปนเปื้อนในกระบวนการ



รูปที่ 14 กระบวนการคัดแยกและชั่งพลาสติก
ที่ต้องใช้พนักงาน



รูปที่ 15 ระบบการคัดพลาสติกและกระบวนการแบบเดิม

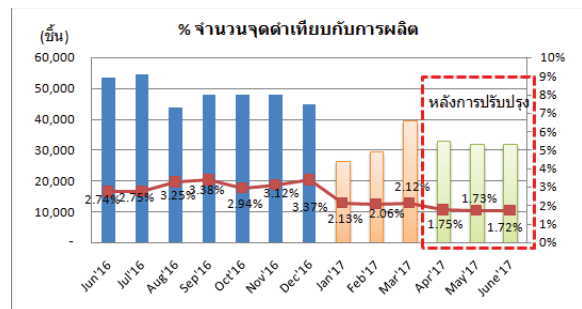


รูปที่ 16 กระบวนการทำงานด้วยระบบอัตโนมัติ

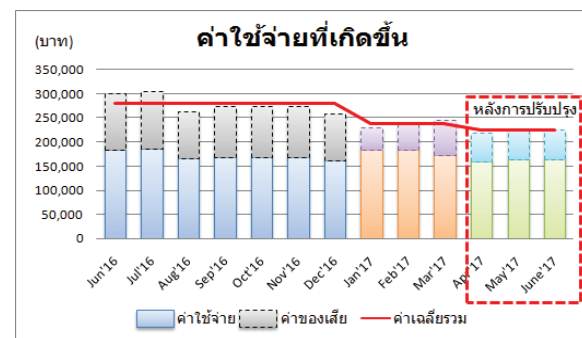


รูปที่ 17 กระบวนการทำงานด้วยระบบอัตโนมัติของ
โรงงานการศึกษา

หลังจากการปรับปรุงกระบวนการทั้งหมด จำนวน
จุดค่าเฉลี่ยลดลงอยู่ที่ 1.73% ซึ่งจะเห็นได้ว่า % จุดค่าจาก
การทดลองนั้นลดลงได้ทั้งหมดอยู่ที่ 1.25% ดังรูปที่ 18
แต่เนื่องจากทางโรงงานการศึกษาเลือกใช้วิธีที่เหมาะสม
กับค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น จึงจะมองในมุมมองของค่าใช้จ่าย
ควบคู่กันไปด้วย โดยค่าใช้จ่ายที่ลดลงหลังจากการเลือกใช้
วิธีที่เหมาะสมดังรูป 19

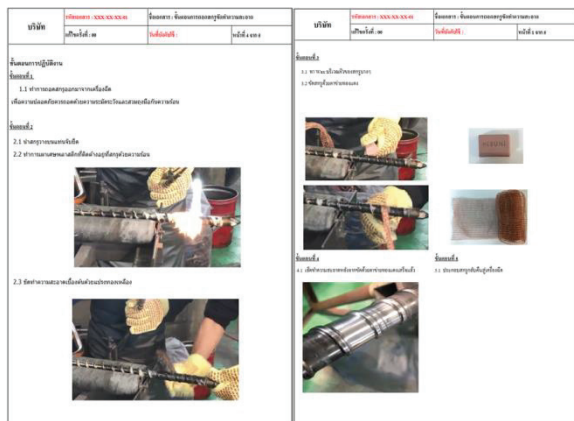


รูปที่ 18 จำนวนจุดค่าที่ลดลงหลังการปรับปรุง



รูปที่ 19 ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นหลังจากการเลือกใช้วิธีที่
เหมาะสม

โดยจัดทำคู่มือการปฏิบัติงานและจัดฝึกอบรมพนักงานให้ตระหนักและเข้าใจถึงความสำคัญของกระบวนการและวิธีในการแก้ไขปัญหาจุดดำดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 คู่มือการทำความสะอาดสกรูแบบใหม่ที่ใช้ดาวยทองแดงและ Wax แทนการใช้แปรงทองเหลือง

3. สรุป

ทฤษฎีซิกซ์ซิกม่าซึ่งประกอบด้วยขั้นตอน (Six Sigma) Define, Measure, Analyze, Improve และ Control (DMAIC) สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตร่วมกับเครื่องมือต่าง ๆ ได้แก่ Cause and Effect Diagram, Cause and Effect Matrix FMEA และการออกแบบการทดลอง (Factorial Design) ในการค้นหาสาเหตุ วิเคราะห์สาเหตุ และคัดกรองปัจจัยที่ก่อให้เกิดปัญหาขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากการดำเนินการดังกล่าว จะทำให้ทราบถึงต้นตอของปัญหาและมีแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยงานวิจัยนี้ทำให้สามารถเลือกใช้กระบวนการที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่ต่างชนิดและต่างเงื่อนไขกัน อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมพลาสติกเพื่อช่วยเพิ่มคุณภาพและลดต้นทุนในกระบวนการของแต่ละโรงงาน

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษาสำหรับความร่วมมือในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Shahada, T.M. and Alsyoud, I. Design and Implementation of a Lean Six Sigma Framework for Process Improvement: a Case Study. International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, December 10-13, 2012.
- [2] Aboelmaged, M. G. Six Sigma quality: A Structure Review and Implications for Future Research. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2010; 27(3): 268-317.
- [3] De Souza, R. V. B. and Carpinetti, L. C. R.A FMEA Base Approach to Prioritize Waste Reduction in Lean Implementation. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2014; 31(4): 346-366.
- [4] Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [5] Jirasukprasert, P., Garza-Reyes, A.J., Soriano-Meier, H. and Rocha-Lona, L. A Case Study of Defects Reduction in a Rubber Gloves Manufacturing Process by Applying Six Sigma Principles and DMAIC Problem Solving Methodology. International Conference on Industrial Engineering and Operation Management, Istanbul, Turkey, July 3 – 6, 2012.
- [6] Lyu, J. and Chen, M. N. Gauge Capability Studies for Attribute Data. *Quality and Reliability Engineering International*, 2008; 24(1): 71-82.
- [7] สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น. การออกแบบการทดลอง. 2560; [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www.tpa.or.th>
- [8] สรารัตน์ ชาลีกัน. การลดค่าความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลในกระบวนการอบแห้งโดยใช้แนวทางซิกซ์ซิกม่า. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2561; 25(2): 106-112.



ผลกระทบของอัตราส่วนไอออนประจุบวกที่มีต่อกลไก การแลกเปลี่ยนไอออนของการฉีดอัดน้ำเกลือที่มีความเค็มต่ำ ในแหล่งกักเก็บหินทราย

The Effects of Cation Ratios on Ion Exchange Mechanism of Low Salinity Waterflooding in Sandstone Reservoirs

ชนะพล เจริญธนาวรกุล¹ และ ฟัลัน ศรีสุริยชัย²

Chanapol Charoentanaworakun¹ and Falan Srisuriyachai²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

²ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

¹Department of Mining and Petroleum Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

239 Huay Kaew Road, Muang District, Chiang Mai, 50200 Thailand

²Department of Mining and Petroleum Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

254 Phrayathai Road, Pathumwan, Bangkok, 10330 Thailand

¹E-mail: chanapolc@hotmail.com, Tel.: +66971218142

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษากับผลกระทบของการรบกวนระหว่างไอออนประจุบวก 4 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไอออน โพแทสเซียมไอออน แคลเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออนที่มีต่อกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนในน้ำเกลือและไอออนที่เกาะบนพื้นผิวของหินทราย ซึ่งเป็นกลไกที่มีความสำคัญในการเพิ่มผลผลิตน้ำมัน งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการทดลองโดยการเปลี่ยนอัตราส่วนความเข้มข้นของไอออนประจุบวกในน้ำเกลือที่ใช้แทนที่น้ำมัน ทั้งสิ้น 5 ค่า ได้แก่ 1:0, 4:1, 1:1, 1:4 และ 0:1 แล้วทำการวัดปริมาณของน้ำมันที่ถูกแทนที่จากการใช้น้ำเกลือสูตรต่าง ๆ จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออนอยู่ในอัตราส่วน 1:1 จะทำให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันมีค่าสูงที่สุดซึ่งเท่ากับ 45.25 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างไอออนประจุบวกสองกับน้ำมันที่พื้นผิวของหินน้อยที่สุด ในขณะที่การใช้น้ำเกลือที่มีอัตราส่วนระหว่างโซเดียมไอออนต่อโพแทสเซียมไอออนเท่ากับ 1:1 จะทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุด กล่าวคือ ได้ผลผลิตน้ำมัน 40.11 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากได้รับผลกระทบน้อยที่สุดจากการถูกจำกัดปริมาณการเกาะบนพื้นผิวของไอออนประจุบวกหนึ่งแต่ละชนิดไม่ให้มากเกินไป จึงทำให้เกิดกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าค่าอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างโซเดียมไอออนกับแคลเซียมไอออนเท่ากับ 4:1 เป็นค่าที่ทำให้ทั้งกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนของไอออนประจุบวกหนึ่งและกลไกการเกิดเป็น

Received 15 February 2018

Revised 6 August 2018

Accepted 8 August 2018

สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนประจุบวกสองสามารถเกิดขึ้นได้ดี จึงส่งผลให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันที่ได้มีค่าสูงสุดที่ 38.38 เปอร์เซ็นต์

ABSTRACT

This research presents about the effect of ion interference among sodium ion, potassium ion, calcium ion and magnesium ion on the oil recovery mechanism, which is the exchange between ions in displaced brine and ions adsorbed on sandstone surface. The experiment is performed by varying proportions of cations in the displacing brine into 5 ratios, i.e. 1:0, 4:1, 1:1, 1:4, and 0:1, and measuring the recovered oil amount from the different brine formulas. The result shows that when the concentration ratio between calcium ion and magnesium ion is 1:1, the highest oil recovery of 45.25% is obtained due to the least linkage between oil and divalent cations at the sandstone surface. Meanwhile, the brine with the ratio between sodium ion and potassium ion of 1:1 can displace the highest quantity of oil at the recovery factor of 40.11% due to the smallest impact from the limitation of each monovalent cation adsorption, which results in the greatest cation exchange mechanism. Moreover, it can be found that the ratio between sodium ion and calcium ion of 4:1 in the displacing brine will establish good effectiveness of both ion exchange mechanism and carboxylate complex reaction, therefore it can yield the highest value of oil recovery at 38.38%

1. บทนำ

การอัดฉีดน้ำเกลือที่มีความเค็มสูงในแหล่งกักเก็บน้ำมัน (Conventional or High Salinity Water flooding) เป็นวิธีการเพิ่มผลผลิตน้ำมันที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในแหล่งกักเก็บหินทราย เนื่องจากน้ำที่ผลิตขึ้นมาพร้อมกับน้ำมันฉีดอัดเข้าไปในแหล่งกักเก็บเพื่อทำให้ความดันในแหล่งกักเก็บไม่ต่ำเกินไปจนไม่สามารถผลิตน้ำมันได้ จึงเป็นวิธีการที่ไม่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและดำเนินการไม่ยุ่งยากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเพิ่มผลผลิตน้ำมันด้วยสารเคมีหรือวิธีอื่น ๆ

อย่างไรก็ดี ในงานวิจัยหลาย ๆ ฉบับที่ผ่านมาพบว่าการปรับแต่งน้ำเกลือที่ใช้ในการอัดฉีดเข้าไปในแหล่งกักเก็บโดยการเจือจางเพื่อลดความเค็มของน้ำเกลือสามารถเพิ่มผลผลิตน้ำมันได้มากกว่าการฉีดอัดน้ำเกลือที่มีความเค็มสูง ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า การฉีดอัดน้ำเกลือที่มีความเค็มต่ำ (Low Salinity Waterflooding) เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงทางสมดุลของไอออนในน้ำเกลือและไอออนที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของหินทราย

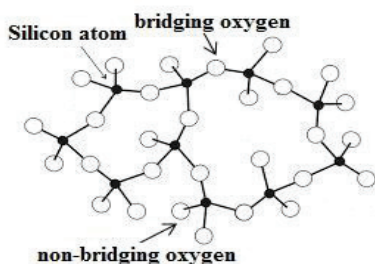
แม้ว่าการเจือจางความเค็มของน้ำเกลือจะช่วยเพิ่มผลผลิตน้ำมัน แต่จากการศึกษาล่าสุดพบว่าการเจือจางน้ำเกลือโดยการผสมน้ำที่ผลิตขึ้นมา กับน้ำจืดเพียงอย่างเดียวไม่ทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด เนื่องจากไอออน

ประจุบวกในน้ำเกลือซึ่งได้แก่ ไอออนประจุบวกหนึ่ง (monovalent cation) เช่น โซเดียมไอออน (Na^+) และ โพแทสเซียมไอออน (K^+) รวมทั้งไอออนประจุบวกสอง (divalent cation) เช่น แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และ แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) มีบทบาทสำคัญต่อการแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งส่งผลต่อปริมาณน้ำมันที่ผลิตได้จากการฉีดอัดน้ำเกลือความเค็มต่ำในแหล่งกักเก็บหินทราย งานวิจัยฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการรบกวนของไอออนประจุบวกหนึ่งและไอออนประจุบวกสองในน้ำเกลือที่ใช้ในการอัดฉีด ซึ่งจะมีส่วนช่วยเติมเต็มงานวิจัยที่เกี่ยวข้องฉบับที่ผ่านมาที่ศึกษาผลกระทบของไอออนประจุบวกหนึ่งหรือไอออนประจุบวกสองเพียงประเภทเดียว นอกจากนี้งานวิจัยฉบับนี้ได้เพิ่มเติมในส่วนของการไทเทรต เพื่อวัดปริมาณของไอออนประจุบวกสองอันได้แก่ แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และ แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) เพื่ออธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไอออนกับกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งเกิดจากการฉีดอัดน้ำเกลือความเค็มต่ำในแหล่งกักเก็บหินทราย

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

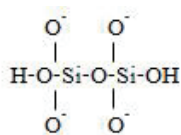
2.1 คุณสมบัติทางเคมีของพื้นผิวหินทราย

หินทรายประกอบด้วยโมเลกุลของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลของหินทรายแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของหินทราย [1]

โมเลกุลของซิลิกอนไดออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำเกลือซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol group) เป็นหมู่ฟังก์ชัน อันมีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อนตามทฤษฎีของ เบรินสเตด-ลาวรี (Bronsted-Lowry acid) จากโครงสร้างโมเลกุลของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล ซึ่งแสดงในรูปที่ 2 จึงส่งผลให้พื้นผิวของหินทรายสามารถเกิดแรงดึงดูดกับสารประกอบในน้ำมันที่มีฤทธิ์เป็นเบส เช่น หมู่เอมีน (Amine group) อย่างไรก็ตามในธรรมชาติพบว่าสารประกอบในน้ำมันมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน ฉะนั้นน้ำมันในธรรมชาติจึงไม่เกาะกับพื้นผิวของหินทราย ส่งผลให้หินทรายมีสภาพความเปียกเป็นแบบเปียกด้วยน้ำ (water-wet) ถึงความเปียกแบบเป็นกลาง (neutral-wet) [2]



รูปที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล

2.2 การเปลี่ยนแปลงสถานะการเปียกของหินทราย (Wettability Alteration)

โดยแรกเริ่มหินทรายในแหล่งกักเก็บน้ำมันจะมีสภาพความเปียกเป็นแบบเปียกด้วยน้ำ (water-wet)

เนื่องจากกระบวนการกลายเป็นหินของหินทรายส่วนใหญ่พบในแหล่งน้ำ จึงทำให้น้ำเป็นของเหลวชนิดแรกที่อยู่ในรูพรุนของหิน อย่างไรก็ตาม น้ำมันอาจจะเข้ามาแทนที่น้ำในระดัคมาได้ และสามารถเปลี่ยนสภาพความเปียกของหินถ้าสารประกอบในน้ำมันที่มีสภาพขั้วเป็นขั้วบวก (positively-charged) เช่น การปรากฏของสารหมู่อะมีน (amine group) เกิดแรงดึงดูดกับขั้วลบ (negative charge) ที่อยู่บนพื้นผิวของหินทราย ทำให้สภาวะการเปียกของหินทรายเปลี่ยนจากสภาพความเปียกด้วยน้ำ (water-wet) เป็นสภาพความเปียกด้วยน้ำมัน (oil-wet) [3]

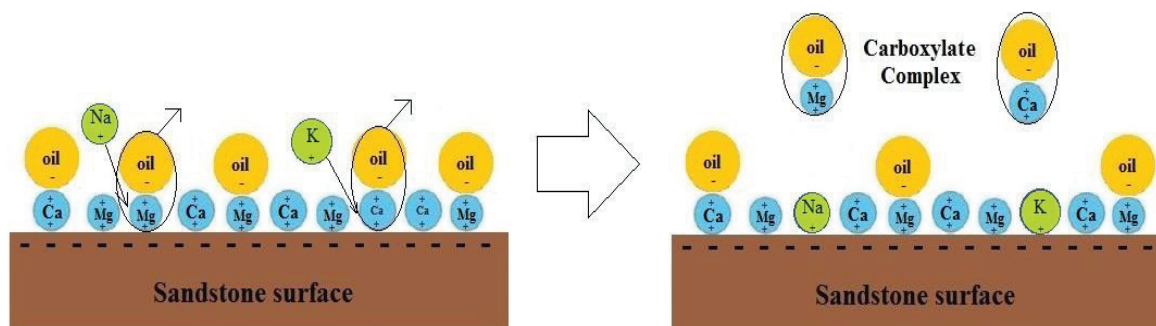
นอกจากนี้ไอออนประจุบวกสอง (divalent cation) ในน้ำยังสามารถเป็นตัวเชื่อมให้สารประกอบในน้ำมันที่มีสภาพขั้วเป็นขั้วลบ (negatively-charged) เช่น สารหมู่คาร์บอกซิล (carboxylic group) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันหลักที่พบในน้ำมัน ดึงดูดกับขั้วลบที่อยู่บนพื้นผิวของหินทราย จนเปลี่ยนสภาวะการเปียกเป็น สภาวะเปียกน้ำมัน [4]

2.3 กลไกการแลกเปลี่ยนไอออน (Multicomponent Ion Exchange, MIE)

กลไกการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดจากความสามารถในการเกาะบนพื้นผิวของหินทรายของไอออนบวกในน้ำเกลือที่ไม่เท่าเทียมกัน ซึ่งทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนในน้ำเกลือและไอออนที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของหินเดิมจนเกิดสมดุลทางเคมี จากการศึกษาของ Lager et. al [5] พบว่าความเข้มข้นและชนิดของไอออนบวกในน้ำเกลือที่ใช้ในการฉีดอัดส่งผลให้สัดส่วนระหว่างการดูดซับบนพื้นผิว (adsorption) และการคายการดูดซับ (desorption) ของไอออนแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่นจากรูปที่ 3 โดยแรกเริ่มไอออนประจุบวกสอง (divalent cation) อันได้แก่ แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ทำหน้าที่เชื่อมระหว่างขั้วลบของสารประกอบในน้ำมันกับขั้วลบที่อยู่บนพื้นผิวของหินทราย จากนั้นไอออนประจุบวกหนึ่ง (monovalent cation) อันได้แก่ โซเดียมไอออน (Na^+) และโพแทสเซียมไอออน (K^+) แพร่เข้ามาใกล้กับพื้นผิวของหินทรายและเกิดการแทนที่ไอออนประจุบวกสอง

อันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสมดุลของไอออน เนื่องด้วย ไอออนประจุบวกหนึ่งดึงดูดกับพื้นผิวของหินเพียง อย่างเดียวโดยที่ไม่ดึงดูดกับไอออนลบของสารประกอบ

ในน้ำมัน จึงทำให้ผลผลิตน้ำมันเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก ปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของหินลดน้อยลง



รูปที่ 3 กลไกการเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนในการเพิ่มผลผลิตน้ำมันจากการอัดฉีดน้ำเกลือที่มีความเค็มต่ำ

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

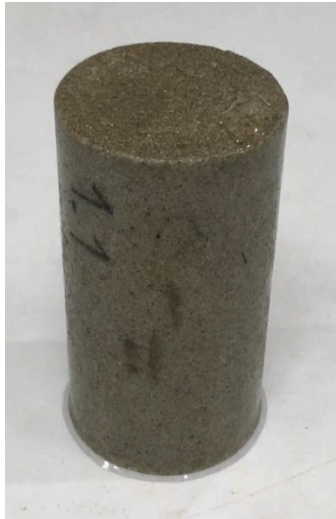
Nasralla และ Nasr-El-Din [6] ได้ทำการศึกษา เกี่ยวกับการฉีดอัดน้ำเกลือที่มีความเค็มต่ำ (Low Salinity Waterflooding) โดยการฉีดอัดน้ำเกลือที่มีเกลือชนิด เดียวเข้าไปในหินทราย Berea และพบว่าน้ำเกลือที่ ประกอบด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) ให้ผลผลิต น้ำมันสูงที่สุด ในขณะที่น้ำเกลือที่ประกอบด้วยแคลเซียม คลอไรด์ ($CaCl_2$) ให้ผลผลิตน้ำมันต่ำที่สุด นอกจากนี้ ยังพบว่า การเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำเกลือไม่ส่งผลต่อ ปริมาณน้ำมันที่ผลิตได้มากนัก จึงสรุปได้ว่า ชนิดของ ไอออนบวกในน้ำเกลือมีผลกระทบมากกว่าการเจือจาง น้ำเกลือเพียงอย่างเดียว เช่นเดียวกับ Ayoub และคณะ [7] ก็ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับหัวข้อนี้โดยการวัดการ เปลี่ยนแปลงมุมสัมผัส (contact angle) ของของเหลว ในหินที่แช่ในน้ำเกลือสูตรต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบการ เปลี่ยนแปลงสภาพความเปียก (wettability alteration) จากสภาพความเปียกด้วยน้ำมัน (oil-wet) มาเป็นสภาพ ความเปียกด้วยน้ำ (water-wet) และสรุปว่าไอออนบวก ที่ว่องไวต่อการเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนมากที่สุด คือ

โพแทสเซียมไอออน (K^+) ตามมาด้วย โซเดียมไอออน (Na^+) ในขณะที่ไอออนประจุบวกสอง (divalent cation) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพความเปียก น้อยที่สุด ในขณะที่ Muchalintamolee และ Srisuriyachai [8-10] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการ เปลี่ยนแปลงสภาพความเปียก ของหินทรายที่ใช้น้ำเกลือที่ มีความเค็มต่ำสูตรต่างๆในการแทนที่น้ำมัน และได้เสนอ ว่าปริมาณของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ในน้ำเกลือที่ มากเกินไปจะทำให้ได้ผลผลิตน้ำมันลดน้อยลง อย่างไรก็ ตามปริมาณของ แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ก็ควรไม่มาก เกินไปเช่นกัน ในขณะที่การเพิ่มปริมาณโซเดียมไอออน (Na^+) ในน้ำเกลือจะช่วยทำให้ไอออนประจุบวกสองถูก แทนที่ได้มากยิ่งขึ้น

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 หินตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง คือ หินทราย Berea จำนวน 4 ตัวอย่างดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4 ซึ่งคุณสมบัติของหินตัวอย่างจะแสดงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4 ตัวอย่างของหินทรายที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2 โดเดเคน (Dodecane) ผสมกับกรดโอเลอิก (Oleic acid) ในอัตราส่วน 1,000 กรัม ของโดเดเคนต่อ 25.17 กรัม ของกรดโอเลอิกซึ่งทำให้ค่าความเป็นกรด (acid number) เท่ากับ 5 เพื่อจำลองให้สารประกอบในน้ำมันมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อนและถูกดูดซับบนพื้นผิวของหินทรายจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะการเปียกของหิน

ทราย (Wettability alteration) อันเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นได้บ่อยในธรรมชาติ

3.1.3 น้ำเกลือดั้งเดิมในชั้นหิน (Formation brine) ที่ทำการผสมจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกลือโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เกลือแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เกลือแมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) เกลือโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) และเกลือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โดยใช้ปริมาณไอออนต่าง ๆ จากแหล่งน้ำที่อ้างอิงในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งมีความเข้มข้นของไอออนต่าง ๆ ตามตารางที่ 1

3.1.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สารละลายบัฟเฟอร์ของแอมโมเนียและเกลือแอมโมเนียมคลอไรด์ ($\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl}$ buffer solution) สารละลายเกลืออีดีทีเอ (Ethylenediamine tetra acetate, EDTA) อินดิเคเตอร์อีริโอโครมแบลคที (Eriochrome black T indicator) และอินดิเคเตอร์ไฮดรอกซีแนปทอลบลู (Hydroxynaphthol blue indicator) ซึ่งใช้ในการไทเทรตหาปริมาณแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+})

ตารางที่ 1 ปริมาณของไอออนแต่ละชนิดใน Formation brine 1 ลิตร ที่ความเค็ม 100,000 ppm

เกลือ	โมล	เปอร์เซ็นต์โดยโมล	น้ำหนัก (กรัม)	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
NaCl	1.411	89.84	82.48	82.48
MgCl_2	0.018	1.17	1.75	1.75
CaCl_2	0.089	5.65	9.85	9.85
KCl	0.007	0.42	0.49	0.49
NaHCO_3	0.019	1.19	1.57	1.57
Na_2SO_4	0.027	1.73	3.85	3.85
รวม	1.571	100.00	100.00	100.00

3.2 การเตรียมหินตัวอย่างและจำลองให้หินตัวอย่างมีลักษณะเป็นแหล่งกักเก็บน้ำมัน

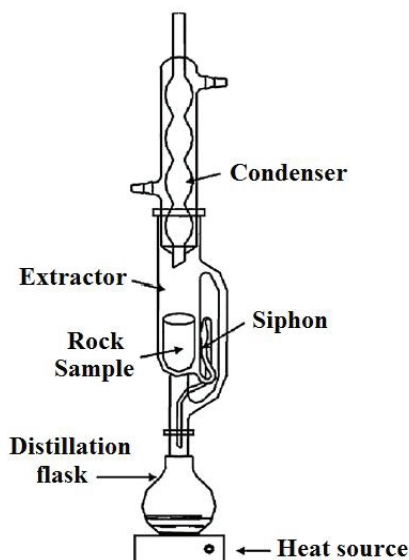
3.2.1 หินตัวอย่างถูกทำความสะอาดโดยใช้เครื่องทำความสะอาดหิน (Soxhlet) ซึ่งมีลักษณะเป็นหอกล้นโทลูอีน (Toluene) ดังแสดงในรูปที่ 5 จากนั้น หินจะถูกอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 60°C จนโทลูอีนระเหยหมด

จากนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว และน้ำหนักแห้งของหินแต่ละตัวอย่างจะถูกบันทึกไว้เพื่อใช้ในการคำนวณในลำดับถัดไป

3.2.2 หินตัวอย่างจะถูกฉีดอัดด้วยน้ำเกลือดั้งเดิมในชั้นหิน (Formation brine) จนเต็มทั่วทั้งตัวอย่างโดยใช้อุปกรณ์จำลองการแทนที่ด้วยของไหลในตัวอย่างหิน

(Coreflooding equipment) ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยสามารถสังเกตได้จากกรณีที่น้ำไม่พบฟองอากาศในท่อขาออก และไม่เกิดการแกว่งของค่าความต่างของความดัน

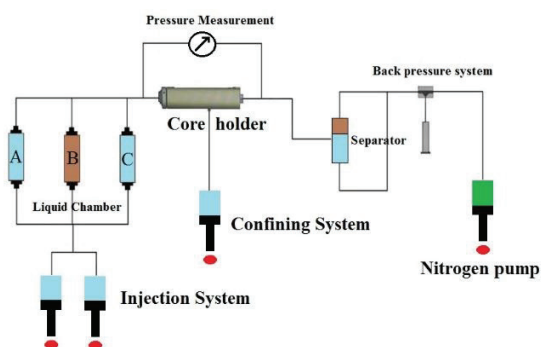
(pressure difference) จากนั้นตัวอย่างหินจะถูกซั่งน้ำหนักเปียกเพื่อคำนวณหาค่าความพรุนของหิน (porosity) ดังปรากฏอยู่ในตารางที่ 2



รูปที่ 5 ส่วนประกอบของเครื่องทำความสะอาดหิน (Soxhlet) [11]

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของหินตัวอย่าง

ตัวอย่างหิน หมายเลข	ความยาว (ซม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (ซม.)	น้ำหนักแห้ง (กรัม)	ปริมาตรของ รูพรุน (ซม. ³)	ความพรุนของหิน (Porosity, %)
1	12.66	3.78	301.93	26.70	18.79
2	12.69	3.76	298.12	29.60	21.00
3	12.68	3.77	297.59	28.33	20.00
4	12.68	3.77	295.36	29.02	20.49



รูปที่ 6 ส่วนประกอบของอุปกรณ์จำลองการแทนที่ด้วยของไหลในตัวอย่างหิน (Coreflooding equipment)

3.2.3 ในขั้นตอนถัดไป หินตัวอย่างจะถูกฉีดอัดด้วยน้ำมันที่มีฤทธิ์เป็นกรด (acid oil) ซึ่งเป็นการผสมระหว่าง

โดเดเคน (Dodecane) กับกรดโอเลอิก (Oleic acid) เพื่อเข้าไปแทนที่น้ำเกลือที่อยู่ในหิน อย่างไรก็ตามจะมี

ปริมาณน้ำส่วนหนึ่งที่ไม่สามารถแทนที่ได้ (irreducible water) คงเหลืออยู่ ปริมาณน้ำที่ถูกแทนที่และไหลออกมาได้จะถูกบันทึกไว้เพื่อนำไปคำนวณหาค่า irreducible water saturation ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำที่ไม่ถูกแทนที่ต่อปริมาณของรูพรุนของหิน อย่างไรก็ตาม หลังจากการฉีดอัดน้ำมันเข้าไปในหิน หินตัวอย่างจะถูกแช่อยู่ในน้ำมันที่มีฤทธิ์เป็นกรดเป็นเวลา 1 สัปดาห์เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพความเปียก (wettability alteration) อย่างสมบูรณ์

3.3 การหาปริมาณน้ำมันที่ผลิตได้

หินตัวอย่างที่ผ่านการแช่น้ำมันที่มีฤทธิ์เป็นกรด (acid oil) เป็นเวลา 1 สัปดาห์ซึ่งเป็นการจำลองให้หินตัวอย่างมีลักษณะเป็นแหล่งกักเก็บน้ำมันจะถูกนำไปแช่น้ำเกลือสูตรต่าง ๆ ที่มีความเข้มข้นของไอออนบวกแตกต่างกันเป็นเวลา 2 สัปดาห์ โดยที่น้ำหนักของหินที่เพิ่มขึ้นจากการแทนที่โดยน้ำเกลือจะถูกบันทึกไว้ในทุกวัน เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณน้ำมันที่ผลิตได้จากค่าความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของน้ำกับน้ำมัน

3.4 การไทเทรตหาปริมาณแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+})

3.4.1 วิธีการหาความกระด้างของน้ำซึ่งเป็นปริมาณของไอออนประจุบวกสองทั้งแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ทำได้จากการนำน้ำตัวอย่างที่ต้องการหาความกระด้างมาเติมด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ของแอมโมเนียและเกลือแอมโมเนียมคลอไรด์ ($\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl}$ buffer solution) จำนวน 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นใส่อินดิเคเตอร์อีริโอโครมแบล็คที (Eriochrome black T indicator) จนได้สารละลายสีเหมือนไวน์แดงแล้วทำการไทเทรตด้วยสารละลายเกลืออีดีทีเอ (Ethylenediamine tetra acetate, EDTA) จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีฟ้าเข้มซึ่งเป็นจุดยุติของการไทเทรต

3.4.2 วิธีการหาปริมาณของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ทำได้จากการนำน้ำตัวอย่างที่ต้องการหาปริมาณ

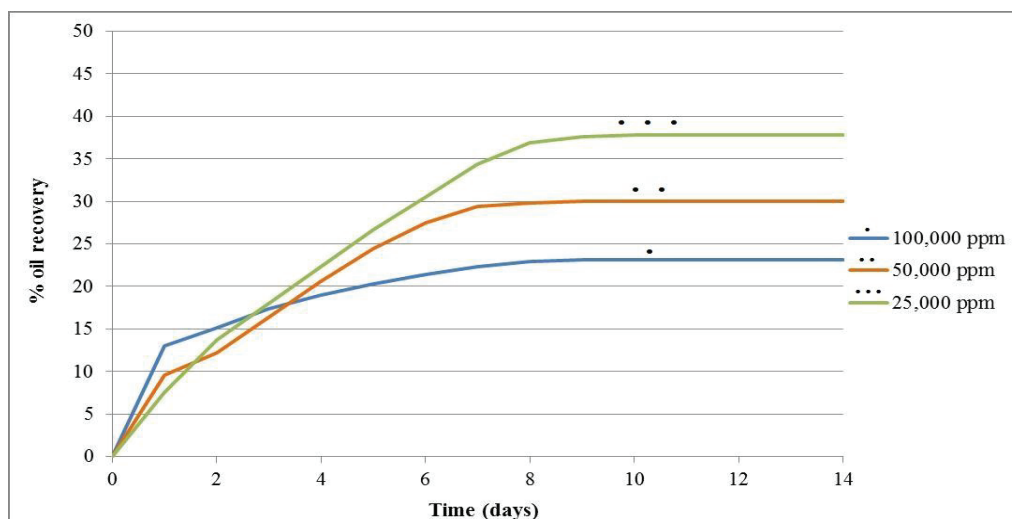
ไอออนมาเติมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรจำนวน 30 หยด และคนให้เข้ากันเพื่อให้แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ตกตะกอนจนหมด จากนั้นใส่อินดิเคเตอร์ไฮดรอกซีแนฟโธลบลู (Hydroxynaphthol blue indicator) เพียงเล็กน้อย ก็จะได้สารละลายสีเหมือนไวน์แดงแล้วทำการไทเทรตด้วยสารละลายเกลืออีดีทีเอ (Ethylenediamine tetra acetate, EDTA) จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีฟ้าเข้มซึ่งเป็นจุดยุติของการไทเทรต

3.4.3 การหาปริมาณของแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) คำนวณจากปริมาณไอออนประจุบวกสองทั้งหมดจากการหาความกระด้างของน้ำลบด้วยปริมาณของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+})

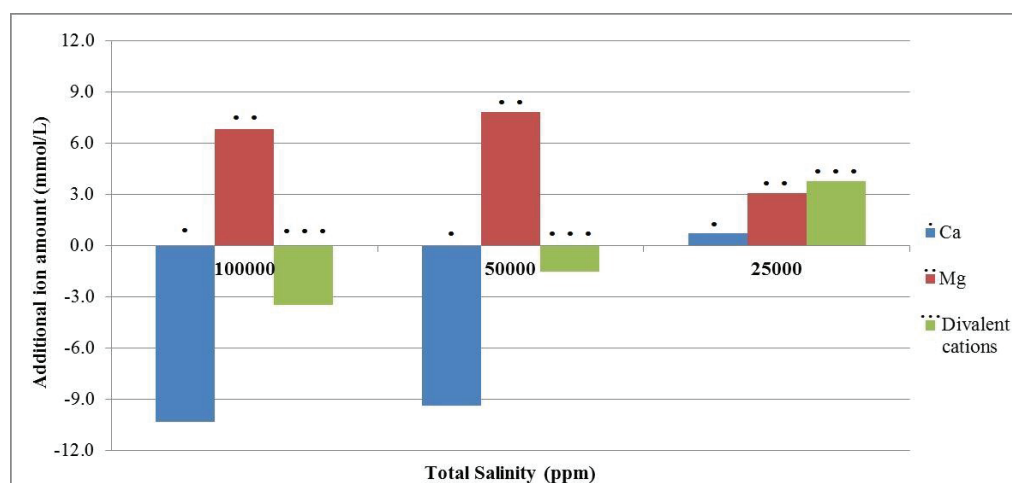
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลของค่าความเค็ม (Total salinity) ของน้ำเกลือที่ใช้ในการแทนที่น้ำมัน

การทดลองในหัวข้อนี้เริ่มต้นจากการใช้น้ำเกลือที่มีความเค็มสูง ซึ่งมีความเข้มข้นเดียวกับน้ำเกลือดั้งเดิมในชั้นหิน (Formation brine) ในการแช่หินเพื่อแทนที่น้ำมันในหิน โดยใช้ค่าปริมาณไอออนในน้ำเกลือในตารางที่ 1 จากนั้นได้ทำการเจือจางความเค็มของน้ำเกลือที่ใช้แช่หินจากความเข้มข้น 100,000 ppm จนเหลือความเข้มข้น 50,000 ppm และ 25,000 ppm ด้วยการผสมน้ำเกลือความเข้มข้น 100,000 ppm กับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:1 และ 1:3 ตามลำดับเพื่อไม่ให้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแต่ละไอออนเปลี่ยนแปลงจากเดิม จากการทดลอง ได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำมันที่ถูกแทนที่ในช่วงเวลาต่าง ๆ กับค่าความเค็มของน้ำเกลือในหน่วย ppm ดังแสดงในรูปที่ 7 นอกจากนี้ยังได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนประจุบวกสอง (divalent cation) ที่เพิ่มขึ้นในน้ำเกลือที่ใช้แช่หินกับค่าความเค็มของน้ำเกลือดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำมันที่ถูกแทนที่ในช่วงเวลาต่าง ๆ กับค่าความเค็มของน้ำเกลือที่ใช้แช่หิน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนประจุบวกสอง (divalent cation) ที่เพิ่มขึ้นในน้ำเกลือที่ใช้แช่หินกับค่าความเค็มของน้ำเกลือ

จากรูปที่ 7 จะพบว่าเมื่อค่าความเค็มของน้ำเกลือลดลง จะทำให้ปริมาณน้ำมันที่ออกมาจากหินเพิ่มมากขึ้น ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่น้ำเกลือที่มีความเค็มต่ำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของไอออนประจุบวกที่เกาะบนพื้นผิวของหินทรายโดยเกิดการแพร่ของไอออนที่เกาะอยู่บนชั้นหินซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่ามายังน้ำเกลือที่ใช้ในการแช่หินที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า อันเนื่องมาจากน้ำเกลือดั้งเดิมในชั้นหิน (Formation brine) มีความเข้มข้นสูงกว่า อันเป็นการเหนี่ยวนำให้ไอออนประจุบวกสอง (divalent cation) ที่เคยเชื่อมระหว่างสารประกอบในน้ำมันที่เป็นประจุลบกับพื้นผิวของหินทรายหลุดออกมาจากชั้นหิน

จึงทำให้ปริมาณน้ำมันที่ออกมาจากหินเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสามารถสังเกตได้จากปริมาณไอออนประจุบวกสองที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 8) โดยพบว่า ปริมาณไอออนประจุบวกสองในน้ำเกลือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำเกลือลดลงเนื่องจากเกิดการแพร่ของไอออนตามที่ได้กล่าวมา อย่างไรก็ตามจะพบว่า ที่ความเข้มข้น 50,000 ppm ปริมาณไอออนประจุบวกสองมีค่าลดลง เพราะว่ามีไอออนประจุบวกสองสามารถเกิดพันธะกับหมู่คาร์บอกซิล (carboxylic group) ในน้ำมันจนก่อตัวเป็นสารประกอบโลหะอินทรีย์ (organometallic compound) ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเสถียร ส่งผลให้น้ำมัน

ไม่กลับไปเกาะที่พื้นผิวอีก จึงเป็นกลไกหนึ่งในการพาน้ำมันออกมาจากหินแหล่งกักเก็บ (Lager et. al) [5] ดังจะเห็นได้จากไอออนประจุบวกสองที่อยู่ในน้ำเกลือบางส่วนหายไปอย่างไรก็ตาม Zahid et. al [12] ได้เสนอว่าการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ $90^{\circ}C$ ขึ้นไป) แต่เนื่องจากการทดลองนี้ทำที่อุณหภูมิห้อง จึงเป็นไปได้ว่าแมกนีเซียมไอออนสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้น้อยมากเมื่อเทียบกับการแพร่ของแมกนีเซียมไอออนจากน้ำเกลือดั้งเดิมในชั้นหินมายังน้ำเกลือที่ใช้ในการแช่หิน จึงทำให้ปริมาณของแมกนีเซียมไอออนในน้ำเกลือที่แช่หินมีปริมาณเพิ่มขึ้น

4.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมไอออนต่อแมกนีเซียมไอออน ($Ca^{2+} : Mg^{2+}$) ในน้ำเกลือที่ใช้ในการแทนที่น้ำมัน

ในส่วนนี้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมไอออนต่อแมกนีเซียมไอออน ($Ca^{2+} : Mg^{2+}$) ในน้ำเกลือ

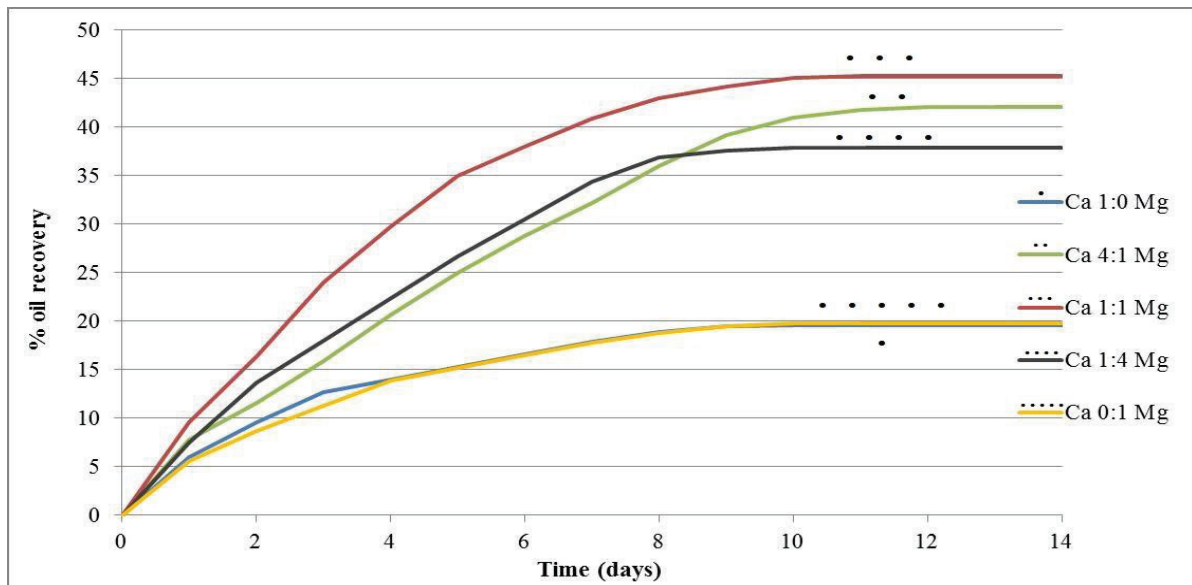
ที่ใช้แช่หินจะถูกปรับเปลี่ยนเป็น 5 อัตราส่วน คือ 1:0, 4:1, 1:1, 1:4 และ 0:1 โดยที่ความเข้มข้นของน้ำเกลือในทุกอัตราส่วนเท่ากับ 25,000 ppm และปริมาณของไอออนชนิดอื่น (Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-}) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบจากไอออนชนิดอื่น อย่างไรก็ตามเพื่อให้ความเข้มข้นของน้ำเกลือคงที่ในทุกอัตราส่วน ปริมาณของคลอไรด์ไอออน (Cl^-) จึงเป็นไอออนที่มีการปรับเปลี่ยน แต่เนื่องจากในน้ำเกลือมีปริมาณคลอไรด์ไอออนอยู่มาก และในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไม่มีการพบผลกระทบของคลอไรด์ไอออน ฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอไรด์ไอออนเพียงเล็กน้อยจึงไม่น่าจะทำให้แนวโน้มของผลการทดลองแตกต่างจากเดิม ซึ่งจะได้ปริมาณของไอออนในน้ำเกลือสูตรต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณของไอออนในน้ำเกลือ 1 ลิตร ที่มีอัตราส่วนระหว่าง $Ca^{2+} : Mg^{2+}$ แตกต่างกัน (หน่วย ppm)

0.1	อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง $Ca^{2+} : Mg^{2+}$				
	1:0	4:1	1:1	1:4	0:1
Na^+	8,531	8,531	8,531	8,531	8,531
K^+	64	64	64	64	64
Ca^{2+}	1,047	862	564	236	0
Mg^{2+}	0	131	342	573	740
Cl^-	14,420	14,474	14,562	14,658	14,727
HCO_3^-	286	286	286	286	286
SO_4^{2-}	652	652	652	652	652

โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำมันที่ถูกแทนที่ในช่วงเวลาต่าง ๆ กับอัตราส่วน

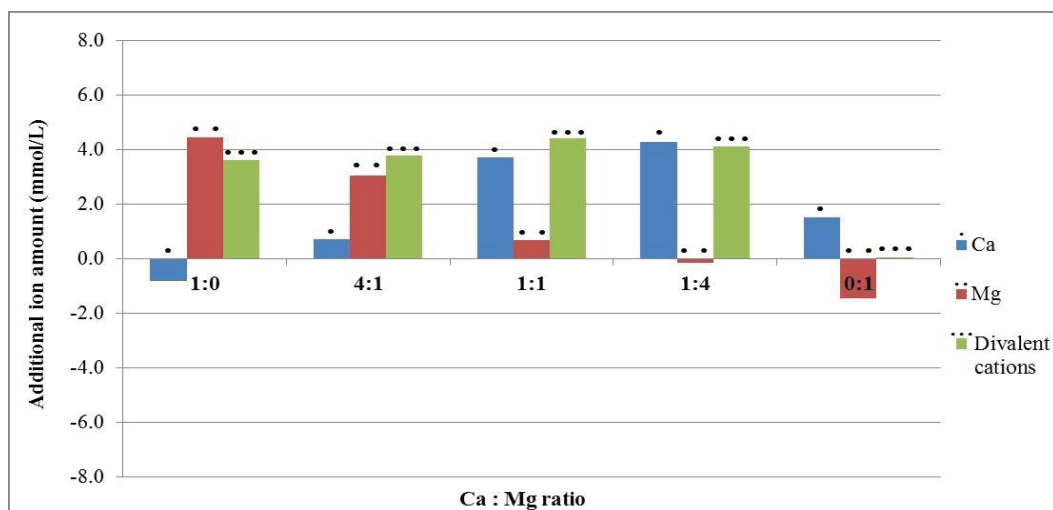
ระหว่างแคลเซียมไอออนต่อแมกนีเซียมไอออน ($Ca^{2+} : Mg^{2+}$) ในน้ำเกลือที่ใช้แช่หิน สามารถแสดงได้ในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำมันที่ถูกแทนที่ในช่วงเวลาต่าง ๆ กับค่าอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมไอออนต่อแมกนีเซียมไอออน ($\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$) ของน้ำเกลือที่ใช้แช่หิน

จากรูปที่ 9 จะสังเกตเห็นว่าที่อัตราส่วนของแคลเซียมไอออนต่อแมกนีเซียมไอออน ($\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$) เท่ากับ 1:1 ปริมาณของน้ำมันที่ถูกแทนที่มีค่ามากที่สุด จากนั้นมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อปริมาณของไอออนใดไอออนหนึ่งโดดเด่นกว่าอีกไอออนหนึ่ง จนน้อยที่สุดเมื่อน้ำเกลือมีไอออนอยู่เพียงชนิดเดียว ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อปริมาณของแคลเซียมไอออนในน้ำเกลือมากเกินไป

จะทำให้เกิดการแพร่ของแคลเซียมไอออนเข้าใกล้พื้นผิวของหินทรายจนเกิดการนำพาให้สารประกอบในน้ำมันเชื่อมกับพื้นผิวของหินทรายมากยิ่งขึ้น อันจะเห็นได้จากการลดลงของปริมาณแคลเซียมไอออนในน้ำเกลือที่มีอัตราส่วนของแคลเซียมไอออนต่อแมกนีเซียมไอออน ($\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$) เท่ากับ 1:0 ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนประจุบวกสอง (divalent cation) ที่เพิ่มขึ้นในน้ำเกลือที่ใช้แช่หินกับอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมไอออนต่อแมกนีเซียมไอออน ($\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$) ของน้ำเกลือที่ใช้แช่หิน

อย่างไรก็ตามจะพบว่าที่อัตราส่วนของแคลเซียมไอออนต่อแมกนีเซียมไอออน ($\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$) เท่ากับ 1:4 ซึ่งปริมาณของแมกนีเซียมไอออนมีค่ามากกว่าในน้ำเกลือดั้งเดิมในชั้นหิน (Formation brine) เริ่มเกิดการลดลงของปริมาณแมกนีเซียมไอออน ในขณะที่ในน้ำเกลือที่มีอัตราส่วนของแคลเซียมไอออนต่อแมกนีเซียมไอออน ($\text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+}$) เท่ากับ 0:1 ปริมาณของแคลเซียมไอออนที่ออกจากหินมีค่าไม่มากตามแนวโน้มที่ควรจะเป็น เนื่องจากความเข้มข้นของไอออนประจุบวกสองที่อัตราส่วนนี้มีค่ามากที่สุด เพราะแมกนีเซียมมีมวลโมเลกุลน้อยกว่าแคลเซียมไอออน จึงเป็นไปได้ว่าแคลเซียมไอออนมีแนวโน้มที่จะเกาะบนพื้นผิวมากกว่าละลายออกมาในน้ำเกลือ จนทำให้ปริมาณน้ำมันที่ออกมาได้มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด

4.3 ผลของอัตราส่วนระหว่างโซเดียมไอออนต่อโพแทสเซียมไอออน ($\text{Na}^+ : \text{K}^+$) ในน้ำเกลือที่ใช้ในการแทนที่น้ำมัน

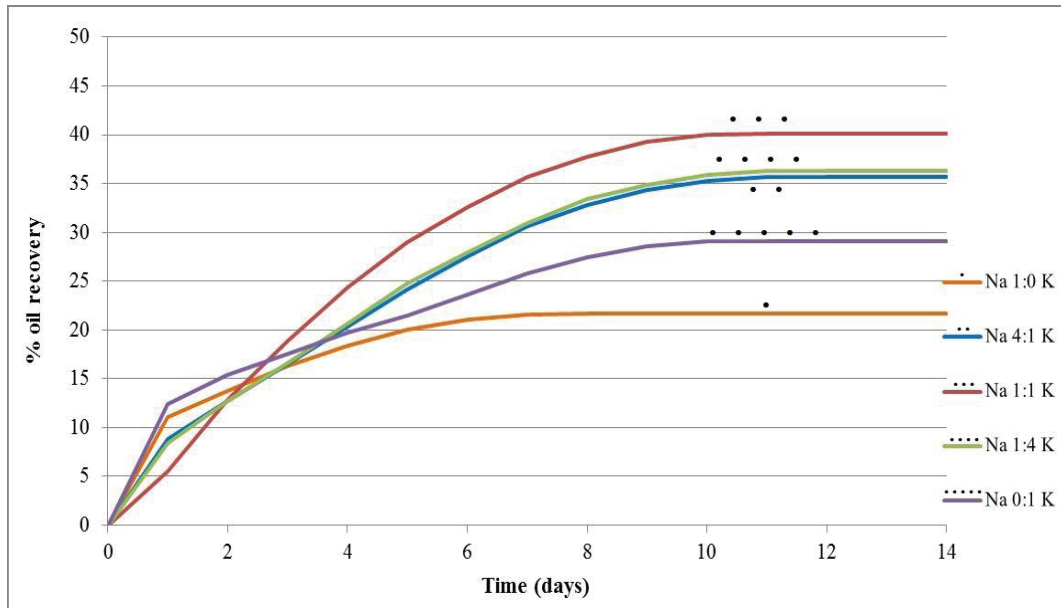
ในการศึกษาหัวข้อนี้จะทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลระหว่างโซเดียมไอออนต่อโพแทสเซียมไอออน ($\text{Na}^+ : \text{K}^+$) ในน้ำเกลือที่ใช้แช่หินเป็น 5 อัตราส่วน คือ 1:0, 4:1, 1:1, 1:4 และ 0:1 โดยที่ความเข้มข้นของน้ำเกลือในทุกอัตราส่วนเท่ากับ 25,000 ppm และปริมาณของไอออนชนิดอื่น (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-}) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเหมือนกับในหัวข้อก่อนหน้านี้ ซึ่งจะได้ปริมาณของไอออนในน้ำเกลือสูตรต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณของไอออนในน้ำเกลือ 1 ลิตร ที่มีอัตราส่วนระหว่าง $\text{Na}^+ : \text{K}^+$ แตกต่างกัน (หน่วย ppm)

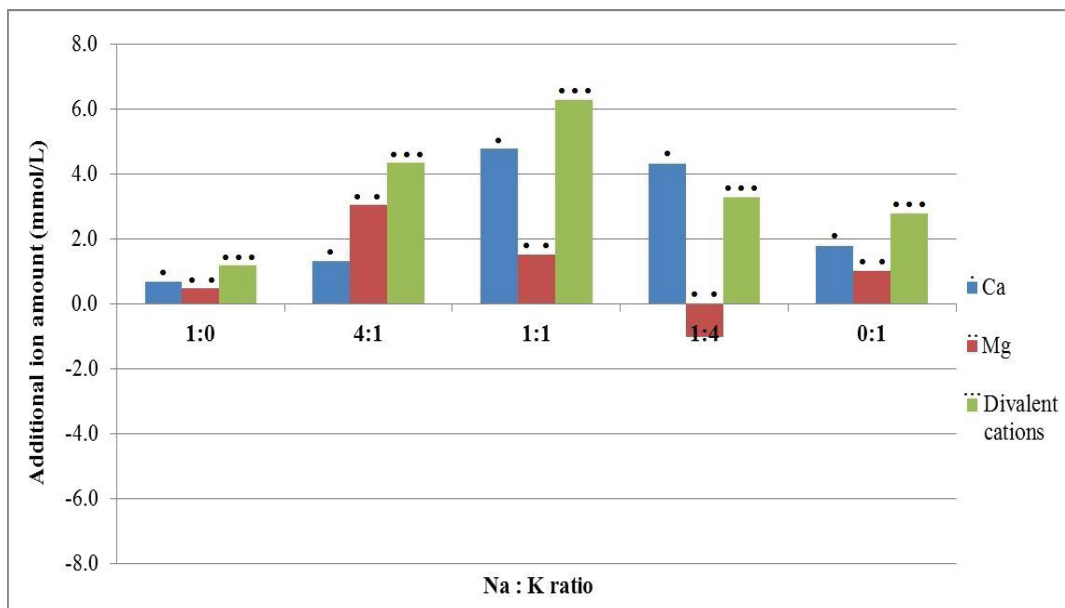
ไอออน	อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง $\text{Na}^+ : \text{K}^+$				
	1:0	4:1	1:1	1:4	0:1
Na^+	8,580	6,505	3,770	1,406	0
K^+	0	2,766	6,412	9,564	10,087
Ca^{2+}	889	889	889	889	889
Mg^{2+}	112	112	112	112	112
Cl^-	14,482	13,791	12,880	12,092	12,974
HCO_3^-	286	286	286	286	286
SO_4^{2-}	652	652	652	652	652

จากการทดลองทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำมันที่ถูกแทนที่ในช่วงเวลาต่าง ๆ กับอัตราส่วนระหว่างโซเดียมไอออนต่อโพแทสเซียมไอออน ($\text{Na}^+ : \text{K}^+$) ในน้ำเกลือที่ใช้แช่หิน

รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนประจุบวกสอง (divalent cation) ที่เพิ่มขึ้นในน้ำเกลือที่ใช้แช่หินกับอัตราส่วนระหว่างโซเดียมไอออนต่อโพแทสเซียมไอออนซึ่งแสดงได้ในรูปที่ 11 กับรูปที่ 12 ตามลำดับ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำมันที่ถูกแทนที่ในช่วงเวลาต่าง ๆ กับค่าอัตราส่วนระหว่างโซเดียมไอออนต่อโพแทสเซียมไอออน ($\text{Na}^+ : \text{K}^+$) ของน้ำเกลือที่ใช้แช่หิน



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนประจุบวกสอง (divalent cation) ที่เพิ่มขึ้นในน้ำเกลือที่ใช้แช่หินกับอัตราส่วนระหว่างโซเดียมไอออนต่อโพแทสเซียมไอออน ($\text{Na}^+ : \text{K}^+$) ของน้ำเกลือที่ใช้แช่หิน

จากรูปที่ 11 และรูปที่ 12 วิเคราะห์ได้ว่าที่อัตราส่วนของโซเดียมไอออนต่อโพแทสเซียมไอออน ($\text{Na}^+ : \text{K}^+$) เท่ากับ 1:1 น้ำเกลือสามารถแทนที่น้ำมันได้มากที่สุด เนื่องจากเกิดกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีที่สุด อันจะสังเกตได้จากไอออนประจุบวกสอง (divalent cation) ที่ถูกแทนที่ด้วยไอออนประจุบวกหนึ่งมีปริมาณมากที่สุด

ในอัตราส่วนนี้ และเมื่อปริมาณของไอออนประจุบวกหนึ่ง (monovalent cation) ในน้ำเกลือชนิดใดชนิดหนึ่งมีค่ามากกว่าอีกชนิดหนึ่ง จะทำให้ปริมาณของไอออนประจุบวกสองที่เกิดการแลกเปลี่ยนมีค่าลดลงตามที่แสดงในรูปที่ 12 ซึ่งส่งผลให้ปริมาณน้ำมันที่ออกมาจากหินลดลงไปด้วย จากผลการทดลองข้างต้นน่าจะเกิดจากสภาวะที่

โซเดียมไอออนหรือแมกนีเซียมไอออนเกาะบนพื้นผิวของหินทรายมากเกินไปจนเกินขีดจำกัด จึงทำให้เกิดการยับยั้งการแทนที่ไอออนประจุบวกสองเพื่อปรับสมดุลไม่ให้ความเข้มข้นของไอออนประจุบวกหนึ่งชนิดใด ๆ บนพื้นผิวมีค่ามากเกินไป เมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนลดลง จึงทำให้ปริมาณน้ำมันที่ถูกแทนที่ลดลงตามไปด้วย

อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าโพแทสเซียมไอออน (K^+) สามารถเกิดกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีกว่าโซเดียมไอออน (Na^+) เป็นไปตามที่ Peerakham และ Srisuriyachai [13] อธิบายว่า เนื่องจากโซเดียมไอออนมีขนาดไอออนที่เล็กกว่าโพแทสเซียมไอออน ทำให้เกิดพันธะเชื่อมกับโมเลกุลของน้ำในปริมาณที่มากกว่า ส่งผลให้พันธะที่เกิดระหว่างโซเดียมไอออนกับประจุลบบนพื้นผิวของหินทรายมีความแข็งแรงน้อยกว่า จึงทำให้การ

แทนที่ไอออนบวกสองประจุของโซเดียมไอออนมีความสมบูรณ์ที่น้อยกว่าการแทนที่ของโพแทสเซียมไอออน

4.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างโซเดียมไอออนต่อแคลเซียมไอออน ($Na^+ : Ca^{2+}$) ในน้ำเกลือที่ใช้ในการแทนที่น้ำมัน

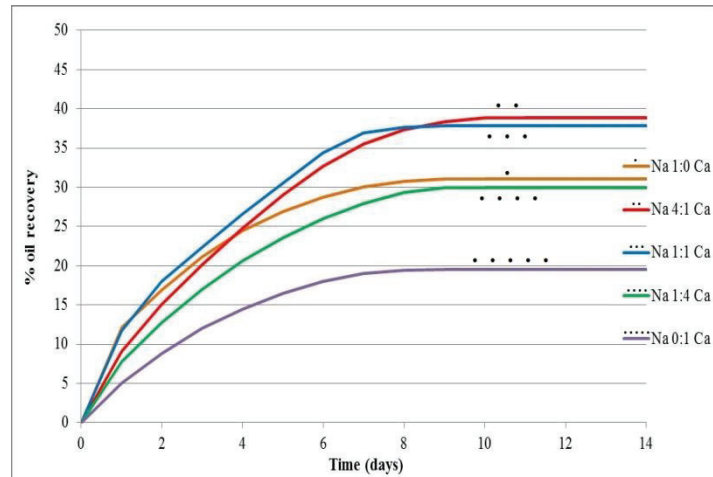
ในส่วนสุดท้าย อัตราส่วนโดยโมลระหว่างโซเดียมไอออนต่อแคลเซียมไอออน ($Na^+ : Ca^{2+}$) ในน้ำเกลือที่ใช้แช่หินจะมีการปรับเปลี่ยนเป็น 5 อัตราส่วน คือ 1:0, 4:1, 1:1, 1:4 และ 0:1 โดยที่ความเข้มข้นของน้ำเกลือในทุกอัตราส่วนเท่ากับ 25,000 ppm และปริมาณของไอออนชนิดอื่น (K^+ , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-}) มีค่าคงที่ ซึ่งจะได้ปริมาณของไอออนในน้ำเกลือสูตรต่างๆดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปริมาณของไอออนในน้ำเกลือ 1 ลิตร ที่มีอัตราส่วนระหว่าง $Na^+ : Ca^{2+}$ แตกต่างกัน (หน่วย ppm)

ไอออน	อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง $Na^+ : Ca^{2+}$				
	1:0	4:1	1:1	1:4	0:1
Na^+	9,500	6,442	3,277	1,105	0
K^+	64	64	64	64	64
Ca^{2+}	0	2,807	5,713	7,706	8,335
Mg^{2+}	112	112	112	112	112
Cl^-	14,387	14,638	14,897	15,075	15,551
HCO_3^-	286	286	286	286	286
SO_4^{2-}	652	652	652	652	652

ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำมันที่ถูกแทนที่ในช่วงเวลาต่าง ๆ กับอัตราส่วนระหว่างโซเดียมไอออนต่อแคลเซียมไอออน

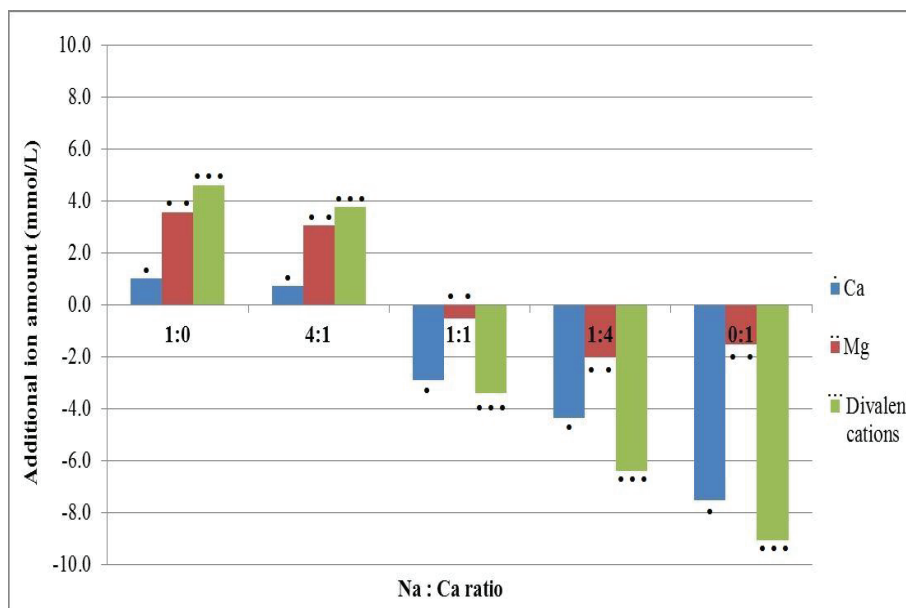
($Na^+ : Ca^{2+}$) ในน้ำเกลือที่ใช้แช่หิน สามารถแสดงได้ในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของน้ำมันที่ถูกแทนที่ในช่วงเวลาต่าง ๆ กับค่าอัตราส่วนระหว่างโซเดียมไอออนต่อแคลเซียมไอออน ($\text{Na}^+ : \text{Ca}^{2+}$) ของน้ำเกลือที่ใช้แช่หิน

จากรูปที่ 13 จะเห็นว่าการเพิ่มปริมาณแคลเซียมไอออนในน้ำเกลือแต่ละปริมาณโซเดียมไอออน ส่งผลให้ปริมาณน้ำมันที่ถูกแทนที่ลดลง แต่ในน้ำเกลือต้องมีปริมาณแคลเซียมไอออนอยู่จำนวนหนึ่งเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันที่สูงที่สุด ซึ่งก็คือที่อัตราส่วนระหว่างโซเดียมไอออนต่อแคลเซียมไอออน ($\text{Na}^+ : \text{Ca}^{2+}$) เท่ากับ 4:1 เนื่องจากที่อัตราส่วนนี้ปริมาณของแคลเซียมไอออนยังมีค่าน้อยกว่าปริมาณของแคลเซียมไอออนในน้ำเกลือ

ดั้งเดิมในชั้นหิน (Formation brine) ทำให้ยังเกิดการแพร่ของไอออนจากพื้นผิวมายังน้ำเกลือ ดังจะเห็นจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแคลเซียมไอออนที่อัตราส่วนนี้อยู่ ซึ่งแสดงในรูปที่ 14 ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างโซเดียมไอออนต่อแคลเซียมไอออน ($\text{Na}^+ : \text{Ca}^{2+}$) เท่ากับ 1:0 อาจเกิดสารประกอบโลหะอินทรีย์ (organometallic compound) ได้น้อยกว่า จึงทำให้การพ่นน้ำมันออกมาจากหินแหล่งกักเก็บเกิดได้ลดลง



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอออนประจุบวกสอง (divalent cation) ที่เพิ่มขึ้นในน้ำเกลือที่ใช้แช่หินกับอัตราส่วนระหว่างโซเดียมไอออนต่อแคลเซียมไอออน ($\text{Na}^+ : \text{Ca}^{2+}$) ของน้ำเกลือที่ใช้แช่หิน

อย่างไรก็ดีเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนในน้ำเกลือมากกว่าความเข้มข้นในน้ำเกลือดั้งเดิมในชั้นหินจะทำให้แคลเซียมไอออนแพร่เข้าใกล้และไปเกาะพื้นผิวของหินมากขึ้น แต่เนื่องจากปริมาณการเกาะของไอออนใดไอออนหนึ่งถูกจำกัดเพื่อให้เกิดสมดุล จึงเป็นไปได้ว่าแมกนีเซียมไอออนเข้าไปเกาะแทนที่ของโซเดียมไอออนที่ละลายออกมาเพื่อไม่ให้แคลเซียมไอออนเกาะพื้นผิวมากเกินไป ดังจะเห็นได้จากการลดลงของแมกนีเซียมไอออนเช่นเดียวกับการลดลงของแคลเซียมไอออน

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองสรุปผลได้ว่า การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความเข้มข้นของไอออนประจุบวกในน้ำเกลือที่ได้ทำการศึกษา อันได้แก่ โซเดียมไอออน (Na^+) โพแทสเซียมไอออน (K^+) แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันที่ได้มีค่าแตกต่างกัน โดยการปรับอัตราส่วนระหว่างไอออนประจุบวกสอง (divalent cation) ให้มีค่าเท่ากับ 1:1 จะทำให้ได้ค่าผลผลิตน้ำมันสูงสุดซึ่งเท่ากับ 45.25 เปอร์เซ็นต์ เพราะเป็นอัตราส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างไอออนประจุบวกสองกับน้ำมันที่พื้นผิวของหินน้อยที่สุด เนื่องจากเมื่อปริมาณของไอออนประจุบวกสองชนิดใด ๆ มีค่ามากกว่าอีกชนิดหนึ่งอย่างเห็นได้ชัด เช่นที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:0 หรือ 0:1 จะทำให้เกิดการแพร่เข้าใกล้พื้นผิวและนำพาให้น้ำมันเข้ามาเกาะบนพื้นผิวมากขึ้นในขณะที่เมื่อปรับอัตราส่วนระหว่างไอออนประจุบวกหนึ่ง (monovalent cation) ให้มีค่าเท่ากับ 1:1 จะทำให้ได้ค่าปริมาณผลผลิตน้ำมัน 40.11 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดเช่นกัน เนื่องจากได้รับผลกระทบน้อยที่สุดจากการถูกจำกัดปริมาณการเกาะบนพื้นผิวของไอออนประจุบวก

หนึ่งแต่ละชนิดไม่ให้มากเกินไป จึงทำให้เกิดกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าค่าอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างโซเดียมไอออนกับแคลเซียมไอออนเท่ากับ 4:1 เป็นค่าที่ทำให้ทั้งกลไกการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนประจุบวกสองสามารถเกิดขึ้นได้ดี จึงส่งผลให้ปริมาณผลผลิตน้ำมันที่ได้มีค่าสูงสุดที่ 38.38 เปอร์เซ็นต์

อย่างไรก็ตามเนื่องจากงานวิจัยฉบับนี้ใช้ข้อมูลน้ำเกลือในชั้นหินจากแหล่งอ้างอิงที่มาจากแหล่งกักเก็บน้ำมันในสถานที่ที่แตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงเป็นเพียงการนำเสนอผลกระทบของความเข้มข้นไอออนประจุบวกซึ่งพบอยู่ในน้ำเกลือดั้งเดิมในชั้นหิน (formation water) ทั่ว ๆ ไป การทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาสูตรน้ำเกลือที่เหมาะสมในการใช้สำหรับแหล่งกักเก็บน้ำมันแหล่งหนึ่ง ๆ จึงมีความจำเป็น เนื่องจากผลกระทบของไอออนขึ้นกับปัจจัยเฉพาะตัวในแหล่งกักเก็บหนึ่ง ๆ เช่น ความเข้มข้นของแต่ละไอออนในน้ำเกลือดั้งเดิมในชั้นหิน สารประกอบในน้ำมัน อุณหภูมิของแหล่งกักเก็บ รวมถึงปริมาณและชนิดของดินเหนียว (clay) ที่อยู่ในหิน เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย เพื่อใช้ในการจัดหาวัสดุ สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการปิโตรเลียมและอุปกรณ์จำลองการแทนที่ด้วยของไหลในตัวอย่างหิน (Coreflooding equipment) ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Strekeisen, A. Silicate Melt Structures. 2007; [Online] available: [http://www.alexstrekeisen.it/immagini/diagrammi/volcanicindex\(5\).jpg](http://www.alexstrekeisen.it/immagini/diagrammi/volcanicindex(5).jpg)
- [2] Tiab, D. and Donaldson, E.C. Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties. Elsevier Inc., USA, 2004.

- [3] Srisuriyachai, F., Meekangwal, S., Charoentanaworakun, C. and Vatanapanich, Y. Effects of Potassium Ion on Low Salinity Waterflooding in Sandstone Formation. The 19th European Symposium on Improved Oil Recovery, University of Stavanger, Norway, 2017.
- [4] Srisuriyachai, F. and Peerakham, C. Low Salinity Waterflooding in Sandstone Reservoir Containing Enriched Potassium Ion Concentration. The 79th EAGE Conference and Exhibition 2017, Paris, France, 2017.
- [5] Lager, A., Webb, K.J., Black, C.J.J., Singleton, M. and Sorbie, K.S. Low Salinity Oil Recovery - An experimental Investigation. *Petrophysics*, 2008; 49(1): 28-35.
- [6] Nasralla, R.A. and Nasr-El-Din, H.A. Coreflood Study of Low Salinity Water Injection in Sandstone Reservoirs. The SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia, 2011.
- [7] Ayoub, M.A., Shabib-Asl, A. and Elraies, K.A. Laboratory Investigation into Wettability Alteration by different Low Salinity Water Compositions in Sandstone Rock. The SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Bali, Indonesia, 2015.
- [8] Muchalintamolee, N. and Srisuriyachai, F. Evaluation of Low Salinity Brine Injection in Sandstone Reservoir. The International Conference on Mining, Material and Petroleum Engineering, Chiang Mai, Thailand, 2012.
- [9] Srisuriyachai, F. and Muchalintamolee, N. The Effect of Oil-Wet Induction Mechanisms on Effectiveness of Diluted and Modified Brine Injection in Sandstone Surface. The 75th EAGE Conference and Exhibition 2013 Incorporating SPE EUROPEC 2013, London, United Kingdom, 2013.
- [10] Srisuriyachai, F. and Muchalintamolee, N. Cation Interference in Low Salinity Water Injection in Sandstone Formation. The 76th EAGE Conference and Exhibition 2014, Amsterdam, Netherlands, 2014.
- [11] Luque de Castro, M.D. and Priego-Capote, F. Soxhlet extraction: Past and present panacea. *Journal of Chromatography A*, 2010; 1217(16): 2383-2389.
- [12] Zahid, A., Shapiro, A., Yan, W. and Stenby, E.H. Smart Waterflooding in Carbonate Reservoirs. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2012; [Online] available: http://orbit.dtu.dk/files/51570871/PhD_Thesis_Adeel_Zahid_For_Distribution..PDF
- [13] Peerakham, C. and Srisuriyachai, F. Effects of Total Salinity of Formation Brine and Type of Injected Water in Low Salinity Waterflooding. The 12th International Conference on Mining, Materials and Petroleum Engineering, Bangkok, Thailand, 2016.



พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสลายยาฆ่าแมลงด้วยเทคนิค น้ำที่กระตุ้นด้วยพลาสมา

Appropriate Parameters for Breakdown of Pesticide by Plasma Activated Water Technique

สุชาดา พันธุ์สถิตย์วงศ์ และ คมกฤต เล็กสกุล

Suchada Phunsathitwong and Komgrit Leksakul

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

Department of Industrial Engineering, Chiang Mai University

239 Huay Kaew Road, Muang District, Chiang Mai, Thailand, 50200

E-mail: phun.suchada@gmail.com, Telephone Number: 095-4108383

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสลายยาฆ่าแมลงด้วยเทคนิคน้ำที่กระตุ้นด้วยพลาสมา โดยเป็นการใช้พลาสมาอุณหภูมิต่ำชนิดพลาสมาไกลดิงอาร์ค (Gliding Arc Plasma) ร่วมกับการผลิตสารละลายนาโนหรือไมโครบับเบิล (nano/micro bubble) ที่ช่วยสังเคราะห์อนุมูลของไฮดรอกซิล ($\text{OH}\cdot$) ในรูปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ให้มีปริมาณความเข้มข้นสูงขึ้น โดยอนุมูลของไฮดรอกซิลเป็นหัวใจสำคัญในกระบวนการสลายยาฆ่าแมลง ผู้วิจัยเลือกศึกษาฆ่าแมลงในกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต ซึ่งเป็นชนิดที่พบมากที่สุดในผัก และผลไม้ คือ คลอร์ไพริฟอส (Chlorpyrifos) และมีปัจจัยในการทดลองทั้งหมด 3 ปัจจัย ดังนี้ 1) อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนมีช่วงของปัจจัย คือ 8-12 ลิตรต่อนาที 2) กำลังไฟฟ้ามีช่วงของปัจจัย คือ 80-600 วัตต์ และ 3) เวลาในการดิสชาร์จมีช่วงของปัจจัย คือ 20-30 นาที โดยนำเทคนิควิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน (2^3) ที่จุดกึ่งกลาง 3 จุด เพื่อนำไปทดสอบความเป็นเส้นโค้งของแบบจำลอง ในการวิเคราะห์จะใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีด้วยดีเทกเตอร์ชนิด Flame Photometric Detector (FPD) ซึ่งผลการศึกษาพบว่า สารละลายยาฆ่าแมลงในน้ำมีปริมาณสารละลายคลอร์ไพริฟอสที่ลดลงจาก 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือเพียง 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีประสิทธิภาพในการสลายได้ถึง 97.5 เปอร์เซ็นต์ สุดท้ายผลสรุปการทดลองสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการสลายสารละลายคลอร์ไพริฟอส คือ อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 12 ลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ และเวลาในการดิสชาร์จ 30 นาที

คำสำคัญ: อนุมูลของไฮดรอกซิล พลาสมา ยาฆ่าแมลง การออกแบบการทดลอง

ABSTRACT

This research aims to study the appropriate parameters for breakdown of pesticide by plasma activated water technique (PAW) which generates by hybrid plasma system. Plasma Gliding Arc system combined with the production of nano/ micro bubble solution to synthesize $\cdot\text{OH}$ Radicals in H_2O_2 form that causes higher concentration. $\cdot\text{OH}$ Radicals are the key of this process. Researcher selected organophosphate group of pesticides that the most common use for fruits and vegetables, that is Chlorpyrifos. There are 3 factors in an experiment consists of 1) the flow rate of argon gas at 8-12 L/min

Received 28 May 2018

Revised 13 July 2018

Accepted 8 August 2018

2) the power at 80-600 W 3) the time of discharged at 20-30 min ,full factorial designs at two levels and 3 center points was applied in order to test the curvature of the proposed plasma system.

The results were analyzed by gas chromatography (GC) with Flame Photometric Detector (FPD). The results showed that generated Chlorpyrifos pesticide solution had decrease from 10 mg/L to 0.25 mg/L which means breakdown of pesticide efficiency is 97.5%. Finally, we could obtain the optimum condition for breakdown Chlorpyrifos pesticide solution which is 12 L/min argon flow rate, 600 W power and 30 min discharging time.

Keyword: Hydroxyl Radical, Plasma, Pesticide, Design of Experiment

1. บทนำ

ผักผลไม้ที่ผู้บริโภคนิยมรับประทานกันมักมีการใช้ยาฆ่าแมลงในการกำจัดแมลงหรือโรคพืชต่าง ๆ ทำให้ผู้บริโภคได้รับสารเคมีโดยไม่รู้ตัว และเกิดการสะสมของสารเคมีในร่างกายจนทำให้ผู้บริโภคเจ็บป่วยได้ ควรกำจัดสารเคมีตกค้างในผักผลไม้ก่อนที่จะนำมารับประทาน ซึ่งมีวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ การแช่น้ำส้มสายชู การแช่น้ำด่างทับทิม การแช่น้ำโซเดียมไบคาร์บอเนต การแช่น้ำ และการอบโอโซน ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องใช้เวลานานในการแช่ผักผลไม้ เมื่อมีการใช้ในปริมาณที่มากเกินไปทำให้เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินอาหาร และหากสูดดมเข้าไปทำให้ระบบทางเดินหายใจระคายเคือง รวมถึงหากเข้าตา ทำให้ตาบอดได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีพลาสมา (Plasma) เป็นวิธีการที่ปลอดภัย ไร้สารตกค้าง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับสารเคมีตกค้างในผักและผลไม้ แล้วกลายเป็นสารใหม่ (ผลพลอยได้) ที่ไม่เป็นพิษหรือมีพิษลดลงจนอยู่ในระดับที่ไม่เกิดอันตรายต่อมนุษย์

เทคนิคพลาสมาจึงเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความนิยมของนักวิจัยในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยด้านต่าง ๆ โดยจุดเด่นของเทคโนโลยีพลาสมา คือ เป็นเทคโนโลยีสะอาด เน้นการพัฒนาและยกระดับสมบัติที่ผิวของวัสดุหรือผลิตภัณฑ์เป้าหมาย โดยเป็นการฉายพลาสมาลงไปยังพื้นผิว ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางเคมีของวัสดุ อีกทั้งยังขจัดสิ่งปนเปื้อนที่ผิวของวัสดุได้อีกด้วย และผู้วิจัยให้ความสำคัญต่อกระบวนการสร้างสารอนุมูลอิสระมาใช้ประโยชน์ในการเกษตร คือ อนุมูลของไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical: OH•) ซึ่งสามารถกำจัดสารพิษ

ตกค้างในผักและผลไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำหน้าที่เป็นตัวกลางสำคัญ ในการทำปฏิกิริยากับสารตกค้าง นอกจากนี้ อนุมูลของไฮดรอกซิลยังสามารถทำให้ผิวของผักและผลไม้ปลอดภัย ส่งผลให้สามารถยืดอายุได้นานขึ้นอีกด้วย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม สำหรับการสลายยาฆ่าแมลงในสารละลายยาฆ่าแมลงด้วยเทคนิคพลาสมา โดยกระบวนการที่สำคัญ คือ การผลิตน้ำนาโน/ไมโครบับเบิล ก่อนแล้วจึงนำเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำพลาสมา เพื่อสลายสารละลายคลอร์ไพริฟอส (Chlorpyrifos) ซึ่งเป็นยาฆ่าแมลงชนิดที่ตรวจพบสารพิษตกค้างมากที่สุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดแมลงได้ดี อีกทั้งยังราคาไม่แพง ผู้วิจัยจึงนำเอาเทคนิคการออกแบบการทดลองทางสถิติมาใช้ เพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่ผลต่อกระบวนการทดลอง เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีความถูกต้อง และแม่นยำ

2. การทบทวนวรรณกรรม

ในอดีตการเกษตรของไทยเป็นการผลิตเพื่อบริโภคเองภายในครัวเรือน ต่างกับปัจจุบันที่มีการใช้สารเคมีในการทำเกษตรกรรม โดยเกษตรกรหลายประเทศทั่วโลกนิยมใช้สารเคมีจำพวกยาฆ่าแมลงในการป้องกันการเข้าทำลายของแมลงและควบคุมการเจริญเติบโตของพืชให้เป็นปกติ ทำให้ผลตอบแทนสูงขึ้น แต่สารเคมีเหล่านี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงอาหารที่บริโภคในแต่ละมื้อ โดย [1] ทำการศึกษาวิธีการสลายยาฆ่าแมลงโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารละลายด่างทับทิม และน้ำยาล้างผักทางการค้า 3 ชนิด ซึ่งการแช่ด้วยสารละลายด่างทับทิมให้ประสิทธิภาพเท่ากับ 68.69% ดีกว่าการแช่

ด้วยน้ำยาล้างผักทางการค้าทั้ง 3 ชนิด เท่ากับ 52.15%, 49.36% และ 46.56% ตามลำดับ โดยวิธีการสลายน้ยาฆ่าแมลงยังมีอีกหลากหลายวิธี ได้แก่ การล้างและการปอกเปลือก [2] ซึ่งประสิทธิภาพในการล้างและการปอกเปลือกดีกว่าการล้างเพียงอย่างเดียว มีค่าอยู่ในช่วง 74.5% -97.9% การแช่ด้วยสารละลายต่าง ๆ เช่น 0.9%NaCl, 0.1%NaHCO₃, 0.001%KMnO₄ เป็นเวลา 15 นาที และการต้มด้วยความร้อน [3] ซึ่งมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 20%-89% และ 52%-100% ตามลำดับ น้ำโอโซน [4] ซึ่งทำการจุ่มและรดถ่วงอกที่ความเข้มข้น 0.3 ส่วนในล้านส่วน โดยมีประสิทธิภาพ 85%-99% และ 80%-100% ตามลำดับ และสุดท้าย [5] ในการทำพลาสมาทำให้เกิดเป็นอนุมูลของไฮดรอกซิล (OH•) ที่สามารถสลายสารอินทรีย์ต่าง ๆ ได้ จนกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งมีประสิทธิภาพมากถึง 96%

พลาสมา คือ สภาวะที่ก๊าซเฉื่อยเกิดการแตกตัวภายในประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีประจุบวก และลบในสัดส่วนที่เท่ากันทำให้เกิดความเป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นหลักการสำคัญในกระบวนการสลายน้ยาฆ่าแมลงและทำให้เกิดอิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานสูงขึ้น เกิดสภาวะที่ไม่เสถียร แล้วกลับสู่สภาวะเสถียรซึ่งพลาสมาเป็นสถานะที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย โดยมีการนำไปใช้ที่แตกต่างกันไป ทั้งใน [6] กระบวนการเคลือบ การกำจัดและลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร และผลผลิตทางการเกษตร เช่น [7, 8] ลดการปนเปื้อนของเชื้อ *Staphylococcus aureus* (S.aureus) อีกทั้งยังกำจัดเชื้อ *Pseudomonas* และ [9] *Escherichia coli* (E.coli) [10] ลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่มีในสตรอเบอร์รี่ เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ และรา อีกทั้งพลาสมาในปัจจุบันเป็นที่แพร่หลายจึงทำให้เกิดการพัฒนาเทคนิคพลาสมามากมายที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งเทคนิคพลาสมาสารละลายเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ได้รับความนิยม โดย [11] ศึกษาการดิสชาร์จในสภาวะเฟสของเหลว โดยให้กระแสไฟฟ้าที่มีพลังงาน

ส่งผ่านของเหลวก่อให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอนภายในของเหลวนั้น ๆ นำไปสู่กระบวนการไอออนในเซชันและเอ็กซ์เทนชัน จึงทำให้เกิดเป็นพลาสมา [12] ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้พลาสมาประยุกต์ไฟฟ้าร้อนเพื่อยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในน้ำ และใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อสร้าง nano/micro bubble เพราะต้องการให้ฟองแก๊สที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) อยู่ นั่น แยกตัวกันอย่างสม่ำเสมอ โดยการใช้งานของ nano/micro bubble มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการลดค่าความเป็นกรด-เบสจากค่า pH 6.15 เหลือ 3.55 และผลต่อการเพิ่มจำนวนของ H₂O₂ ในน้ำที่มีสภาวะเป็นกรด และยังเพิ่มความสามารถในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้เทคนิคน้ำที่กระตุ้นด้วยพลาสมา (Plasma Activated Water) กับพลาสมาโกลดิ้งอาร์ค (Gliding arc discharge)

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาเพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร และการลดสารพิษตกค้างในสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำ ดิน และอากาศ แต่งานวิจัยที่ศึกษาการใช้เทคนิคน้ำที่กระตุ้นด้วยพลาสมาในการลดสารพิษตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรยังมีไม่มากนัก ทั้งนี้ในการเพาะปลูกพืชผักผลไม้ส่วนใหญ่เกษตรกรนิยมใช้สารเคมีในการกำจัดศัตรูพืช และแมลงต่าง ๆ กันอย่างแพร่หลายเพื่อให้ได้ผลผลิตในปริมาณมากเพียงพอ ต่อความต้องการของผู้บริโภคสามารถจำหน่ายผัก และผลไม้ได้นาน ผลผลิตที่ได้มีความสวยงาม และราคาดีทำให้ส่งผลต่อผู้บริโภคที่รับประทานผัก และผลไม้ได้รับสารเคมีเข้าสู่ร่างกาย [5] ศึกษาการลดปริมาณไดเมทโทเอท (Dimethoate: C₅H₁₂NO₃PS₂) ได้ด้วยการผ่านการอบพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge: DBD) ซึ่งสามารถสลายไดเมทโทเอทได้มากกว่า 96 เปอร์เซ็นต์ ที่สภาวะเหมาะสม และยังเปลี่ยนรูปของไดเมทโทเอทไปเป็นโมเลกุลที่ไม่มีพิษ ได้แก่ ฟอสเฟตไอออน (PO₄³⁻), ซัลเฟตไอออน (SO₄²⁻), ไนเตรตไอออน (NO₃⁻), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และโมเลกุลน้ำ (H₂O) อีกทั้งยังมีการศึกษาการสลายน้ยาฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต ซึ่งเป็นกลุ่มที่เกษตรกร

นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง และราคาไม่แพง โดยทำการฉีดพ่นบนตัวอย่างข้าวโพด มีต้นกำเนิดพลาสมาเป็นคลื่นวิทยุและออกซิเจน [13] และมีการงานวิจัยกับสตรอเบอรี่ที่ต้องการลดสารตกค้างของยาฆ่าแมลง 4 ชนิด ได้แก่ Azoxystrobin Cypro-dinil Fludioxonil และ Pyriproxyfen พบว่า ใช้แรงดันไฟฟ้า 80 กิโลโวลต์ สามารถลดปริมาณยาฆ่าแมลงได้มากที่สุดคือ 69%, 45%, 71% และ 46% ตามลำดับ [10]

ผู้วิจัยเห็นถึงความสำคัญของการสลายยาฆ่าแมลงในผักและผลไม้ จึงนำเอาการวิธีการออกแบบการทดลองทางสถิติมาใช้ เพื่อที่จะศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่มีต่อผลการทดลองโดยมีจุดประสงค์ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีความถูกต้อง เทียบตรง และแม่นยำ ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์และปัญหาในงานวิจัยที่ทำการทดลองหาพารามิเตอร์ต่างๆ โดย [5] ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสลายยาฆ่าแมลงไคเมโทโรเอท ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย มีดังนี้ ความเข้มข้นเริ่มต้นของไคเมโทโรเอทเท่ากับ 20 mg/L กำลังไฟฟ้า 85 W ระยะห่างของช่องว่าง 5 mm และระยะเวลาในการอบพลาสมา 7 นาที [14] นำหลักการออกแบบการทดลองมาใช้ในการศึกษาหาประสิทธิภาพการสลายยาฆ่าแมลงของกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟตด้วยการอบพลาสมาออกซิเจนซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ กำลังในการดิสชาร์จ ระยะเวลาในการอบพลาสมา และความเข้มข้นของกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต งานวิจัยของ [11] พบว่า ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาของกระบวนการพลาสมาสารละลาย คือ เวลาที่ใช้ในการทดลอง กำลังไฟฟ้า สภาพการนำไฟฟ้าของสารละลาย ชนิดของสารละลาย ซึ่งในการคัดเลือกปัจจัยนั้น ทำได้โดยการทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการจะทำการระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญ ผู้ที่มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องโดยอ้างอิงตามหลักการทางวิศวกรรม รวมทั้งข้อจำกัดในทางปฏิบัติต่าง ๆ มาพิจารณาร่วมกันเพื่อหาปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการทดลอง อีกทั้งยังเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Response variables) ซึ่ง [15]

ศึกษาการสลายของกรดส้มโดยพลาสมาในสารละลายโซเดียมในเตรดได้หาค่าตัวแปรตอบสนอง คือ 1) อัตราการสลายของกรดส้ม และ 2) ความหนาแน่นของอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิล เทคนิคการออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือที่ช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ในขณะที่ผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือสูง สามารถนำไปใช้ในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการ เพื่อให้กระบวนการสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การเตรียมการทดลอง

คัดเลือกยาฆ่าแมลงที่จะนำมาใช้ในงานวิจัย โดยเลือกตามการใช้งานของเกษตรกรและตามคำแนะนำบนฉลาก ซึ่งได้เลือกสารคลอร์ไพริฟอส (Chlorpyrifos) เป็นสารกำจัดแมลงในกลุ่มออร์กาโนฟอสเฟต เนื่องจากเป็นสารเคมีที่เกษตรกรมักนิยมนำไปใช้ในการกำจัดหนอนเจาะสมอฝ้าย เลียนดิน เพลี้ยอ่อน เพลี้ยจักจั่น ค้างคาวม้วนเทศ ผีเสื้อข้าวเปลือก ค้างคาวข้าว ค้างคาวข้าวโพด มอดแป้ง สูตรทางเคมี คือ $C_9H_{11}Cl_3NO_3PS$ มีความบริสุทธิ์ 99.7%

3.2 การออกแบบการทดลอง

3.2.1 วางแผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เลือกใช้การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งหน่วยทดลอง (Experimental unit) คือ คลอร์ไพริฟอส โดยที่วิธีการออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียลเต็มจำนวน (2^k) ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการทดลอง กำหนดให้มีปัจจัยที่ศึกษา 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ และทำการทดลองซ้ำ 2 ซ้ำ อีกทั้งยังทำการทดลองซ้ำที่จุดกึ่งกลาง 3 จุด เพื่อนำไปทดสอบความเป็นเส้นโค้งของแบบจำลอง รวมการทดลองทั้งสิ้น $(2^3 \times 2) + 3 = 19$ การทดลอง สร้างตารางการออกแบบการทดลองจากโปรแกรมมินิแทป 16

ปัจจัยที่ศึกษาและระดับของปัจจัยที่ศึกษานั้น ผู้วิจัยได้ทำการสอบถามจากวิศวกรผู้ชำนาญการประจำเครื่อง

และทำการศึกษาทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรม ซึ่งปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ปัจจัย (A) อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนที่ระดับต่ำ 8 ลิตรต่อนาที ระดับสูง 12 ลิตรต่อนาที ปัจจัย (B) กำลังไฟ ที่ระดับต่ำ 80 โวลต์ ระดับสูง 600 โวลต์ ปัจจัย (C) เวลาในการดิสชาร์จที่ระดับต่ำ 20 นาที ระดับสูง 30 นาที โดยผลต่อตัวแปรตอบสนองนี้ คือ ปริมาณความเข้มข้นที่ลดลงของการสลายยาฆ่าแมลง หลังการใช้พลาสมา

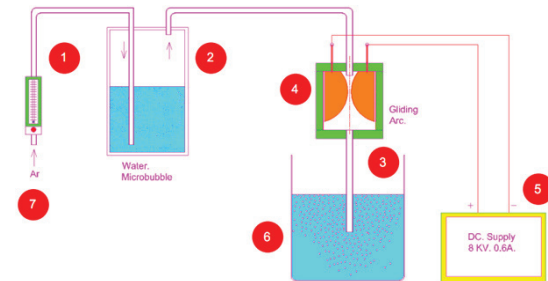
3.2.2 การเตรียมสารละลายยาฆ่าแมลง

เตรียมความเข้มข้นของสารละลายคลอร์ไพริฟอส 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการเตรียมสารคลอร์ไพริฟอส 0.002 กรัม นำมาละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 200 มิลลิตร และ 1% ของ Tween 20 ลงไปผสมกัน เพื่อลดแรงตึงผิวของน้ำ ทำให้คลอร์ไพริฟอสละลายได้ดีขึ้น แล้วใช้ฟอยล์ห่อรอบขวด เพื่อป้องกันการรบกวนจากแสงภายนอก เมื่อละลายหมดหมดแล้ว สามารถนำไปใช้ได้เลย หรือเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

3.2.3 การใช้พลาสมาในการสลายยาฆ่าแมลง

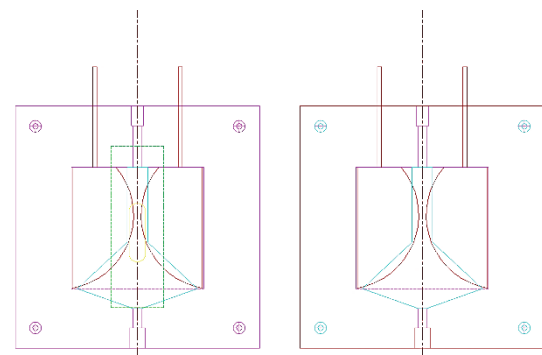
กระบวนการสลายยาฆ่าแมลง แบ่งเป็น 2 กระบวนการ โดยกระบวนการแรก คือ การผลิตน้ำนาโน/ไมโครบับเบิล ใช้ปริมาณโซเดียมไบคาร์บอเนต 4.2 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 1 ลิตร และใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดัน 45 โวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ซึ่งได้จากผลการทดลองเบื้องต้น พบว่าทำให้การผลิตมีความเสถียร ส่วนกระบวนการที่สอง คือ การผลิตน้ำพลาสมาในการสลายยาฆ่าแมลง ซึ่งนำน้ำนาโน/ไมโครบับเบิลที่ผลิตได้จากกระบวนการแรก ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างอนุมูลของไฮดรอกซิล โดยวัดผ่านปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยชุดทดสอบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Test Strip) ซึ่งผลจากการทำการทดลองเบื้องต้น พบว่า อนุมูลของไฮดรอกซิลสามารถเก็บได้นาน 10 ชั่วโมงภายใต้อุณหภูมิห้อง ต่อไปทำการแบ่งสารละลายคลอร์ไพริฟอสปริมาตร 10 มิลลิตร ลงในบีกเกอร์แล้วผ่านการดิสชาร์จด้วยระบบพลาสมา (PAW) ดังรูปที่ 1 และทำการปรับค่าที่ปัจจัยต่าง ๆ ตามตารางการออกแบบ

การทดลองแล้วเก็บตัวอย่างใส่ขวดสีชา เนื่องจากสารเคมีมีความไวต่อแสง แล้วนำไปวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่อง GC ต่อไป



รูปที่ 1 ระบบพลาสมา (PAW)

จากรูปที่ 1 มีส่วนประกอบ ดังนี้ หมายเลข 1 มิเตอร์วัดอัตราการไหล หมายเลข 2 ภาชนะใส่น้ำ nano/micro bubble หมายเลข 3 ผลผลิตน้ำพลาสมา หมายเลข 4 กระบวนการ Gliding arc หมายเลข 5 หม้อแปลงไฟฟ้า หมายเลข 6 ภาชนะบรรจุน้ำพลาสมา หมายเลข 7 แก๊สอาร์กอน (Ar) ซึ่งในการกระบวนการผลิตน้ำบับเบิลได้จากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันสูงสุด 1 kV และในกระบวนการการผลิตน้ำพลาสมาในการสลายยาฆ่าแมลงได้จากหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด Neon Transformer 8 kV ให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 600 วัตต์



รูปที่ 2 โครงสร้าง Gliding arc

จากรูปที่ 2 ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าชนิดทองแดงทั้งสองฝั่ง และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร โดยการสร้างพลาสมานั้น แก๊สอาร์กอนจะถูกฉีดเข้าไปในช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ซึ่งที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

นั้นจะถูกเป่าแล้วพุ่งขึ้นตามแนวข้อไฟฟ้า จนกระทั่งแตกเป็นพลาสมาที่มีลักษณะคล้ายฟุ้งของขนนก

3.2.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ก่อนการวิเคราะห์ตัวอย่าง จะต้องทำการเตรียมตัวอย่างเพื่อแยกสารที่สนใจออกจากสารรบกวน ทำให้ความเข้มข้นที่วิเคราะห์ มาจากสารที่สนใจเท่านั้น ซึ่งทำการสกัดคลอร์ไพริฟอสตามวิธีของ [16] ด้วยวิธีการสกัดของเหลวด้วยของเหลว (liquid-liquid extraction) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำได้ง่าย สะดวก ตัวทำละลายมีราคาถูก และไม่แพง และได้รับความนิยม วิธีการคือ นำตัวอย่างมา 10 มิลลิลิตร เทใส่กรวยแยกสกัด (Separatory funnel) โดยเติมไดคลอโรมีเทน 25 มิลลิลิตร สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (10%) 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน 2 นาที และรอแยกชั้น 10 นาที จากนั้นเก็บสารละลายที่อยู่ชั้นล่างและกรองผ่านสารโซเดียมซัลเฟตเพื่อดูดซับลงไปในช่วงแก้วกันกลม ส่วนชั้นบนนำไปสกัดซ้ำอีกครั้ง แล้วนำไปลดปริมาตรให้แห้งด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สุดท้ายทำการปรับปริมาตรโดยใช้อะซิโตนให้ได้ 1 มิลลิลิตร กรองผ่าน syringe filter ชนิดไนลอน ขนาด 0.45 ไมโครเมตร แล้วนำไปฉีดเข้าเครื่อง GC ชนิด Flame Photometric Detector (FPD) โดยใช้คอลัมน์ชนิด RTxOPP2 ยี่ห้อ Restek อุณหภูมิของคอลัมน์ 150 และ 280 องศาเซลเซียส อัตราเร็ว 12 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลการทดลอง

โดยป้อนข้อมูลลงในโปรแกรมมินิแทป 16 เพื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติ ซึ่งต้องตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเพื่อดูความเหมาะสมของข้อมูล เช่น ดูการกระจายตัวข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ หรือไม่ และยังต้องทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-square) เป็นการวิเคราะห์ว่าการออกแบบการทดลองที่ได้นั้นมีค่าความเหมาะสมหรือไม่เพียงใด และวิเคราะห์ความแปรปรวนซึ่งสามารถอ่านค่าจาก P-Value ถ้ามีค่าน้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าค่าความแตกต่างของความแปรปรวนมีนัยสำคัญทางสถิติ สุดท้ายวิเคราะห์หาค่า

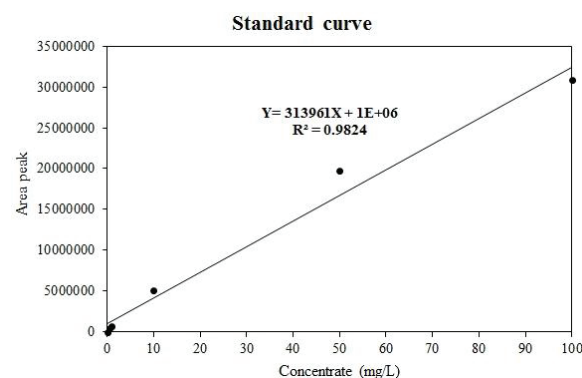
ปัจจัยที่เหมาะสม โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในโปรแกรมมินิแทป 16

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง GC จะเรียกว่า โครมาโทแกรม (Chromatogram) และส่วนที่แยกออกมาว่า พีก (Peak) ซึ่งแต่ละพีกจะบ่งบอกถึงจำนวนสารผสมที่อยู่ในตัวอย่างได้ และสามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative) ได้โดยใช้ขนาดสัญญาณที่ได้จากตัวอย่างเทียบกับสัญญาณของสารมาตรฐาน ซึ่งกราฟมาตรฐานของคลอร์ไพริฟอสเป็นกราฟเส้นตรง ดังสมการที่ (1)

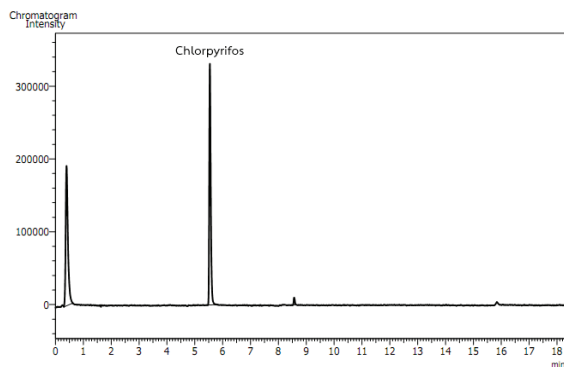
$$Y = 313961X + (1 \times 10^6) \quad (1)$$

และ R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9824 แสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟมาตรฐานของสารคลอร์ไพริฟอส

อีกทั้งผลโครมาโทแกรมของตัวอย่าง ซึ่งเป็นสารละลายคลอร์ไพริฟอสที่ผ่านการสลายด้วยพลาสมา PAW แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งแสดงค่า retention time (t_R) ของคลอร์ไพริฟอส อยู่ในช่วงเวลา 5.54 นาที ค่าพื้นที่ของพีก เท่ากับ 1,236,653 และค่าส่วนสูงของพีก เท่ากับ 330,420



รูปที่ 4 โครมาโทแกรมของสารละลายคลอร์ไพริฟอส

ซึ่งนำค่าพื้นที่ของพีคแต่ละตัวอย่างตามตารางการออกแบมาคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นของสารละลายคลอร์ไพริฟอสที่ทดลองซึ่งก็คือ ค่า X จากสมการที่ (1) กราฟมาตรฐานของสารคลอร์ไพริฟอส

ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรมมินิแทป โดยคำนวณค่าผลกระทบของปริมาณความเข้มข้นของสารละลายคลอร์ไพริฟอสในการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^3 และมีการทดลองซ้ำ 2 ซ้ำ แสดงดังตารางที่ 1 ประกอบด้วยผลกระทบ 7 เทอม รวมค่าที่เป็น 8 เทอม ซึ่งแบ่งเป็นผลกระทบหลัก 3 เทอม (A, B และ C) ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย 3 เทอม (AB, BC และ AC) ผลกระทบร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย 1 เทอม (ABC) และจุดกึ่งกลาง 3 ค่า

ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์การทดลองแบบแฟกทอเรียล 2×2^3 เพื่อศึกษาการสลายของสารละลายคลอร์ไพริฟอส

Estimated Effects and Coefficients for ppm (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		1.6938	0.03666	46.21	0.000
A	-1.1875	-0.5937	0.03666	-16.20	0.000
B	0.0625	0.0313	0.03666	0.85	0.414
C	-0.9625	-0.4812	0.03666	-13.13	0.000
A*B	-0.6625	-0.3312	0.03666	-9.04	0.000
A*C	0.1125	0.0563	0.03666	1.53	0.156
B*C	0.4625	0.2312	0.03666	6.31	0.000
A*B*C	-0.7125	-0.3562	0.03666	-9.72	0.000
Ct Pt		0.0062	0.09225	0.07	0.947
S = 0.146629	PRESS = 0.825				
R-Sq = 98.49%	R-Sq(pred) = 94.22%				
R-Sq(adj) = 97.29%					

ตารางที่ 1 (ต่อ) ผลวิเคราะห์การทดลองแบบแฟกทอเรียล 2×2^3 เพื่อศึกษาการสลายของสารละลายคลอร์ไพริฟอส

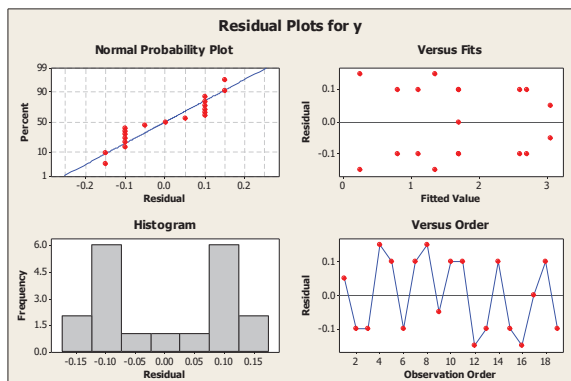
Analysis of Variance for ppm (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects						
	3	9.3619	9.36187	3.12062	145.15	0.000
A	1	5.6406	5.64063	5.64063	262.35	0.000
B	1	0.0156	0.01563	0.01563	0.73	0.414
C	1	3.7056	3.70562	3.70562	172.35	0.000
2-Way	3	2.6619	2.66187	0.88729	41.27	0.000
A*B	1	1.7556	1.75562	1.75562	81.66	0.000
A*C	1	0.0506	0.05063	0.05063	2.35	0.156
B*C	1	0.8556	0.85562	0.85562	39.80	0.000
3-Way	1	2.0306	2.03062	2.03062	94.45	0.000
A*B*C	1	2.0306	2.03062	2.03062	94.45	0.000
Curvature						
	1	0.0001	0.00010	0.00010	0.00	0.947
Residual Error						
	10	0.2150	0.21500	0.02150		
Pure Error						
	10	0.2150	0.21500	0.02150		
Total	18	14.2695				

จากการคัดกรองผลกระทบที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญ พบว่าเทอม A, C, AB, BC และ ABC มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า เทอม A, B C, AB, BC และ ABC มีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% ซึ่งผลกระทบร่วม AB, BC และ ABC มีนัยสำคัญ จึงควรรวมผลกระทบหลัก B ด้วยแม้ไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นสร้างแบบจำลองได้ดังสมการที่ (2)

$$y = 1.6938 - 0.5937A + 0.0313B - 0.4812C - 0.3312AB + 0.2312BC - 0.3562ABC \quad (2)$$

จากแบบจำลองความสัมพันธ์ ต้องการหาการสลายของสารละลายคลอร์ไพริฟอสมีปริมาณความเข้มข้นต่ำสุด โดยจะได้ค่าทำนายปริมาณความเข้มข้น เท่ากับ 1.0438 ต่อไปเป็นตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองด้วยวิธีการวิเคราะห์ส่วนค้าง เพื่อตรวจสอบข้อกำหนดเบื้องต้นของคุณสมบัติของความแปรปรวนของแบบจำลอง จากรูปที่ 5 พบว่า จากกราฟแบบปกติของส่วนค้างที่มีการแจกแจงแบบปกติ และกราฟส่วนค้างกับตัวแปรอื่น ๆ ได้แก่ ลำดับการทดลอง ค่าการทำนาย และการกระจายตัวแบบสุ่ม

ซึ่งไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มที่แน่นอน จึงสามารถนำแบบจำลองไปใช้งานได้



รูปที่ 5 กราฟส่วนค้างการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2×2^3 เพื่อศึกษาการสลายของสารละลายคลอรีไพริฟอส

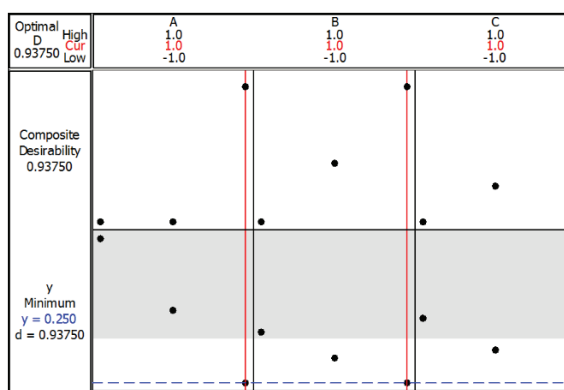
อีกทั้งยังตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ (R -squared) และ R -squared (adj) เท่ากับ 98.49% และ 97.29% ตามลำดับ และยังพิจารณาจากค่า Lack of fit พบว่าค่าทดสอบทางสถิติมีค่าเท่ากับ 2.35 และ P -value มีค่าเท่ากับ 0.156 ดังนั้น ขอมรับสมมติฐานหลักที่นัยสำคัญที่ความเชื่อมั่น 95% แสดงว่าแบบจำลองเหมาะสมแล้ว และจากผลวิเคราะห์ทางสถิติเกี่ยวกับเส้นโค้งพบว่า ค่าทางสถิติของส่วนโค้ง (F -Curvature) มีค่าเท่ากับ 0.00 และ P -value มีค่าเท่ากับ 0.946 จึงขอมรับสมมติฐานหลักแสดงว่าแบบจำลองเชิงเส้นเหมาะสมแล้ว และไม่จำเป็นต้องทำการทดลองเพิ่มเติม

เงื่อนไขที่เหมาะสมจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น ด้วยโปรแกรม Minitab 16 ด้วย Response Optimizer และ set up ค่า Goal เป็น Minimum โดยมีกำหนดค่า Target ที่ 0.2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เนื่องจากค่า MRLs ของมาตรฐานสินค้าเกษตร (2016) กำหนดให้พบปริมาณสารเคมีตกค้างในหอมแดง ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และกำหนดค่า Upper ที่ 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เนื่องจากมาตรฐาน Codex Alimentarius Commission, FAO/WHO Food Standard Programme (2016) กำหนดให้มีสารพิษตกค้าง (MRLs) ของคลอรีไพริฟอส.

บนเครื่องเทศ หรือผลไม้ตระกูลเบอร์รี่ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ดังนั้นเงื่อนไขที่เหมาะสมดังตารางที่ 2 และรูปที่ 6

ตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขที่เหมาะสมจาก Response Optimizer

Goal	Target	Upper	Weight
Minimum	0.2	1	1
Global Solution			
A = +1			
B = +1			
C = +1			



รูปที่ 6 Optimization Plot เงื่อนไขที่สุดจากการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมในการสลายยาฆ่าแมลง คือ ปัจจัย A อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 12 ลิตรต่อนาที ปัจจัย B กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ ปัจจัย C เวลาในการดิสซาร์จ 30 นาที ซึ่งมีค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (d) เท่ากับ 0.93750 ทำให้ได้ค่าปริมาณความเข้มข้นของสารละลายคลอรีไพริฟอสที่ลดลง เท่ากับ 0.25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

5. สรุปและอภิปรายผลงานวิจัย

การทดลองด้วยเทคนิคนี้ที่กระตุ้นด้วยพลาสมา หรือ PAW ซึ่งใช้แก๊สอาร์กอนพลาสมาไปกลึงอาร์คนั้น (Gliding Arc Plasma) เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดิสซาร์จทำให้มีพื้นที่ในการกำเนิดพลาสมามากขึ้น รวมทั้งใช้กระบวนการสร้างน้ำนาโน/ไมโครบับเบิลเข้าไป

จึงทำให้สามารถสลายสารละลายคลอรีโฟรฟอสได้อย่างมีประสิทธิภาพถึง 97.5% และพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทดลองนี้ ได้แก่ อัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 12 ลิตรต่อนาที กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ และเวลาในการดิสชาร์จ 30 นาที อีกทั้งค่าปริมาณความเข้มข้นของสารละลายคลอรีโฟรฟอสที่ลดลงเหลือ 0.25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และจากการทดสอบยืนยันผลแล้ว ค่าเฉลี่ยของแบบจำลองดังกล่าว มีค่าเท่ากับ 2.10 มีช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval) 95% เท่ากับ 1.8760-2.2840

ข้อเสนอแนะ และแนวทางการทำวิจัยในอนาคต เนื่องด้วยในการกระบวนการปัจจุบันยังไม่สามารถนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ จึงควรมีการพัฒนาให้สามารถผลิตน้ำพลาสมาได้ในอัตราที่มากขึ้น ที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ อีกทั้งยังควรมีการใช้เทคนิคในการวัดความเข้มข้นอนุภาคของไฮดรอกซิลด้วยวิธีอื่น เพื่อให้

การทดลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ในการผลิตน้ำนาโน/ไมโครบับเบิลควรมีการวัดขนาดและความเข้มข้นของบับเบิลที่ใช้ เพื่อสามารถระบุข้อมูลที่เป็นเชิงวิชาการมากขึ้น และแนวทางการทำวิจัยในอนาคตควรจะนำมาทดสอบด้วยเทคนิค Mass spectrometry หรือ MS เพื่อระบุมวลของอนุภาค ส่วนประกอบของธาตุในสารประกอบตัวอย่างหรือโมเลกุล และสามารถแสดงถึงโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลได้ และยังสามารถนำพารามิเตอร์ที่เหมาะสมไปทำการวิจัยกับผัก และผลไม้ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก สำนักงานพัฒนาการวิจัยเกษตร (สวก.) และขอบคุณพระคุณ ศูนย์เครื่องมือกลางคณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำแนะนำและสอนการใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

เอกสารอ้างอิง

- [1] เอนก หาลี และ ธวัชชัย ศุภวิทิตพัฒนา. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารละลายด่างทับทิมและน้ำยาล้างผักทางการค้า 3 ชนิดในการลดปริมาณเมธิมิดในผักคะน้า. *วารสารเกษตรพระจอมเกล้า*, 2556; 30(1): 55-56
- [2] Rawn, D. F., Quade, S.C., Sun, W. F., Smith, S., Fouquet, A. and Belanger, A. Effects of Postharvest Preparation on Organophosphate Insecticide Residues in Apples. *Agricultural and Food Chemistry*, 2008; 56(3): 916-921.
- [3] Satpathy, G., Tyag, Y. K. and Gupta, R. K. Removal of Organophosphorus (OP) Pesticide Residues from Vegetables Using Washing Solutions and Boiling. *Agricultural Science*, 2012; 4(2): 69-78.
- [4] Kim, S., Kim, I., Park, M. and Lee, Y. Effect of Ozone Water on Pesticide-Residual Contents of Soybean Sprouts during Cultivation. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 2000; 32(2): 277-283.
- [5] Hu, Y., Bai, Y., Li, X. and Chen, J. Application of Dielectric Barrier Discharge Plasma for Degradation and Pathways of Dimethoate in Aqueous Solution. *Separation and Purification Technology*, 2013; 120: 191-197.
- [6] Krasimir, V., Griesser, S. S. and Griesser, H. J. Antibacterial Surfaces and Coatings Produced by Plasma Techniques. *Plasma Process and Polymer*, 2011; 8: 1010-1023.
- [7] Ma, R., Wang, G., Tian, Y., Wang, K., Zhang, J. and Fang, J. Non-Thermal Plasma-Activated Water Inactivation of Food-Borne Pathogen on Fresh Produce. *Journal of Hazardous Materials*, 2015; 300: 643-651.
- [8] Kim, J.-S., Lee, E.-J., Choi, E. H. and Kim, Y.-J. Inactivation of Staphylococcus Aureus on the Beef Jerky by Radio-Frequency Atmospheric Pressure Plasma Discharge Treatment. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014; 22: 124-130.
- [9] Sari, A. H., & Fadaee, F. (2010). Effect of Corona Discharge on Decontamination of Pseudomonas Aeruginosa and E-Coli. *Surface and Coatings Technology*, 2010; 2005(1), S385-S390.

- [10] Misra, N. N., Pankaj, S. K., Walsh, T., O'Regan, F., Bourke, P. and Cullen, P. J. In-package Nonthermal Plasma Degradation of Pesticides on Fresh Produce. *Journal of Hazardous Materials*, 2014; 271: 33-40.
- [11] Takai, O. Solution Plasma Processing (SPP). *Pure and Applied Chemistry*, 2008; 80(9): 2003-2011.
- [12] Kim, H. S., Cho, Y. I., Hwang, I. H., Lee, D. H., Cho, D. J., Rabinovich, A. and Fridman, A. Use of Plasma Gliding Arc Discharges on the Inactivation of E. coli in water. *Separation and Purification Technology*, 2013; 120: 423-428.
- [13] Bai, Y., Chen, J., Mu, H., Zhang, C. and Li, B. Reduction of Dichlorvos and Omethoate Residues by O₂ Plasma Treatment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009; 57(14): 6238-6245.
- [14] Bai, Y., Chen, J., Yang, Y., Guo, L. and Zhang, C. Degradation of Organophosphorus Pesticide Induced by Oxygen Plasma: Effects of Operating Parameters and Reaction Mechanisms. *Chemosphere*, 2010; 81(3): 408-414.
- [15] Hsieh, A.-H., Wu, K. C. W. and Hsu, C.-C. Kinetic study of Acid Orange 7 degradation using plasmas in NaNO₃ solution sustained by pulsed power. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014; 45(4): 1558-1563.
- [16] Pablos-Espada, M. C., Arrebola-Liebanas, F. J., Garrido-frenich, A. and Martinez-Vidal, J. L. Analysis of Pesticides in Water Samples Using GC-ECD and GC-MS/MS Techniques. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1999; 75(1-2): 165-179.



การพัฒนาเครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หมูกึ่งอัตโนมัติ

Development of the Semi-Automatic Forming of Sago with Pork Filling Balls Machine

สุนัน ปานสาคร^{1,*}, จตุรงค์ ลังกาพินธุ์¹, เจริญพร สมบัติหอม¹ และ อภิสิทธิ์ มากเมือง¹

Sunan Parnsakhorn^{1,*}, Jaturong Langkapin¹,
Charoenphon Sombathom¹ and Apisit Makmuang¹

¹, ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

¹, *Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi,

39 Moo 1, Rangsit-Nakhonnayok Road, Klong 6, Thanyaburi, Pathum Thani 12110

*E-mail: sunan.p@en.rmutt.ac.th, Telephone number: 02-549-3380, Fax: 02-549-3581

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาเครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หมูกึ่งอัตโนมัติเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สาकुไส้หมูที่มีรูปร่างใกล้เคียงทรงกลม ลดเวลา และแรงงานในการผลิตสาकुไส้หมู เพื่อการผลิตในระดับอุตสาหกรรมและกึ่งอุตสาหกรรม เครื่องต้นแบบประกอบด้วย โครงสร้างเครื่อง ส่วนอัดแป้ง ส่วนอัดไส้สาकु ชุดขึ้นรูปสาकुไส้หมู ระบบส่งกำลัง และใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง จำนวน 2 ตัว ขนาด 1.0 แรงม้า สำหรับส่วนอัดแป้งและไส้ และขนาด 0.5 แรงม้า สำหรับชุดขึ้นรูปสาकुไส้หมู การทำงานของเครื่องเริ่มจากการป้อนแป้งสาकुและไส้ลงถังบรรจุ จากนั้นแป้งสาकुและไส้จะถูกอัดผ่านท่อลำเลียงที่ออกแบบให้มีลักษณะเป็นท่อสองชั้น ชั้นนอกเป็นส่วนของแป้ง และชั้นในเป็นส่วนของไส้ โดยอัตราการไหลของแป้งขึ้นอยู่กับความหนืด จากผลการทดสอบพบว่า เครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้ดีที่สุดโดยการนวดแป้งที่อัตราส่วนแป้งกับน้ำ 1 ต่อ 1 จากนั้นไส้และแป้งถูกส่งไปยังชุดขึ้นรูปสาकुไส้หมูที่ถูกออกแบบมาในลักษณะเข้าครั้งทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชุด เพื่อทำการกดและอัดให้ได้สาकुไส้หมูที่มีลักษณะเป็นทรงกลม พบว่าชุดเข้าขึ้นรูปสาकुไส้หมูสามารถทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเร็วรอบ 15 รอบ/นาที มีอัตราการผลิต 1,842 ลูก/ชั่วโมง ความสามารถในการทำงานจริงของเครื่อง 1,481 ลูก/ชั่วโมง และมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย 20 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของชุดเข้าขึ้นรูปสาकुไส้หมูเป็น 20 รอบ/นาที และ 25 รอบ/นาที ให้ความสามารถในการทำงานจริงของเครื่องลดลงเป็น 1,048 และ 328 ลูก/ชั่วโมง ตามลำดับ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 0.88 กิโลวัตต์ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมแสดงระยะเวลาคืนทุน 60 วัน

คำสำคัญ: สาकुไส้หมู เครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หมู แป้ง เครื่องต้นแบบ ความสามารถในการทำงาน

ABSTRACT

This research focused on developing semi-automatic forming of sago with pork filling balls machine in order to produce spherical sago balls, reduce production time and labor cost. This machine was developed for industrial and semi-industrial production scales. The prototype consisted of main frame, flour filling unit, sago filling unit, sago forming unit and two power transmission units. The power transmission units were 1.0 horsepower for flour filling unit and 0.5 horsepower for sago forming unit. The machine operation started from filling sago powder and filling pork into the container.

Received 16 May 2018

Revised 9 August 2018

Accepted 21 August 2018

Subsequently, the sago powder and the pork filling were compressed through a double-layer pipe where the outer layer conveyed dough and the filling was in the inner pipe. The results showed that the optimal ratio of starch and water was 1:1. Later, the filling and dough were delivered to sago forming unit, which was designed into two pieces of semi-circular mold of 28-mm diameter to press and compress sago ball into spherical shape. The research found that the most efficient speed of the forming unit was 15 rpm and the production rate was 1,842 balls per hour. The working capacity of the machine was 1,481 balls per hour with 20 percent damage. The increasing of sago forming speed to 20 rpm and 25 rpm reduced the actual capacity of the machine to 1,048 and 328 balls per hour, respectively. Power consumption of the machine was 0.88 kWh. Lastly, the engineering economic analysis showed that the payback period was 60 days.

Keywords: Sago pork, Sago pork forming machine, Flour, Prototype, Working capacity

1. คำนำ

อาหารหลักของคนไทย คือ ข้าว แต่นอกจากข้าวแล้ว ผู้บริโภคส่วนใหญ่ยังต้องการรับประทานขนมหวาน อาหารว่าง หรือของขบเคี้ยวอื่น ๆ เพื่อเพิ่มรสชาติในการรับประทานอาหาร ขนมไทยเป็นทางเลือกหนึ่งที่ทุกคนชื่นชอบรับประทาน เนื่องจากรสชาติที่ดี มีการผลิตอย่างถูกหลักอนามัย ผลิตจากวัตถุดิบธรรมชาติหรือวัตถุดิบทางการเกษตรเป็นส่วนมาก เช่น ใบเตย ดอกอัญชัน กระเจี๊ยบ พักทอง ฯลฯ จึงเหมาะสำหรับการรับประทานเพื่อสุขภาพ อีกทั้งยังเป็นที่ยอมรับอย่างมากตามร้านอาหาร เลี้ยงหรืองานมงคลต่าง ๆ โดยเฉพาะในช่วงหลังมานี้ มีกลุ่มชมรมเกษตรกร หรือกลุ่มชมรมต่าง ๆ ที่เริ่มมีบทบาทในการผลิตขนมไทยเพื่อจำหน่ายเป็นสินค้า OTOP และจำหน่ายตามร้านสะดวกซื้อทั่วไปซึ่งพบได้ว่า ขนมไทยกำลังแพร่หลายอย่างมากในยุคปัจจุบันนี้ สาเหตุสำคัญเป็นขนมไทยชนิดหนึ่งที่ผู้คนนิยมบริโภคและอยู่คู่คนไทยมาช้านาน เม็ดสาเก มี 2 ประเภท คือ สาเกเม็ดเล็ก และสาเกเม็ดใหญ่ ซึ่งเดิมผลิตจากต้นสาเก [1] แต่ด้วยปัจจุบันแนวโน้มมีการลดลงของจำนวนต้นสาเกมีมากขึ้น ดังนั้นเม็ดสาเกที่นิยมนำมาทำขนมรับประทานกันโดยทั่วไปจึงทำมาจากแป้งมันสำปะหลังที่มีลักษณะคล้ายแป้งสาเก โดยมีขั้นตอนการแปรรูป คือ นำแป้งมาขึ้นรูปด้วยเครื่องเขย่าให้จับกันเป็นก้อน และร่อนเพื่อคัดขนาดที่ต้องการ คั่วและอบแห้งเป็นเม็ด ๆ เรียกว่า เม็ดสาเก เนื่องจากในอดีตเม็ดสาเกทำมาจากต้นสาเกที่เป็นพืชตระกูลปาล์มที่พบมากในภาคใต้ แต่หลังจากมีการนำเข้ามันสำปะหลังมาปลูกในประเทศไทยอย่างแพร่หลาย การทำเม็ดสาเกจึงได้ใช้แป้งมันสำปะหลัง

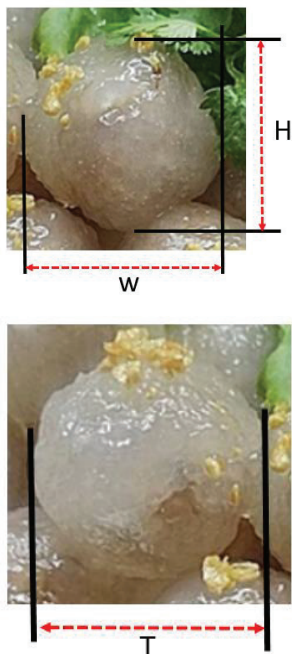
แทน ต้นสาเกจึงไม่ถูกนำมาผลิตเป็นแป้งและเม็ดสาเกอีกต่อไป [2, 3]

การนำเม็ดสาเกมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ นิยมทำสาเกยัดไส้โดยที่ไส้ของสาเกมีความแตกต่างกันไปตามความต้องการของผู้บริโภค และที่เป็นที่นิยมในกลุ่มผู้บริโภคคือ “สาเกไส้หมู” ซึ่งกรรมวิธีในการผลิตสาเกไส้หมูจะใช้แรงงานคนเกือบทั้งหมดในการผลิต ตั้งแต่การกวนไส้ การปั้นไส้ การผสมแป้ง รวมถึงการขึ้นรูปเพื่อห่อไส้จนกระทั่งนำไปนึ่ง ซึ่งการผลิตเพื่อจำหน่ายจะอยู่ในรูปแบบร้านค้าขนาดเล็กและร้านค้าขนาดกลาง ปัจจุบันสาเกไส้หมูเริ่มมีการผลิตเพื่อจำหน่ายในระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือ SME โดยเฉพาะสาเกไส้หมูที่มีรสชาติดีเป็นที่ต้องการของผู้บริโภค มีการผลิตเป็นจำนวนมากต่อวัน ผู้ผลิตจึงต้องผลิตสินค้าให้ทันตามความต้องการของลูกค้าซึ่งเป็นการผลิตวันต่อวัน ดังนั้นการใช้เครื่องจักรเข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตสาเกไส้หมู ลดความเมื่อยล้าในกระบวนการผลิตจากคนเพิ่มปริมาณการผลิตสาเกไส้หมูให้ได้มากขึ้น ทุนเวลาในการทำงาน และลดค่าใช้จ่ายในการจ้างแรงงานจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ ดังนั้นด้วยความนิยมบริโภคสาเกไส้หมูทั้งในครัวเรือนและการจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ทางคณะผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดในการพัฒนาเครื่องขึ้นรูปสาเกไส้หมูกึ่งอัตโนมัติ เพื่อเป็นเครื่องทุนแรงสำหรับผู้ประกอบการที่ผลิตสาเกไส้หมูจำหน่ายโดยใช้หลักพื้นฐานในการออกแบบ คือ สะดวก สะอาด และปลอดภัย

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเม็ดสาธูไส้หมู

วัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงลักษณะทางกายภาพของเม็ดสาธูไส้หมู [4] ได้แก่ ขนาดความกว้าง (W) ความสูง (H) และความหนา (T) ของเม็ดสาธูไส้หมู แสดงดังรูปที่ 1 สำหรับใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบชุดขึ้นรูปสาธูไส้หมู และคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลำเลียงไส้และแป้ง ดำเนินการศึกษาโดยการสุ่มขนาดของสาธูไส้หมูที่วางขายตามท้องตลาดจำนวน 10 ร้านค้า จำนวนร้านละ 5 เม็ด จากการศึกษาพบว่าความกว้างของเม็ดสาธูไส้หมูมีค่าระหว่าง 2.96-3.11 เซนติเมตร มีค่าเฉลี่ย 3.03 ± 0.02 เซนติเมตร ความสูงของเม็ดสาธูไส้หมูมีค่าระหว่าง 2.86-3.12 เซนติเมตร มีค่าเฉลี่ย 2.98 ± 0.01 เซนติเมตร ความหนาของเม็ดสาธูไส้หมูมีค่าระหว่าง 2.81-3.06 เซนติเมตร มีค่าเฉลี่ย 2.93 ± 0.05 เซนติเมตร แสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งจะใช้ค่าที่ได้นี้ไปออกแบบและพัฒนาเครื่องขึ้นรูปสาธูไส้หมูกึ่งอัตโนมัติให้สามารถทำงานได้สะดวก สะอาด และปลอดภัย



รูปที่ 1 การวัดขนาดของเม็ดสาธูไส้หมูทั้งสามด้าน (ความกว้าง ความสูง และ ความหนา)

ตารางที่ 1 ขนาดจากการของเม็ดสาธูไส้หมูทั้งสามด้าน (ความกว้าง ความสูง และ ความหนา)

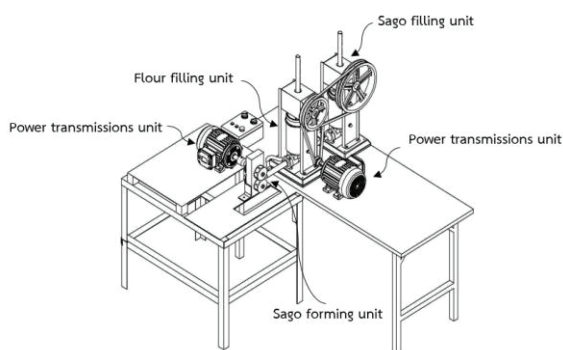
	ขนาด (cm)*		
	ความกว้าง (W)	ความสูง (H)	ความหนา (T)
ค่าสูงสุด	3.11 ± 0.06	3.12 ± 0.15	3.06 ± 0.11
ค่าต่ำสุด	2.96 ± 0.03	2.86 ± 0.05	2.81 ± 0.09
ค่าเฉลี่ย	3.03 ± 0.02	2.98 ± 0.01	2.93 ± 0.05

*ข้อมูลได้จากค่าเฉลี่ยการทดสอบตัวอย่างจำนวน 50 ตัวอย่าง (mean $\pm$ SD)

2.2 หลักการออกแบบพัฒนาเครื่องขึ้นรูปสาธูไส้หมูกึ่งอัตโนมัติ

การออกแบบพัฒนาเครื่องขึ้นรูปสาธูไส้หมูกึ่งอัตโนมัติใช้ข้อมูลเบื้องต้นจากสมบัติทางกายภาพของสาธูไส้หมูที่ได้ศึกษาในหัวข้อ 2.1 โดยนำมาเป็นพื้นฐานของการออกแบบชุดขึ้นรูปสาธูไส้หมูเป็นทรงกลมขนาดเฉลี่ย 2.93 ± 0.05 เซนติเมตร และได้ประยุกต์ใช้ความรู้และหลักการออกแบบเครื่องจักรกล [5] และเครื่องจักรกลเกษตร [6, 7] ในการคำนวณขนาดของชิ้นส่วนต่าง ๆ ขนาดต้นก้างที่ใช้ รวมทั้งใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบและเขียนแบบ [8] ดังนั้นจึงสามารถออกแบบตามองค์ประกอบหลักของสาธูไส้หมู คือ ส่วนของแป้งและส่วนของไส้ที่ต้องทำการขึ้นรูปในลักษณะแบ่งห่อหุ้มไส้ด้านใน ดังนั้นการศึกษาข้อมูลของเครื่องต่าง ๆ ที่มีหลักการงานคล้ายคลึงกันประกอบกับข้อมูลพื้นฐานเชิงวิศวกรรม จึงได้ออกแบบพัฒนาเครื่องขึ้นรูปสาธูไส้หมูกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก คือ โครงสร้างเครื่อง (Main frame) ส่วนอัดแป้ง (Flour filling unit) ส่วนอัดไส้สาธู (Sago filling unit) ชุดขึ้นรูปสาธูไส้หมู (Sago forming unit) ระบบส่งกำลัง (Power transmissions unit) และใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังจำนวน 2 ตัว ขนาด 1.0 แรงม้า สำหรับส่วนอัดแป้งและไส้ และขนาด 0.5 แรงม้า สำหรับชุดขึ้นรูปสาธูไส้หมู ทั้งนี้สองส่วนแรกติดตั้งบนโครงสร้างเดียวกัน และทำการแยก

ชุดขึ้นรูปสาฎไ้หมออกมายังตำแหน่งด้านข้าง แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 2



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 องค์ประกอบทั้งหมดของเครื่องขึ้นรูป
สาฎไ้หมกึ่งอัตโนมัติ

(ก) เครื่องขึ้นรูปสาฎไ้หมกึ่งอัตโนมัติจากการออกแบบ

(ข) เครื่องขึ้นรูปสาฎไ้หมกึ่งอัตโนมัติต้นแบบ

ก. โครงสร้างเครื่อง (Main frame): โครงสร้างของเครื่องทั้งหมดประกอบด้วย ส่วนอัดแป้ง ส่วนอัดไ้ส้ท่อลำเลียง ระบบส่งกำลัง ทั้งหมดติดตั้งอยู่บนโต๊ะวางอุปกรณ์ เพื่อความสะดวกในการทำงาน และมีพื้นที่สำหรับวางวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์หลังการผลิต ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องขึ้นรูปสาฎไ้หมจะติดตั้งบนโครงสร้างด้วยน๊อตและสกรู

ข. ส่วนอัดแป้ง (Flour filling unit): ทำจากวัสดุสแตนเลสประกอบด้วยถังใส่แป้งรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร สามารถบรรจุแป้งได้ 3 กิโลกรัม ด้านบนมีหน้าแปลน

ทำหน้าที่อัดแป้งที่ผ่านการผสมตามความหนืดที่ต้องการการอัดด้วยแรงจากมอเตอร์กดผ่านหน้าแปลนที่มีหน้าตัดพอดีกับเส้นผ่านศูนย์กลางของถังบรรจุแป้ง ทำให้แป้งเกิดการไหลไปยังท่อลำเลียง 2 ชั้น ซึ่งไหลอยู่ด้านนอก

ค. ส่วนอัดไ้ส้สาฎ (Sago filling unit): ทำจากวัสดุสแตนเลส ประกอบด้วย ถังใส่ไ้ส้รูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร สามารถบรรจุไ้ส้ได้ 3 กิโลกรัม ด้านบนมีหน้าแปลนทำหน้าที่อัดไ้ส้ซึ่งการอัดด้วยแรงจากมอเตอร์กดผ่านหน้าแปลนที่มีหน้าตัดพอดีกับเส้นผ่านศูนย์กลางของถังบรรจุไ้ส้ ทำให้ไ้ส้ไหลไปยังท่อลำเลียง 2 ชั้น ซึ่งไหลอยู่ด้านในแสดงดังรูปที่ 3 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 ชุดอัดแป้ง (ก) และชุดอัดไ้ส้สาฎ (ข)

ง. ชุดขึ้นรูปสาฎไ้ส้ (Sago forming unit): แสดงดังรูปที่ 3 ถูกออกแบบให้ทำงานต่อเนื่องจากท่อลำเลียง 2 ชั้น เพื่อทำการขึ้นรูปสาฎไ้ส้เป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร โดยออกแบบตัวกดเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 78 มิลลิเมตร หนา 30 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชั้น พร้อมทั้งทำเบ้าครึ่งทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร ที่ถูกออกแบบให้มีทิศทางการหมุนในลักษณะหมุนเข้าหากันเพื่อให้เกิดการกดและตัดคล้ายการบีบขึ้นรูป



รูปที่ 4 ชุดขึ้นรูปสาธิตไส้หนู

ในการทดสอบการทำงานของเครื่อง เบื้องต้นได้ทดสอบหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างแป้งและน้ำเพื่อเตรียมแป้ง พบว่าอัตราส่วนแป้ง 1 ส่วนต่อน้ำ 1 ส่วนได้ความหนืดของแป้งที่เหมาะสมในการนำไปใช้ทดสอบกับเครื่องขึ้นรูปสาธิตไส้หนูที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น จากนั้นเตรียมไส้ตามสูตรที่ต้องการพร้อมทั้งนำไปบรรจุในถังทั้งสองถัง จากนั้นทำการอัดทั้งแป้งและไส้ผ่านหน้าแปลนให้ไหลผ่านท่อลำเลียง 2 ชั้น และผ่านไปยังชุดขึ้นรูปสาธิตไส้หนูที่มีทิศทางการหมุนในลักษณะหมุนเข้าหากันเพื่อให้เกิดการกดและตัดคล้ายการบีบขึ้นรูปจนได้สาธิตไส้หนูที่มีรูปทรงใกล้เคียงทรงกลมมากที่สุด

2.3 การเตรียมวัตถุดิบเพื่อการทดสอบ

วัตถุดิบหลักของการทดสอบได้แก่แป้งสาธิตและไส้ซึ่งสามารถเตรียมแป้งโดยการผสมแป้งสาธิตกับน้ำในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 (สัดส่วนที่ผ่านการทดสอบแล้วว่าเหมาะสม) จากนั้นนวดแป้งให้เข้ากันเป็นอย่างดีก่อนนำไปทดสอบ ส่วนของไส้เตรียมตามสูตรที่ต้องการ

2.4 การทดสอบและประเมินสมรรถนะการทำงานของเครื่องขึ้นรูปสาธิตไส้หนูกึ่งอัตโนมัติ

หลังจากการทดสอบเบื้องต้นและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เครื่องขึ้นรูปสาธิตไส้หนูกึ่งอัตโนมัติแล้ว ต่อจากนั้นจึงได้ทดสอบเพื่อหาสมรรถนะการทำงานของเครื่องซึ่งปัจจัยที่นำมาพิจารณา ได้แก่ ความเร็วรอบของชุดขึ้นรูปสาธิตไส้หนูที่ 15, 20 และ 25 รอบ/นาที ตามลำดับ ควคุม

ความหนืดของแป้งและลักษณะของไส้ โดยในแต่ละการทดลองจะใช้น้ำหนักแป้งและไส้อย่างละ 3 กิโลกรัม ทดสอบการกดอย่างต่อเนื่องจนหมด จับเวลาการทดสอบและทำการทดสอบซ้ำ 3 ซ้ำ พร้อมทั้งใช้อัตราการผลิตเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย ความสามารถในการทำงาน ความเป็นทรงกลม และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า เป็นค่าชี้ผลการศึกษา และใช้วิธีการทางสถิติวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบปัจจัยที่ใช้ทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 [9] ซึ่งมีสมการค่าชี้ผลการศึกษาดังนี้

1) อัตราการผลิต (เม็ด/ชั่วโมง)

$$\text{อัตราการผลิต} = \frac{\text{จำนวนเม็ดสาธิตที่ได้จากการทดสอบ}}{\text{เวลาที่ใช้ทั้งหมด}} \quad (1)$$

2) เปอร์เซนต์ความเสียหายของเม็ดสาธิตไส้หนู (เปอร์เซ็นต์)

$$\text{เปอร์เซนต์ความเสียหาย} = \frac{\text{จำนวนเม็ดสาธิตไส้หนูที่เสียหาย} \times 100}{\text{จำนวนเม็ดสาธิตที่ใช้ทดสอบทั้งหมด}} \quad (2)$$

เม็ดสาธิตไส้หนูที่เสียหายคือเม็ดสาธิตไส้หนูหลังการทดสอบที่มีรอยแตก เกิดการขึ้นรูปไม่สมบูรณ์ รูปร่างไม่เป็นทรงกลม (รูปที่ 5 ข)

3) ความสามารถในการทำงานจริงของชุดขึ้นรูปสาธิตไส้หนูกึ่งอัตโนมัติ (เม็ด/ชั่วโมง)

$$\text{ความสามารถในการทำงานจริง} = \frac{\text{จำนวนเม็ดสาธิตที่ได้จากการทดสอบ}}{\text{เวลาที่ใช้ทั้งหมด}} \quad (3)$$

4) ความเป็นทรงกลม (Sphericity, ϕ) ใช้เวอร์เนียร์ในการตรวจวัดขนาดพร้อมทั้งคำนวณค่าได้จากสมการที่ 4 [10]

$$\text{ความเป็นทรงกลม } (\phi) = \frac{\sqrt[3]{WHT}}{W} \quad (4)$$

โดยกำหนดให้

W คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ยาวที่สุด (มิลลิเมตร)

H คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตั้งฉากกับ W และมีขนาดเล็กกว่า W (มิลลิเมตร)

T คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตั้งฉากกับ W และ H และมีขนาดสั้นที่สุด (มิลลิเมตร)

5) อัตราการสิ้นเปลืองไฟฟ้าของเครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หมู (กิโวลต์-ชั่วโมง)

อ่านค่าอัตราการสิ้นเปลืองไฟฟ้าจากกิโวลต์มิเตอร์ ณ ตำแหน่งต้นกำลังประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าจำนวน 2 ตัว ขนาด 1.0 แอมป์ สำหรับส่วนอัดแป้งและไส้ และขนาด 0.5 แอมป์ สำหรับชุดขึ้นรูปสาकुไส้หมูที่ต่อเข้ากับเครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หมูกึ่งอัตโนมัติทดสอบ

2.5 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

ก) การวิเคราะห์และประเมินค่าใช้จ่ายโดยเฉลี่ย

วิธีการประเมินค่าใช้จ่ายโดยรวมเกี่ยวกับต้นทุนในการใช้งานชุดขึ้นรูปสาकुไส้หมูกึ่งอัตโนมัติ สมมติว่าร้านค้าซื้อเครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หมูกึ่งอัตโนมัติแทนวิธีการใช้แรงงานคน ซึ่งค่าใช้จ่ายโดยรวมจะประกอบด้วยต้นทุนคงที่ (Fixed cost) และต้นทุนผันแปร (Variable cost) โดยต้นทุนคงที่ ได้แก่ ค่าเสื่อมราคาของเครื่อง (คิดค่าเสื่อมราคาโดยวิธีเส้นตรงเมื่อประมาณอายุการใช้งานของเครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หมูกึ่งอัตโนมัติได้ 5 ปี) และค่าเสียโอกาสของเงินทุน (คิดอัตราดอกเบี้ย 10%) ซึ่งค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนคงที่จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการผลิตสาकुไส้หมู (Hunt, 2001)

ข) การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (Pay-back period)

เป็นการคาดคะเนว่า เมื่อลงทุนใช้เครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หมูกึ่งอัตโนมัติไปแล้ว จะได้รับผลตอบแทนกลับคืนมาในจำนวนเงินเท่ากับที่ลงทุนไปแล้วภายในระยะกี่ปี โดยคิดจากราคาในการลงทุนซื้อเครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หมูกึ่งอัตโนมัติกับผลประโยชน์สุทธิที่คาดว่าจะได้รับในการใช้งานเครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หมูกึ่งอัตโนมัติ 5 ปี [11]

2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ที่ระดับความแตกต่างทางสถิติ 95% (One-way analysis

of variance (ANOVA)) และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธีของ Duncan New's Multiple Range Test (DMRT)

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

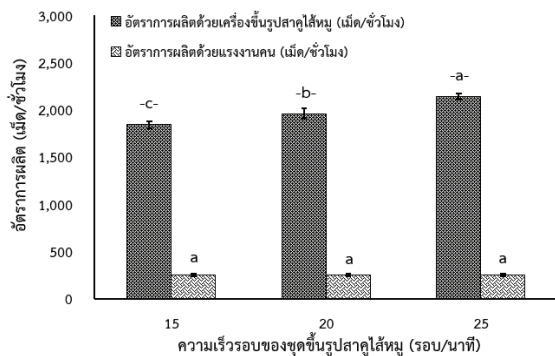
3.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของการทำงานของเครื่องต้นแบบ

การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่อง โดยพิจารณาผลที่เกิดขึ้นจากการปรับความเร็วรอบของชุดขึ้นรูปสาकुไส้หมู 15, 20 และ 25 รอบ/นาที ตามลำดับ ให้ผลการทดลองดังนี้

3.1.1 อัตราการผลิต

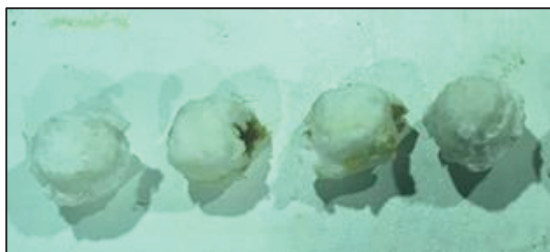
จากรูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบอัตราการผลิตสาकुไส้หมูด้วยเครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หมูกึ่งอัตโนมัติ โดยพิจารณาอัตราการผลิตใน 1 ชั่วโมง นับจำนวนเม็ดสาकुไส้หมูทั้งหมด รวมในส่วนที่ขึ้นรูปได้เป็นทรงกลมและใกล้เคียงทรงกลม (รูปที่ 5 (ก)) และที่มีลักษณะเสียหาย (รูปที่ 5 (ข)) จากการทดสอบที่ความเร็วรอบของชุดขึ้นรูปสาकुไส้หมู 15 รอบ/นาที ให้อัตราการผลิต 1,842 ลูก/ชั่วโมง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เป็น 1,960 ลูก/ชั่วโมง และ 2,138 ลูก/ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 20 รอบ/นาที และ 25 รอบ/นาที ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าด้วยความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการกดและอัดสาकुไส้หมูที่ถูกลำเลียงผ่านท่อสองชั้นสูงขึ้น ส่งผลให้การขึ้นรูปของเม็ดสาकुทำได้ในปริมาณมาก แต่ในทางตรงข้ามกลับพบว่า มีรูปทรงไม่ค่อยเป็นรูปทรง มีลักษณะความเสียหายจากการขึ้นรูปค่อนข้างสูง ได้แก่ แป้งไม่สามารถห่อหุ้มไส้ได้ แป้งและไส้แตกออกจากกัน มีองค์ประกอบไม่ครบทั้งสองส่วน แสดงผลดังรูปที่ 6 ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วรอบไม่เหมาะสม อย่างไรก็ตามความเร็วรอบของชุดขึ้นรูปสาकुไส้หมู 15 รอบ/นาที ให้ปริมาณคุณภาพดีของเม็ดสาकुที่มากกว่าความเร็วรอบ 20 รอบ/นาที และ 25 รอบ/นาที และเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการผลิตสาकुไส้หมูจากแรงงานคนอยู่ที่ประมาณ 250 ลูก/ชั่วโมง อ้างอิงจากการจับเวลาการทำงานจริงของ

แม่ค้าที่จำหน่ายสาकुไส้หมู พบว่า เครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หมู กิ่งอัตโนมัติให้กำลังการผลิตสูงกว่าถึง 8 เท่า เนื่องจาก เครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หมูสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ในขณะที่การใช้แรงงานคนใช้เวลาค่อนข้างนานกว่ามาก และทำงานไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 5 เปรียบเทียบอัตราการผลิตสาकुไส้หมูด้วยเครื่อง ที่ความเร็วรอบของชุดขึ้นรูปต่าง ๆ กับการผลิตด้วยแรงงานคน

a, b อักษรต่างกันในแต่ละความเร็วรอบ หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติ ตามการวิเคราะห์แบบ DMRT ($P<0.05$)



(ก)

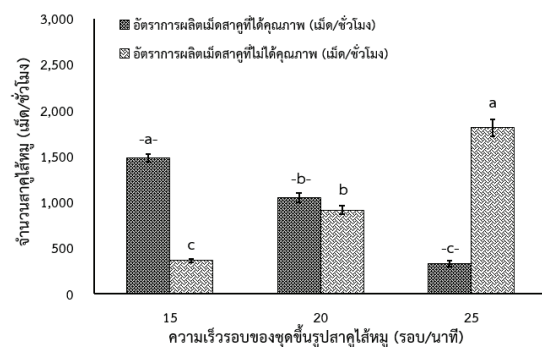


(ข)

รูปที่ 6 ลักษณะสาकुไส้หมูจากการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูป สาकुไส้หมูกึ่งอัตโนมัติ
(ก) สาकुไส้หมูคุณภาพดี
(ข) สาकुไส้หมูที่ไม่ได้คุณภาพ

3.1.2 อัตราความเสียหาย

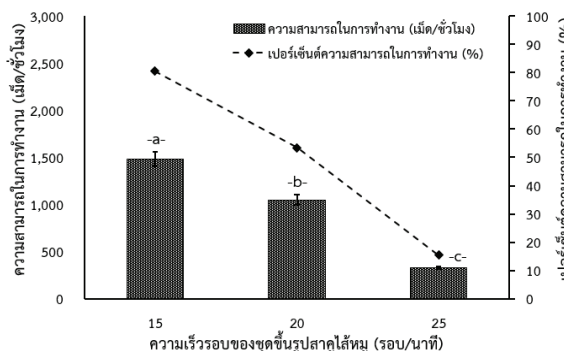
จากการทดสอบผลของการขึ้นรูปสาकुไส้หมูพบว่า เม็ดสาकुบางเม็ดไม่สามารถขึ้นรูปได้ ทั้งนี้เนื่องด้วย ความเร็วรอบของชุดขึ้นรูปสาकुไส้หมูไม่เหมาะสม ส่งผล อย่างชัดเจนต่อความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยความเสียหาย ของเม็ดสาकुพิจารณาจากขนาดที่ขึ้นรูปไม่ได้ขนาดตามที่ ต้องการ รูปทรงไม่เป็นทรงกลมหรือใกล้เคียงทรงกลม เม็ดสาकुแตกแบ่งไม่สามารถห่อไส้ได้ เป็นต้น (รูปที่ 5 (ข)) ในขณะที่ลักษณะที่เม็ดสาकुที่ยอมรับได้สังเกตจาก ได้ขนาดตามที่ต้องการ มีลักษณะรูปทรงกลมหรือค่อนข้าง กลม มีการห่อของแป้งและไส้ เป็นต้น แสดงลักษณะ ดังรูปที่ 5 (ก) จากรูปที่ 6 อัตราความเสียหายของเม็ดสาकु ที่ความเร็วรอบของชุดขึ้นรูปสาकुไส้หมู 15 รอบ/นาที ให้ อัตราความเสียหาย 360 ลูก/ชั่วโมง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) เป็น 912 ลูก/ชั่วโมง และ 1,810 ลูก/ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 20 รอบ/นาที และ 25 รอบ/นาที ตามลำดับ ดังนั้นจึงพบว่าที่ความเร็วรอบของ ชุดขึ้นรูปสาकुไส้หมู 15 รอบ/นาที ให้อัตราการผลิตสูงสุด และอัตราความเสียหายต่ำสุด ได้ลักษณะการขึ้นรูปเม็ดสาकु ที่ยอมรับได้ จึงเหมาะสมสำหรับแนะนำเพื่อการนำไปใช้ งานของเครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หมูกึ่งอัตโนมัติต่อไป



รูปที่ 7 เปรียบเทียบจำนวนเม็ดสาकुที่ได้คุณภาพและ ที่ไม่ได้คุณภาพจากการผลิตด้วยเครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หมู กึ่งอัตโนมัติที่ความเร็วรอบของชุดขึ้นรูปต่าง ๆ
a, b อักษรต่างกันในแต่ละความเร็วรอบ หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติ ตามการวิเคราะห์แบบ DMRT ($P<0.05$)

3.1.3 ความสามารถในการทำงานจริงของเครื่อง

จากการทดสอบความสามารถในการทำงานจริงของเครื่อง แสดงดังรูปที่ 7 โดยการพิจารณาจากเมล็ดสาकुที่มีคุณภาพดี พบว่าที่ความเร็วรอบของชุดขึ้นรูปสาकुไส้หนู 15 รอบ/นาที ให้ค่าความสามารถในการทำงานจริงของเครื่อง 1,481 เม็ด/ชั่วโมง หรือ 80 เปอร์เซ็นต์ และลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ที่ 1,048 เม็ด/ชั่วโมง และ 328 เม็ด/ชั่วโมง เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของชุดขึ้นรูปสาकुไส้หนูเป็น 20 รอบ/นาที และ 25 รอบ/นาที ตามลำดับการที่เกิดความเสียหายของเมล็ดสาकुค่อนข้างมากที่ความเร็วรอบของชุดขึ้นรูปสูงเกินไป สังเกตได้ว่าเกิดจากความไม่สัมพันธ์กันของความเร็วในการกดอัดแป้งและไส้ที่ผ่านมายังท่อลำเลียงกับความเร็วในการกดอัดของชุดขึ้นรูป อย่างไรก็ตาม การทดสอบนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาความเร็วที่เหมาะสมของทั้งสองส่วนซึ่งให้ผลการทดสอบเป็นที่น่าพึงพอใจแสดงดังรูปที่ 7



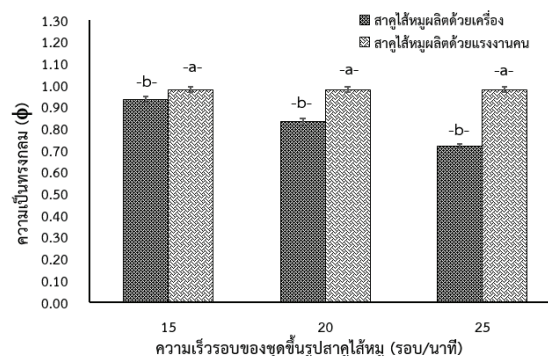
รูปที่ 8 ความสามารถในการทำงานของเครื่องขึ้นรูป

สาकुไส้หนูกึ่งอัตโนมัติที่ความเร็วรอบของชุดขึ้นรูปต่าง ๆ
^{a, b}อักษรต่างกันในแต่ละความเร็วรอบ หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติ ตามการวิเคราะห์แบบ DMRT ($P < 0.05$)

3.1.4 คุณสมบัติทางกายภาพ

ลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งของสาकुไส้หนูคือลักษณะทางกายภาพด้านเป็นทรงกลม (Sphericity, ϕ) หรือค่อนข้างกลม ดังนั้นจากการทดสอบวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของสาकुไส้หนูจากการทดสอบด้วยเครื่องเปรียบเทียบกับสาकुไส้หนูที่วางขายตามท้องตลาด

ให้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 8 ทั้งนี้ค่าความเป็นทรงกลมพิจารณาได้จากสมการที่ (4) จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความเป็นทรงกลมของเมล็ดสาकुที่วางขายตามท้องตลาดหรือที่ทำการขึ้นรูปด้วยแรงงานคนให้ค่าประมาณ 0.98 ในขณะที่เมื่อทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หนูกึ่งอัตโนมัติ ให้ค่าระหว่าง 0.72-0.93 โดยที่ความเร็วรอบของชุดขึ้นรูปสาकुไส้หนู 15 รอบ/นาที ให้ค่าความเป็นทรงกลมใกล้เคียงกับสาकुที่วางขายตามท้องตลาดมากที่สุด (0.93) อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเปรียบเทียบทางสถิติระหว่างการขึ้นรูปสาकुไส้หนูด้วยคนและการขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรด้วยการวิเคราะห์ผล t-test ที่เป็น Independent-sample t test พบว่า ทั้งสามความเร็วรอบให้ค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



รูปที่ 9 ความเป็นทรงกลมของสาकुไส้หนูที่ผลิตจากเครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หนูกึ่งอัตโนมัติที่ความเร็วรอบของชุดขึ้นรูปต่าง ๆ

^{a, b}อักษรต่างกันในแต่ละความเร็วรอบ หมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติ ตามการวิเคราะห์แบบ DMRT ($P < 0.05$)

3.1.5 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

ทดสอบพบว่าอัตราการสิ้นเปลืองไฟฟ้าเท่ากับ 0.88 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

3.2 ผลการวิเคราะห์และประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์

จากผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม โดยคิดที่ราคาเครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หนูต้นแบบ 25,000 บาท อายุการใช้งาน 5 ปี อัตราดอกเบี้ย 10% ใช้ผู้ควบคุม

เครื่อง 1 คน ความสามารถในการทำงาน 1,481 เมล็ด/ชั่วโมง อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 0.88 กิโลวัตต์-ชั่วโมง จำนวนต้นทุนคงที่ได้ 5,875 บาท/ปี และต้นทุนผันแปร 60,235 บาท/ปี ค่าใช้จ่ายรวม 66,110 บาท/ปี (ตารางที่ 2) หรือคิดเป็น 0.031 บาท/เมล็ด เมื่อใช้เครื่องทำงาน 1,440 ชั่วโมง/ปี (กำหนดให้เครื่องทำงาน 8 ชั่วโมง/วัน ทำงานปีละ 180 วัน) จะมีระยะเวลาคืนทุน 60 วัน

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของเครื่องขึ้นรูปสาकुไส้หมูกึ่งอัตโนมัติ

Particular	Amount
Fixed cost	
- Purchase price, P_p	25,000 Baht
- Salvage value, $S = 10\% P_p$	2,500 Baht
- Useful life of the forming, y_r	5 years
- Interest rate	10% / year
1) Depreciation, $D = (P_p - S)/y_r$	4,500 Baht/year
2) Interest, $I = (P_p + S)i / 2$	1,375 Baht/year
3) Total fixed cost, $F_c = (1) + (2)$	5,875 Baht/year
Variable cost	
- Assume working/year	180 days
- Regular working hours	8 hours/day
- Capacity of machine	1,481 seeds/hour
- Assume repair and maintenance rate	10 Baht/day
- Power consumption	0.88 kW-hour
- Labor cost for operation	300/day
4) Repair and maintenance cost, 10×180	1,800 Baht/year
5) Power consumption cost, $0.88 \times 3.5 \times 180 \times 8$	4,435 Baht/year
6) Labor cost, 300×180	54,000 Baht/year
7) Total Variable cost, $V_c = (4) + (5) + (6)$	60,235 Baht/year
8) Total operating cost, $T_c = (3) + (7)$	66,110 Baht/year

ความเมื่อยล้าในกระบวนการผลิตจากคน เพิ่มปริมาณการผลิตสาकुไส้หมูให้ได้มากขึ้น ทุนเวลาในการทำงาน

และลดค่าใช้จ่ายในการจ้างแรงงาน โดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาข้อมูลที่เป็นต่อการออกแบบจนได้เครื่องต้นแบบที่มีส่วนประกอบหลัก คือ โครงสร้างเครื่อง ส่วนอัดแป้ง ส่วนอัดไส้สาकु ชุดขึ้นรูปสาकुไส้หมู ระบบส่งกำลัง และใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง จำนวน 2 ตัว ขนาด 1.0 แรงม้า สำหรับส่วนอัดแป้งและไส้ และขนาด 0.5 แรงม้า สำหรับชุดขึ้นรูปสาकुไส้หมู จากผลการทดสอบพบว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้ดีที่สุดที่อัตราส่วนแป้งกับน้ำ 1 ต่อ 1 และชุดแป้งขึ้นรูปสาकुไส้หมูสามารถทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเร็วรอบ 15 รอบ/นาที โดยสามารถขึ้นรูปสาकुไส้หมูให้มีค่าความเป็นทรงกลม 0.93 ซึ่งใกล้เคียงกับการขึ้นรูปด้วยแรงงานคน ให้ค่าความสามารถในการทำงานจริงของเครื่อง 1,481 ลูก/ชั่วโมง และเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย 20 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของชุดขึ้นรูปสาकुไส้หมูเป็น 20 รอบ/นาที และ 25 รอบ/นาที ให้ความสามารถในการทำงานจริงของเครื่องลดลงเป็น 1,048 และ 328 ลูก/ชั่วโมง ตามลำดับ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 0.88 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และระยะเวลาคืนทุน 60 วัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนงบประมาณ วัสดุ อุปกรณ์ และภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] อัมพวัน ตันสกุล ศักรินทร์ ภูมิรัตน์ และ ชยานินทร์ พัวพันธูมา. สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเมล็ดสาकु. วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2545; 25(4): 347-358.
- [2] จรรยา สุบรรณ. ตำรับอาหาร ชุดพิเศษ. 2542; [ระบบออนไลน์] แหล่งข้อมูล: <https://th.wikipedia.org/wiki/แป้งมันสำปะหลัง>.

- [3] ประชาชาติ. แป้งมันสำปะหลัง. 2560; [ระบบออนไลน์] แหล่งข้อมูล: https://www.prachachat.net/news_detail.php?newsid=1490178952.
- [4] Sahin, S., and Sumnu, S.G. Physical Properties of Foods. New York, Springer Science Business Media, 2006.
- [5] Shigley, J.E. and Mischke, C.R. Mechanical Engineering Design. 5th Edition. McGraw- Hill Book Company, USA. 1989.
- [6] จตุรงค์ ลึงกาฬพันธุ์. ทฤษฎีของเครื่องจักรกลเกษตร. สำนักพิมพ์ทริปเพิ้ล เอ็ดดูเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ, 2558.
- [7] Krutz, G., Thomson, L., and Claar, P. Design of Agricultural Machinery. John Wiley and Sons. New York Chichester Brisbane, Toronto, Singapore, 1994.
- [8] จตุรงค์ ลึงกาฬพันธุ์. ออกแบบและเขียนแบบวิศวกรรมด้วยโปรแกรม SolidWorks (ฉบับเรียนได้ด้วยตัวเอง). สำนักพิมพ์ทริปเพิ้ล เอ็ดดูเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ, 2555.
- [9] Gomez, K.A., and Gomez, A.A. Statistical Procedure for Agricultural Research. 2nd Edition, John Wiley and Sons, New York, 1984.
- [10] Mohsenin, N.N. Physical properties of plant and animal materials. Structure, physical characteristics and mechanical proprieties. 2nd Edition. Gordon and Breach Science Publishers. Inc. New York, USA, 1986.
- [11] Hunt, D. Farm Power and Machinery. 10th Edition, Iowa State University Press. Ames, Iowa, 2001.



การหาปริมาณการผลิตที่เหมาะสมภายใต้ การล้าสมัยอย่างฉับพลันและการเกิดเครื่องจักรขัดข้อง โดยพิจารณาเวลาในการซ่อม Production Lot Sizing Problem with Sudden Obsolescence and Machine Breakdowns Considering Repair Time

พรชนันท์ ขุริมนต์ และ ธนาวรรณ นียะโมสธ*

Parachanun Khurimon and Thanawath Niyamosoth*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 หมู่ 16 ถ.มิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University
123 Moo 16 Mittapap Rd., Nai-Muang, Muang District, Khon Kaen, 40002, Thailand

*E-mail: thanani@kku.ac.th, Tel.: +669 9219 6091

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับงานทางด้านการวางแผนการผลิต และควบคุมปริมาณสินค้าคงคลัง โดยมีจุดประสงค์เพื่อหาปริมาณการผลิตที่เหมาะสมที่ทำให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด ภายใต้การล้าสมัยอย่างฉับพลันของสินค้าและการเกิดเครื่องจักรขัดข้อง โดยพิจารณาช่วงเวลาที่เกิดความขัดข้องด้วย จากการศึกษาพบว่าอัตราการเกิดความขัดข้อง ระยะเวลาการซ่อมโดยเฉลี่ย และต้นทุนสินค้าล้าสมัยมีผลต่อต้นทุนรวมและปริมาณการผลิตที่เหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญ ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยชิ้นนี้คือช่วยให้การพิจารณาหาขนาดการผลิตมีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น สอดคล้องกับสภาพธุรกิจในปัจจุบันที่สินค้าที่ผลิตมีการเปลี่ยนรุ่นอยู่เสมอและเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตมีความซับซ้อนสูงซึ่งมีแนวโน้มจะเกิดความขัดข้องได้ง่าย

ABSTRACT

In this work, we study an unreliable production system that produces a particular product subject to sudden obsolescence. The purpose of our work is to determine the optimal lot size that minimizes the total expected cost during product lifetime considering machine breakdowns and repair time. The numerical results show that failure rate, mean repair time, and obsolescence cost have significant impact on the optimal lot size. The managerial insight obtained by this research can support the manager in making decision concerning the production lot size more properly.

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีอย่างรวดเร็วในปัจจุบันได้ก่อให้เกิดประเด็นท้าทายใหม่ ๆ แก่อุตสาหกรรม

ประเด็นหนึ่งที่สำคัญ คือ เรื่องการควบคุมสินค้าคงคลัง สำหรับสินค้าที่มีแนวโน้มจะเกิดการล้าสมัย โดยปกติเมื่อสินค้าเกิดการล้าสมัย ความต้องการของสินค้านั้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้สินค้าคงคลังที่เหลืออยู่ต้อง

ถูกจำหน่ายออกไปในราคาที่ต่ำกว่าราคาขายตามปกติ ก่อให้เกิดต้นทุนสินค้าต่ำสุดต่อธุรกิจ ดังนั้น การผลิตสินค้าคงคลังมากเกินไปจนสามารถนำไปสู่การเกิดต้นทุนสินค้าต่ำสุดที่สูงมากได้ วิธีการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้แก้ปัญหานี้ได้คือการสั่งผลิตในปริมาณน้อย ๆ ด้วยขนาดรุ่นที่เล็ก อย่างไรก็ตามการผลิตในปริมาณน้อยสามารถก่อให้เกิดความเสี่ยงที่จะมีปริมาณการผลิตสินค้าไม่เพียงพอต่อการตอบสนองความต้องการลูกค้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตหยุดทำงานเนื่องจากเกิดความขัดข้อง ดังนั้น เพื่อชดเชยปริมาณการผลิตที่สูญเสียไปในระหว่างที่เครื่องจักรเกิดความขัดข้อง ผู้ประกอบการมีแนวโน้มที่จะผลิตสินค้าในปริมาณมากขึ้นด้วยขนาดรุ่นที่ใหญ่ขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผู้ประกอบการจะต้องเผชิญกับการตัดสินใจว่าควรจะทำคำสั่งผลิตด้วยขนาดรุ่นที่เล็กหรือด้วยขนาดรุ่นที่ใหญ่จึงจะเหมาะสม เมื่อต้องรับมือกับทั้งประเด็นการเกิดสินค้าต่ำสุดและประเด็นการเกิดเครื่องจักรขัดข้อง

ปัญหาการจัดการสินค้าคงคลังภายใต้การเกิดสินค้าต่ำสุดได้ถูกศึกษาเป็นครั้งแรก ๆ โดย Brown และคณะ [1] ซึ่งได้นำเสนอแบบจำลองปัญหาสินค้าคงคลังแบบพลวัต โดยพิจารณาการเกิดสินค้าต่ำสุดของสินค้าเป็นแหล่งกำเนิดหนึ่งของความแปรปรวนของความต้องการ ในอนาคต Master [2] ได้พิจารณาการเกิดสินค้าต่ำสุดอย่างซับซ้อนในแบบจำลองการหาปริมาณการสั่งที่ประหยัด (Economic Order Quantity หรือ EOQ) โดยผู้ศึกษาได้สรุปว่า ขนาดรุ่นการสั่งที่ประหยัดเมื่อพิจารณาการเกิดสินค้าต่ำสุดจะเล็กกว่าขนาดรุ่นการสั่งที่ประหยัดในแบบจำลอง EOQ แบบปกติเสมอ Song และ Zipkin [3] ได้นำแบบจำลองของมาร์คอฟโซลูชันมาใช้ในการศึกษาผลกระทบของการเกิดสินค้าต่ำสุดที่มีต่อการจัดการสินค้าคงคลัง ผู้วิจัยได้สรุปว่า การค้าต่ำสุดของสินค้ามีผลต่อการตัดสินใจด้านการจัดการสินค้าคงคลังอย่างมีนัยสำคัญ David และคณะ [4] ได้ประยุกต์ใช้การโปรแกรมเชิงพลวัต (Dynamic Programming) ในแบบจำลอง EOQ ที่มีกระบวนการเกิดสินค้าต่ำสุดขึ้นกับเวลา Fink และ

Ferrell [5] ได้นำเทคนิคห่วงโซ่มาร์คอฟ (Markov Chains) มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองสินค้าคงคลังแบบคาบเวลาสำหรับสินค้าที่สามารถเกิดการเสื่อมสภาพต่ำสุด หรือทั้งสองอย่าง และทำการเปรียบเทียบประสิทธิผลของนโยบายสินค้าคงคลังหลาย ๆ นโยบาย Song และ Lau [6] ได้นำเสนอแบบจำลองสินค้าคงคลังแบบคาบเวลา โดยพิจารณาการเกิดสินค้าต่ำสุดอย่างซับซ้อน โดยนโยบายการสั่งซื้อที่เหมาะสมในแต่ละช่วงเวลาสามารถหาได้โดยใช้เทคนิคการโปรแกรมเชิงพลวัต Emsermann และ Simon [7] ได้พัฒนาแบบจำลองสินค้าคงคลังแบบต่อเนื่อง ภายใต้การเกิดสินค้าต่ำสุด และได้แนะนำแบบจำลองดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการบิน Prince และ Dekker [8] ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเปลี่ยนนโยบายการจัดการสินค้าคงคลัง สำหรับระบบสินค้าคงคลังที่มีการคาดการณ์ถึงความต้องการของความต้องการของลูกค้าและการเกิดสินค้าต่ำสุด Jaarsveld และ Dekker [9] ได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าเชิงปริมาณสำหรับค่าพารามิเตอร์ของการเกิดสินค้าต่ำสุดในงานวิจัยของ Prince และ Dekker [8] Prathumthip และ Niyamosoth [10] ได้นำเสนอแบบจำลองการหาขนาดการสั่งผลิตที่ประหยัด (Economic Production Quantity หรือ EPQ) ภายใต้การเกิดสินค้าต่ำสุดอย่างซับซ้อน โดยใช้กรณีศึกษาของโรงงานผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรซึ่งมีความซับซ้อนและความแม่นยำสูง (High precision parts) ในจังหวัดหนึ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย จากการศึกษาค้นคว้า พบว่า ขนาดการสั่งผลิตที่ประหยัดเมื่อพิจารณาการเกิดสินค้าต่ำสุดจะเล็กกว่าขนาดการสั่งที่ประหยัดในแบบจำลอง EPQ แบบปกติเสมอ

นอกจากประเด็นเรื่องการเกิดสินค้าต่ำสุดแล้ว ประเด็นที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้อีกประเด็นหนึ่ง คือ เรื่องการหาขนาดการสั่งผลิตในกรณีที่เครื่องจักรเกิดความขัดข้องในระหว่างการผลิต Groenevelt และคณะ [11] ได้ศึกษาผลกระทบของการเกิดเครื่องจักรขัดข้อง

ที่มีต่อปริมาณสิ่งผลิตที่ประหยัด ซึ่งผู้ศึกษาได้สรุปว่า ขนาดการสั่งผลิตที่ประหยัดเมื่อพิจารณาการเกิดเครื่องจักรขัดข้อง จะใหญ่กว่าขนาดการสั่งผลิตที่ประหยัดในแบบจำลอง EPQ แบบปกติเสมอ Groenevelt และคณะ [12] ได้ศึกษาต่อจากงานของ Groenevelt และคณะ [11] โดยได้พิจารณาเวลาที่ใช้ในการซ่อมและสต็อกเพื่อความปลอดภัย (Safety Stock) เป็นองค์ประกอบในการสร้างแบบจำลองด้วย ผลการศึกษาสรุปได้ว่า ขนาดการสั่งผลิตที่ประหยัดภายใต้การเกิดเครื่องจักรขัดข้องจะใหญ่กว่าขนาดการสั่งผลิตที่ประหยัดในแบบจำลอง EPQ แบบปกติเสมอ เช่นเดียวกัน Moinzadeh และ Aggarwal [13] ได้พิจารณา นโยบายการวางแผนการผลิตและการควบคุมปริมาณสินค้าคงคลังแบบ (s,S) สำหรับหน่วยผลิตที่เป็นคอขวดที่สามารถเกิดความขัดข้องในระหว่างการผลิตได้ พร้อมทั้งนำเสนอรูปแบบการคำนวณคุณสมบัติเชิงปฏิบัติการต่าง ๆ ของนโยบาย Ben-Daya [14] ได้นำเสนอแบบจำลองการหาขนาดการสั่งผลิตที่ประหยัดและระดับการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันแบบไม่สมบูรณ์ (Imperfect Preventive Maintenance) สำหรับกระบวนการผลิตที่สามารถเสื่อมสภาพและเกิดความขัดข้องได้ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของระดับการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน จะช่วยลดต้นทุนที่เกิดขึ้นจากการผลิตของเสียและต้นทุนการซ่อมบำรุงได้ Giri และคณะ [15] ได้นำเสนอแบบจำลองการหาขนาดการสั่งผลิตที่ประหยัดภายใต้การเกิดเครื่องจักรขัดข้องในกรณีที่มีการเกิดความขัดข้องถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันของอัตราการเกิด Chelbi และคณะ [16] ได้นำเสนอแบบจำลองการหาขนาดการสั่งผลิตที่เหมาะสมและอายุของเครื่องจักรที่ควรทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน สำหรับระบบการผลิตที่สามารถเกิดความขัดข้องและผลิตของเสียออกมาเมื่ออยู่ในสภาวะนอกควบคุม Jeang [17] ได้นำเสนอแบบจำลองสินค้าคงคลัง และการออกแบบคุณภาพสำหรับระบบการผลิตที่สามารถเกิดการเสื่อมสภาพและการขัดข้องได้ โดยมีจุดประสงค์เพื่อหาขนาดการสั่งผลิตและพารามิเตอร์ของกระบวนการที่เหมาะสม Bouslah และคณะ [18]

ได้นำเสนอแบบจำลองการหาขนาดการสั่งผลิตและอัตราการผลิตที่เหมาะสมสำหรับระบบการผลิตที่ไม่สมบูรณ์และสามารถเกิดความขัดข้องได้ โดยประยุกต์ใช้แผนการสุ่มตรวจเพื่อยอมรับเชิงเดี่ยว (Single Acceptance Sampling Plan) เป็นส่วนหนึ่งของนโยบายการควบคุมคุณภาพ Jafari และ Makis [19] ได้ประยุกต์ใช้นโยบายการบำรุงรักษาตามสภาพ (Condition-based Maintenance Policy) เข้ากับแบบจำลองการหาขนาดการสั่งผลิตที่ประหยัด เพื่อหาขนาดการสั่งผลิตและนโยบายการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่เหมาะสม Cheng และคณะ [20] ได้นำเสนอแบบจำลองการหาขนาดการสั่งผลิตที่เหมาะสมและนโยบายการบำรุงรักษาเชิงป้องกันแบบตามสภาพสำหรับระบบการผลิตที่ประกอบด้วยหลายองค์ประกอบ

แต่เดิมนั้น ปัญหาการหาขนาดการสั่งผลิตภายใต้การเกิดสินค้าล้าสมัยและปัญหาการหาขนาดการสั่งผลิตภายใต้การเกิดเครื่องจักรขัดข้องเป็นสองแนวทางวิจัยที่แยกจากกัน สำหรับแบบจำลองการหาขนาดการสั่งผลิตที่เหมาะสมที่พิจารณาทั้งประเด็นการเกิดสินค้าล้าสมัยและประเด็นการเกิดเครื่องจักรขัดข้องได้ถูกนำเสนอโดย Niyamosoth และคณะ [21] ซึ่งได้ทำการศึกษาต่อยอดจากงานวิจัยของ Prathumthip และ Niyamosoth [10] โดยใช้กรณีศึกษาของสถานประกอบการเดียวกัน โดยในงานวิจัยดังกล่าว ผู้วิจัยได้ศึกษาปัญหาการหาขนาดการสั่งผลิตที่ประหยัด โดยพิจารณาความน่าจะเป็นที่เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตสามารถเกิดความขัดข้องได้และสินค้าที่ผลิตสามารถเกิดการล้าสมัยอย่างฉับพลันได้ ซึ่งสอดคล้องกับประเด็นด้านการผลิตและการขายของสถานประกอบการที่ใช้เป็นกรณีศึกษา ซึ่งเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตมีความซับซ้อนสูง เกิดความขัดข้องได้ง่าย และชิ้นงานที่ทำการผลิตมีการล้าสมัยอย่างฉับพลันเนื่องจากการเปลี่ยนรุ่นตามการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยี โดยในงานวิจัยดังกล่าว ผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานว่าระยะเวลาที่ใช้ในการซ่อมมีค่าน้อยมาก สามารถตัดออกจากการพิจารณาได้ อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้ว ระยะเวลาในการ

ซ่อมอาจมีค่ามากจนมีผลต่อการพิจารณาการหาขนาดการผลิตที่เหมาะสม ดังนั้น งานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ทำการศึกษาต่อจากบทความดังกล่าว โดยนำเสนอแบบจำลองการหาขนาดการผลิตที่เหมาะสมภายใต้การเกิดสินค้าล้าสมัยและเครื่องจักรขัดข้องโดยพิจารณาระยะเวลาในการซ่อมด้วย ซึ่งประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยชิ้นนี้คือ จะช่วยให้การพิจารณาหาขนาดการผลิตมีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น สอดคล้องกับสภาพธุรกิจในปัจจุบันที่สินค้าที่ผลิตมีการเปลี่ยนรุ่นอยู่เสมอและเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตมีความซับซ้อนสูงซึ่งมีแนวโน้มจะเกิดความขัดข้องได้ง่าย

สำหรับหัวข้อลำดับถัดไปของงานวิจัยชิ้นนี้ประกอบด้วย หัวข้อที่ 2 แนวคิดของแบบจำลอง สมมติฐานและสัญลักษณ์ที่ใช้ หัวข้อที่ 3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หัวข้อที่ 4 การทดสอบเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ความไว และหัวข้อที่ 5 สรุปผลการศึกษา

2. แนวคิดของแบบจำลอง สมมติฐานและสัญลักษณ์ที่ใช้

ต่อไปนี้เป็นแนวคิดพื้นฐาน สมมติฐานและสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้

2.1 แนวคิดและสมมติฐานของแบบจำลอง

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองการหาขนาดการผลิตที่ประหยัด โดยพิจารณาความน่าจะเป็นที่เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตสามารถเกิดความขัดข้องได้ ในระหว่างที่ทำการผลิต นอกจากนี้ยังได้พิจารณาความเสี่ยงที่สินค้าที่ผลิตได้จะเกิดการล้าสมัยอย่างฉับพลัน ณ เวลาใด ๆ ในอนาคต โดยรูปแบบของระบบการผลิตสินค้าคงคลัง การเกิดความขัดข้องและการซ่อมเครื่องจักรที่ขัดข้องให้กลับมาอยู่ในสภาพใช้งาน จะอ้างอิงจากงานวิจัยของ Groenevelt และคณะ [12] ส่วนรูปแบบการเกิดสินค้าล้าสมัยอย่างฉับพลัน จะอ้างอิงจากงานวิจัยของ Master [2] สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ เราจะสมมุติให้

การซ่อมมีลักษณะเป็นแบบสุ่ม โดยมีอัตราเกิดความขัดข้องและอัตราการซ่อมที่คงที่ กล่าวคือระยะเวลาในการเกิดความขัดข้องครั้งแรกและระยะเวลาในการซ่อมมีการกระจายแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential Distribution) และเพื่อที่จะทำให้การผลิตดำเนินไปอย่างราบรื่น เราจะต้องทำการกำหนดสต็อกเพื่อความปลอดภัยขึ้น ซึ่งสต็อกเพื่อความปลอดภัยดังกล่าวนี้จะถูกใช้ไปตลอดเวลาที่มีการเกิดความขัดข้องและการซ่อมขึ้น โดยในระหว่างที่มีการผลิตในแต่ละรอบ เราจะสมมติให้สัดส่วน β ของปริมาณชิ้นงานที่ผลิตในรอบนั้น ๆ ถูกผันไปเป็นสต็อกเพื่อความปลอดภัย ในขณะที่ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้ในการตอบสนองความต้องการของลูกค้าตามปกติ ดังนั้น หากในแต่ละรอบการผลิตมีการสั่งผลิตชิ้นงานจำนวน q หน่วย ชิ้นงานจำนวน $q\beta$ จะถูกเติมเข้าไปในสต็อกเพื่อความปลอดภัย ส่วนที่เหลืออีก $q(1-\beta)$ หน่วย จะถูกใช้ในการตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่เกิดขึ้นในรอบการผลิตนั้น ๆ โดยสต็อกเพื่อความปลอดภัยจะถูกนำมาใช้ในขณะที่เครื่องจักรเกิดความขัดข้องและมีการซ่อมเกิดขึ้น ต้นทุนสินค้าขาดสต็อก (Shortage Cost) จะเกิดขึ้นในกรณีที่เครื่องจักรเกิดความขัดข้องและสต็อกเพื่อความปลอดภัยถูกใช้จนหมดโดยไม่ขึ้นอยู่กักระดับสินค้าคงคลังในการผลิตตามปกติ (Running Stock Level) ในขณะนั้น โดยในงานวิจัยนี้จะสมมติให้ต้นทุนสินค้าขาดสต็อกดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากการสูญเสียยอดขาย (Lost Sales) รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างการดำเนินไปของระดับสินค้าคงคลังในการผลิตและระดับของสต็อกเพื่อความปลอดภัย ซึ่งจะแบ่งช่วงเวลาออกเป็น 4 ประเภท คือ Type I, Type II, Type III, และ Type IV ในช่วงเวลาประเภท Type I เครื่องจักรมีการทำงาน ดังนั้น ทั้งสต็อกเพื่อความปลอดภัยและสินค้าคงคลังในการผลิตตามปกติจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา βr และ $r(1-\beta)-d$ สำหรับช่วงเวลาประเภท Type II เครื่องจักรมีการเกิดความขัดข้องและมีการทำการซ่อม ระดับสินค้าคงคลังในการผลิตตามปกติจะไม่มีเปลี่ยนแปลง แต่ระดับสต็อกเพื่อความปลอดภัยจะลดลงด้วยอัตราเท่ากับ

d สำหรับช่วงเวลาประเภท Type III จะเกิดขึ้นในกรณี
ที่ระดับสินค้าคงคลังเพื่อความปลอดภัยมีไม่เพียงพอที่จะ
ตอบสนองความต้องการในช่วงเวลาที่มีการซ่อมและ
ช่วงเวลาก่อตั้งเครื่อง (Setup Time) ที่ตามมา จะทำให้
เกิดต้นทุนเนื่องจากการสูญเสียยอดขายขึ้น ในช่วงเวลา
ประเภท Type IV เครื่องจักรหยุดทำงานเนื่องจากเป็น
ช่วงเวลาก่อตั้งเครื่องบำรุงรักษาเชิงป้องกันพร้อมกับ
ตั้งเครื่องเพื่อทำการผลิตในรอบถัดไป ดังนั้น ในช่วงเวลานี้
ระดับสินค้าคงคลังในการผลิตตามปกติจะลดลงเนื่องจาก
สินค้าคงคลังที่มีอยู่จะถูกนำไปใช้ตอบสนองความต้องการ
ลูกค้าตามปกติ แต่ระดับของสต็อกเพื่อความปลอดภัย
จะมีค่าเท่าเดิม เนื่องจากการหยุดของเครื่องจักรไม่ได้
เกิดขึ้นจากการเกิดความขัดข้อง จึงไม่มีการนำสต็อก
เพื่อความปลอดภัยไปใช้ตอบสนองความต้องการ
ของลูกค้า นอกจากเรื่องระบบการผลิต สินค้าคงคลัง
กระบวนการในการเกิดความขัดข้องและการซ่อมแล้ว
งานวิจัยชิ้นนี้ยังได้พิจารณาความเสี่ยงที่ขึ้นงานที่ผลิต
ออกมาอาจจะเกิดการล่าช้าอย่างฉับพลัน ณ เวลาใด ๆ
ในอนาคต โดยในงานวิจัยชิ้นนี้จะสมมติให้อัตราการเกิด
สินค้าล่าช้าอย่างฉับพลันมีค่าคงที่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง
คือระยะเวลาในการเกิดสินค้าล่าช้าแต่ครั้งมีการกระจาย
แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

2.2 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะใช้สัญลักษณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- r คือ อัตราการผลิต (ชิ้น/วัน)
- d คือ อัตราความต้องการ (ชิ้น/วัน)
- h คือ ต้นทุนการถือครองสินค้าต่อหน่วยต่อวัน
(\$/หน่วย/วัน)
- S คือ ต้นทุนการตั้งเครื่องต่อครั้ง (\$)
- p คือ ต้นทุนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (\$)
- C คือ ต้นทุนการบำรุงรักษาเชิงแก้ไข (\$/วัน)
- t_s คือ เวลาที่ใช้ในการตั้งเครื่อง (วัน)
- t_m คือ ระยะเวลาการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (วัน)
- q คือ ปริมาณการผลิต (หน่วย)
- Q^* คือ ปริมาณการผลิตที่เหมาะสม (หน่วย)

α คือ ระดับการให้บริการที่ต้องการ (สัดส่วนของความ
ต้องการรวมที่ได้รับการตอบสนอง)

β คือ สัดส่วนของปริมาณการผลิตที่ถูกผันไปเป็นสต็อก
สินค้าเพื่อความปลอดภัย

λ คือ อัตราการเกิดความขัดข้องโดยเฉลี่ย (ครั้ง/วัน)

μ คือ อัตราการซ่อมแซมโดยเฉลี่ย (ครั้ง/วัน)

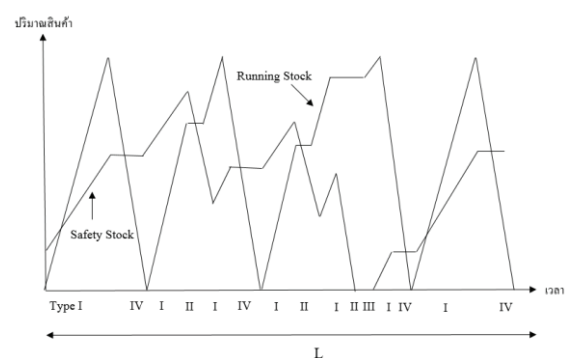
t_f คือ ระยะเวลาในการเกิดความขัดข้องครั้งแรก (วัน)
สมมติให้มีการกระจายตัวแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล
แบบ λ

t_r คือ ระยะเวลาในการซ่อม (วัน) สมมติให้มีการ
กระจายตัวแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลแบบ μ

C_S คือ ต้นทุนสินค้าล่าช้าต่อหน่วย (\$)

y คือ ระยะเวลาในการเกิดสินค้าล่าช้า (วัน) สมมติให้
มีการกระจายตัวแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลด้วยอัตรา θ

L คือ ระยะเวลาเฉลี่ยในการเกิดสินค้าล่าช้า (วัน)
$$= E[y] = \frac{1}{\theta}$$



รูปที่ 1 ระดับของสินค้าคงคลังและสต็อก
เพื่อความปลอดภัย

(อ้างอิงจากรูปของ Groenevelt และคณะ [12])

3. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ลำดับถัดไปเป็นการนำเสนอขั้นตอนการสร้าง
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ โดยมี
จุดประสงค์เพื่อคำนวณหาขนาดการผลิตที่เหมาะสม
ที่สุดที่ทำให้ต้นทุนรวมในช่วงอายุของสินค้า ซึ่ง
ประกอบด้วย ต้นทุนการตั้งเครื่อง ต้นทุนการถือครอง
สินค้าคงคลัง ต้นทุนสต็อกเพื่อความปลอดภัย ต้นทุนการ

บำรุงรักษา และต้นทุนสินค้าสามัญ มีค่าต่ำที่สุด ทั้งนี้ ระดับการให้บริการที่ต้องการ (α) ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 กล่าว คือ ไม่มีการเกิดสินค้าขาดแคลน ดังนั้น จึงไม่มีการพิจารณาต้นทุนสินค้าขาดแคลนในแบบจำลองนี้

3.1 ขนาดความยาวของรอบการสั่งผลิต (Cycle Length)

จากงานของ Groenevelt และคณะ [12] เราสามารถหาค่าคาดหวังของความยาวรอบการสั่งผลิตได้โดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$E[\text{Cycle Length}] = \frac{q(1-\beta)}{d} + \frac{q\lambda}{r} (E[t_r] + t_s) \quad (1)$$

โดยความยาวรอบการสั่งผลิตหนึ่งรอบจะเริ่มตั้งแต่การเริ่มต้นการผลิตชิ้นงานจำนวน q หน่วย ไปจนถึงการเริ่มการผลิตชิ้นงานจำนวน q หน่วยครั้งต่อไป ซึ่งจะรวมระยะเวลาในการผลิต ระยะเวลาที่หยุดการผลิตเพื่อทำการบำรุงรักษาและตั้งเครื่อง และระยะเวลาที่ใช้ในการซ่อมในกรณีที่เกิดความขัดข้อง โดยระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตบวกระยะเวลาที่เครื่องจักรหยุดเนื่องจากการบำรุงรักษาเชิงป้องกันและระยะเวลาที่ใช้ในการตั้งเครื่องเพื่อทำการผลิตในรอบต่อไปจะมีค่าเท่ากับ $\frac{q(1-\beta)}{d}$

สำหรับค่าคาดหวังของเวลาที่ใช้ในการซ่อมในแต่ละรอบการผลิตจะเท่ากับค่าคาดหวังของจำนวนครั้งที่เครื่องจักรเกิดความขัดข้อง $\frac{q\lambda}{r}$ คูณด้วยค่าคาดหวังของระยะเวลาในการซ่อมบวกระยะเวลาในการตั้งเครื่องหลังจากที่ซ่อมเสร็จ $E[t_r] + t_s$ เมื่อรวมเทอมต่าง ๆ เหล่านี้เข้าด้วยกันจะได้สูตรการคำนวณค่าคาดหวังของความยาวรอบดังแสดงในสมการที่ (1)

3.2 การวิเคราะห์ระดับการให้บริการ

จากงานของ Groenevelt และคณะ [12] ระดับการให้บริการที่ทำได้จริง $\underline{\alpha}(\beta)$ จะถูกวัดโดยสัดส่วนของความต้องการที่ได้รับการตอบสนองโดยเฉลี่ย โดยระดับการให้บริการที่ทำได้จริงดังกล่าวนี้อาจเป็นฟังก์ชันของ β ซึ่งสามารถหาได้โดยประยุกต์ใช้ Renewal Reward Theorem ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$\underline{\alpha}(\beta) = \frac{E[\text{Production per Cycle}]}{E[\text{Demand per Cycle}]} \quad (2)$$

โดย

$$E[\text{Production per Cycle}] = q \quad (3)$$

และ

$$E[\text{Demand per Cycle}] = d \cdot E[\text{Cycle Length}] \quad (4)$$

ดังนั้น ระดับการให้บริการที่ทำได้จริงสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\underline{\alpha}(\beta) = \frac{r/d}{(1-\beta)(r/d) + (E[t_r] + t_s)/E[t_f]} \quad (5)$$

กำหนดให้ระดับการให้บริการที่ทำได้จริงมีค่าเท่ากับระดับการให้บริการที่ต้องการ $\underline{\alpha}(\beta) = \alpha$ จะสามารถแก้สมการหาค่า β ได้ดังนี้

$$\beta = 1 - \frac{1}{\alpha} + \frac{d}{r} \frac{E[t_r] + t_s}{E[t_f]} \quad (6)$$

โดย β ที่คำนวณได้ในสมการ (6) จะเป็นสัดส่วนของปริมาณการผลิตที่ถูกผันไปเป็นสต็อกสินค้าเพื่อความปลอดภัยที่ทำให้ระดับการบริการที่ทำได้จริงมีค่าเท่ากับระดับการบริการที่ต้องการ

3.3 ค่าคาดหวังของต้นทุนรวมในหนึ่งรอบการผลิต

ต้นทุนที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบการผลิตประกอบด้วย ต้นทุนการตั้งเครื่อง ต้นทุนการถือครองสินค้าคงคลัง ต้นทุนสต็อกเพื่อความปลอดภัย ต้นทุนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และต้นทุนการซ่อม ซึ่งการคำนวณหาค่าคาดหวังของต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบของการผลิต ($E[\text{Cycle Cost}]$) ซึ่งเป็นผลรวมของต้นทุนต่าง ๆ ที่กล่าวไปข้างต้นสามารถทำได้โดยประยุกต์ใช้ Renewal Reward Theorem ดังนี้

$$E[\text{long-run average cost}] = \frac{E[\text{Cycle Cost}]}{E[\text{Cycle Length}]} \quad (7)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} E[\text{Cycle Cost}] \\ = E[\text{long-run average cost}] \cdot E[\text{Cycle Length}] \end{aligned} \quad (8)$$

โดย $E[\text{long-run average cost}]$ หมายถึง ค่าคาดหวังของต้นทุนต่อหน่วยเวลาโดยเฉลี่ย ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของต้นทุนต่อหน่วยเวลาโดยเฉลี่ยของต้นทุนต่อไปนี้ (i) ต้นทุนการตั้งเครื่อง (Setups), (ii) ต้นทุนการถือครองสินค้าคงคลัง (Running stock), (iii) ต้นทุนสต็อกเพื่อความปลอดภัย (Safety stock), (iv) ต้นทุนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive maintenance), และ (v) ต้นทุนการซ่อม (Corrective maintenance) จาก Groenevelt และคณะ [12] ต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาของต้นทุนต่างๆ ใน (i) – (v) สามารถหาได้ดังนี้ ต้นทุนการตั้งเครื่อง

$$\text{Setups: } \frac{s(1 + \lambda(q/r))}{(q/d)(1 - \beta) + (q/r)\lambda(E[t_r] + t_s)} \quad (9)$$

ต้นทุนการถือครองสินค้าคงคลัง

$$\text{Running stock: } \frac{1}{2}hq(1 - \beta - (d/r)) \quad (10)$$

ต้นทุนสต็อกเพื่อความปลอดภัย

$$\text{Safety stock: } h[\alpha d(W_q + E[t_r]) + t_s] - (1 - \alpha)rE[t_f] \quad (11)$$

โดย W_q สามารถเทียบได้กับจำนวนลูกค้าที่รอคอยอยู่ในคิวโดยเฉลี่ยในระบบแถวคอยแบบ G1/M/1 ในกรณีที่ระยะเวลาที่ใช้ในการซ่อมมีการกระจายแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลและเวลาที่ใช้ในการตั้งเครื่องมีค่าเท่ากับศูนย์ ($t_s = 0$) ระบบแถวคอยแบบ G1/M/1 จะลดรูปลงเป็นระบบแถวคอยแบบ M/M/1 ซึ่งในกรณีนี้จะสามารถหา W_q ได้สูตร (Render และคณะ [22])

$$W_q = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (12)$$

ดังนั้น จะสามารถหาต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาของสต็อกเพื่อความปลอดภัยได้จากสูตรต่อไปนี้ (Groenevelt และคณะ [12])

Safety stock :

$$h \cdot \left[\alpha d \left(\frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} + E[t_r] \right) + t_s \right] - (1 - \alpha)rE[t_f] \quad (13)$$

ต้นทุนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

Preventive maintenance :

$$\frac{p}{(q/d)(1 - \beta) + (q/r)\lambda(E[t_r] + t_s)} \quad (14)$$

ต้นทุนการบำรุงรักษาเชิงแก้ไข

Corrective maintenance :

$$\frac{\lambda \left(\frac{q}{r} \right) E[t_r] c}{\left(\frac{q}{d} \right) (1 - \beta) + \lambda \left(\frac{q}{r} \right) (E[t_r] + t_s)} \quad (15)$$

โดย $E[\text{long-run average cost}]$ ในสมการที่ (8) จะเป็นผลรวมของต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยเวลาของต้นทุนต่างๆ ที่ปรากฏในสมการที่ (9), (10), (11), (14), และ (15) โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ เพื่อความสะดวก เราจะกำหนดให้ $t_s = 0$ สำหรับ $E[\text{Cycle Length}]$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

3.4 ค่าคาดหวังของต้นทุนสินค้าล้าสมัย

ในกรณีที่สินค้าที่ผลิตเกิดการล้าสมัยอย่างฉับพลันสินค้าคงคลัง (Running stock) และสต็อกเพื่อความปลอดภัย (Safety stock) จะถูกจำหน่ายออกไปในราคาที่ต่ำกว่าราคาขายตามปกติ ก่อให้เกิดต้นทุนสินค้าล้าสมัยขึ้น กำหนดให้ C_s เป็นต้นทุนสินค้าล้าสมัยต่อหน่วย เราสามารถคำนวณหาค่าคาดหวังของต้นทุนสินค้าล้าสมัยที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบของการล้าสมัย ($E[OC]$) ได้โดยสูตรต่อไปนี้

$$E[OC] = C_s \left(\begin{array}{l} \text{Average Running Stock Level} \\ + \text{Average Safety Stock Level} \end{array} \right) \quad (16)$$

โดยจาก Groenevelt และคณะ [12] เราสามารถหา

Average Running Stock Level และ

Average Safety Stock Level ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{Average Running Stock Level} = \\ \frac{1}{2} q(1 - \beta - (d/r)) \end{aligned} \quad (17)$$

และ

$$\text{Average Safety Stock Level} = \left[\alpha d \left(\frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} + E[t_r] \right) + t_s \right] - (1 - \alpha) r E[t_f] \quad (18)$$

3.5 ค่าคาดหวังของระยะเวลาการเกิดสินค้าล้มสมัยอย่างฉับพลัน

ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้ ตัวแปรสุ่ม y เป็น ระยะเวลาที่สินค้าเกิดการล้มสมัยอย่างฉับพลัน ซึ่งมีการกระจายแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลด้วยอัตราการเกิดสินค้าล้มสมัยอย่างฉับพลันเท่ากับ θ ดังนั้นจะสามารถหาค่าคาดหวังของระยะเวลาการเกิดสินค้าล้มสมัยอย่างฉับพลัน L ได้จากสมการต่อไปนี้

$$L = E[y] = \frac{1}{\theta} \quad (19)$$

3.6 ค่าคาดหวังของต้นทุนรวมในช่วงอายุของสินค้า

จุดประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้ คือ การคำนวณหาขนาดการผลิตที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าคาดหวังของต้นทุนรวมในช่วงอายุสินค้า ($E[TC]$) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ค่าคาดหวังของต้นทุนรวมในหนึ่งรอบของการเกิดสินค้าล้มสมัยอย่างฉับพลันมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งเราสามารถคำนวณหา $E[TC]$ ได้จากสมการต่อไปนี้

$$E[TC] = E[\text{number of cycle}] \cdot E[\text{Cycle Cost}] + E[OC] \quad (20)$$

โดย $E[\text{number of cycle}]$ หมายถึง ค่าคาดหวังของจำนวนรอบการผลิต ซึ่งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$E[\text{number of cycle}] = \frac{L}{E[\text{Cycle Length}]} \quad (21)$$

ซึ่ง $E[TC]$ ในสมการที่ (20) จะเป็นฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) ของงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งจะอยู่ในรูปของฟังก์ชันของ q เพียงตัวแปรเดียว

3.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัยชิ้นนี้สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{Min} E[TC(q)] \quad (22)$$

$$\text{Subject to: } q > 0 \quad (23)$$

ซึ่งฟังก์ชันเป้าหมายในสมการที่ (22) เป็นฟังก์ชันต่อเนื่องของ q เพียงตัวแปรเดียว ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้ง่ายโดยใช้ซอฟต์แวร์หลายชนิดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

4. การทดสอบเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ความไว

ในหัวข้อนี้จะทำการแสดงการทดสอบเชิงตัวเลขเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมซึ่งได้แก่ ขนาดการผลิต (q) ที่ทำให้ค่าคาดหวังของต้นทุนรวมในหนึ่งรอบของการเกิดสินค้าล้มสมัยอย่างฉับพลัน ($E[TC]$) มีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้ในหัวข้อนี้จะมีการทำการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) เพื่อดูผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองที่มีต่อคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา

4.1 ค่าทดสอบ (Input Data)

ค่าคงที่ที่ใช้ในการทดสอบเชิงตัวเลขในงานวิจัยชิ้นนี้มีดังต่อไปนี้ คือ

$$\alpha = 1 \text{ (ไม่มีการขาดแคลนสินค้า)}, \theta = \frac{1}{1080} \text{ (หรือ } L = 1,080 \text{ วัน)}, S = 1,500 \text{ (\$)}, h = 2 \text{ (\$/ชิ้น/วัน)}, r = 1,000 \text{ (ชิ้น/วัน)}, d = 500 \text{ (ชิ้น/วัน)}, \lambda = 0.1 \text{ (ครั้ง/วัน)}, \mu = 0.5 \text{ (ครั้ง/วัน)}, c = 1,000 \text{ (\$/วัน)}, p = 900 \text{ (\$)}, C_s = 50 \text{ (\$/ชิ้น)}$$

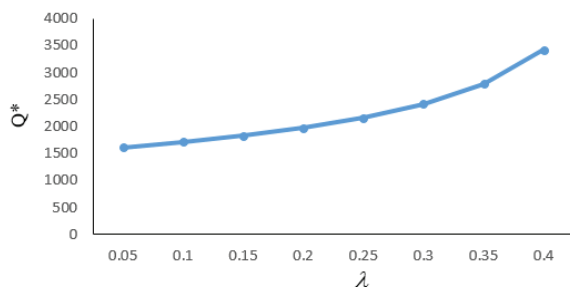
4.2 ผลการการทดสอบเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ความไว

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการการทดสอบเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ความไวซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 จากการศึกษาพบว่าขนาดการผลิตที่เหมาะสม (Q^*) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเกิดความขัดข้อง (λ) เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผู้ผลิตมีแนวโน้มจะต้องมีการผลิตสินค้าด้วยขนาดรุ่นที่ใหญ่เพื่อชดเชยกำลังการผลิตที่สูญเสียไปในขณะที่เครื่องจักรเกิดความขัดข้องและทำการซ่อม

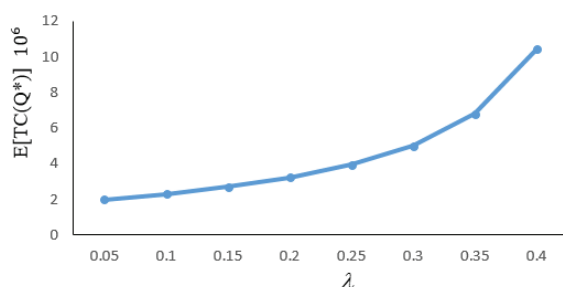
ตารางที่ 1 ปริมาณการผลิตสินค้าที่เหมาะสมและค่าคาดหวังของต้นทุนรวม ณ อัตราการเกิดความขัดข้องต่าง ๆ

λ	$d = 500$	
	Q^*	$E[TC(Q^*)]$
0.05	1,614	1,999,910
0.1	1,712	2,309,530
0.15	1,831	2,700,910
0.2	1,977	3,216,570
0.25	2,166	3,933,520
0.3	2,422	5,006,680
0.35	2,796	6,799,440
0.4	3,425	10,407,200

นอกจากนี้ จากตารางที่ 1 ยังพบว่า ค่าคาดหวังของต้นทุนรวมในช่วงอายุของสินค้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเมื่ออัตราการเกิดความขัดข้องเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณการผลิตและต้นทุนการซ่อม (Corrective maintenance cost) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 และ รูปที่ 3



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความขัดข้องและขนาดการผลิตที่เหมาะสม



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดความขัดข้องและค่าคาดหวังของต้นทุนรวมในช่วงอายุของสินค้า

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณการผลิตสินค้าที่เหมาะสมและค่าคาดหวังของต้นทุนรวม ณ อัตราการซ่อมต่าง ๆ

โดยพบว่า ขนาดการผลิตที่เหมาะสมจะลดลงเมื่อการซ่อมกระทำด้วยอัตรา (μ) ที่สูงขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ขนาดการผลิตที่เหมาะสมจะลดลงเมื่อค่าคาดหวังของระยะเวลาในการซ่อม ($E[t_r] = \frac{1}{\mu}$) ลดลง ทั้งนี้ เนื่องจากผู้ผลิตไม่จำเป็นต้องผลิตสินค้าด้วยขนาดรุ่นที่ใหญ่เพื่อชดเชยกำลังการผลิตที่สูญเสียไปในขณะที่เครื่องจักรเกิดความขัดข้องและทำการซ่อม นอกจากนี้ จากตารางที่ 2 ยังพบว่า ค่าคาดหวังของต้นทุนรวมในช่วงอายุของสินค้าจะลดลงเมื่อ μ เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากการลดลงของปริมาณการผลิตและต้นทุนการซ่อม (ต้นทุนการซ่อมเป็นสัดส่วนกับเวลาที่ใช้ซ่อม) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 และ รูปที่ 5

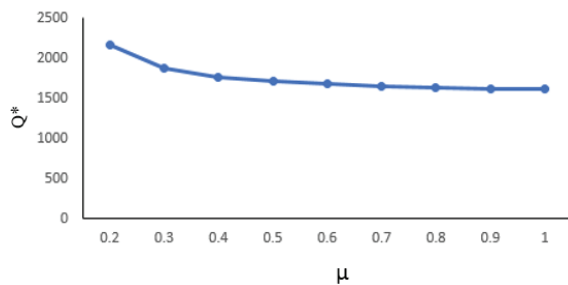
ตารางที่ 2 ปริมาณการผลิตสินค้าที่เหมาะสมและค่าคาดหวังของต้นทุนรวม ณ อัตราการซ่อมต่าง ๆ

μ	Q^*	$E[TC(Q^*)]$
0.2	2,166	7,208,500
0.3	1,876	3,575,020
0.4	1,769	2,670,380
0.5	1,712	2,309,530
0.6	1,678	2,129,530
0.7	1,654	2,026,880
0.8	1,637	1,962,850
0.9	1,624	1,920,240
1.0	1,614	1,890,470

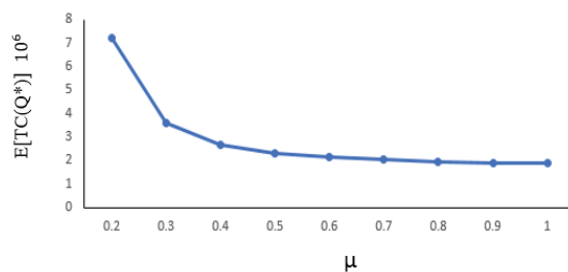
ตารางที่ 3 แสดงปริมาณการผลิตสินค้าที่เหมาะสมและค่าคาดหวังของต้นทุนรวม ณ ต้นทุนสินค้าลำตัสมัยต่อหน่วยต่าง ๆ จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อต้นทุนสินค้าลำตัสมัยต่อหน่วย (C_s) เพิ่มขึ้น ขนาดการผลิตที่เหมาะสมจะลดลง ทั้งนี้ เนื่องจากการผลิตสินค้าด้วยขนาดรุ่นที่เล็กลงเมื่อต้นทุนสินค้าลำตัสมัยมีค่าสูง นอกจากนี้ จากตารางที่ 3 ยังพบว่า ค่าคาดหวังของต้นทุนรวมในช่วงอายุของสินค้าจะเพิ่มขึ้นด้วยเมื่อต้นทุนสินค้าลำตัสมัยต่อหน่วยเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของต้นทุนสินค้าลำตัสมัย ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7

ตารางที่ 3 ปริมาณการผลิตสินค้าที่เหมาะสมและค่าคาดหวังของต้นทุนรวม ณ ต้นทุนสินค้าลำสมยต่อหน่วยต่าง ๆ

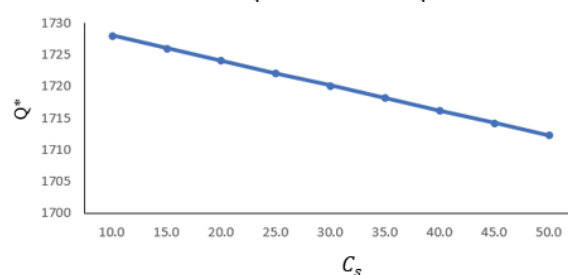
C_s	Q^*	$E[TC(Q^*)]$
10	1,728	2,245,770
15	1,726	2,253,750
20	1,724	2,261,720
25	1,722	2,269,700
30	1,720	2,277,670
35	1,718	2,285,640
40	1,716	2,293,600
45	1,714	2,301,570
50	1,712	2,309,530



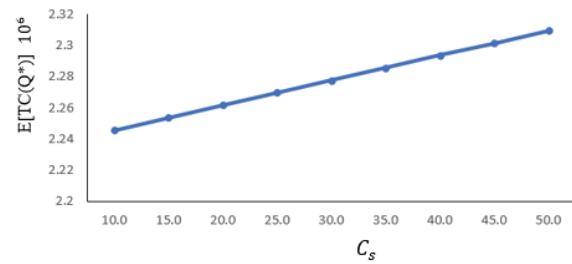
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซ่อมและขนาดการผลิตที่เหมาะสม



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซ่อมและค่าคาดหวังของต้นทุนรวมในช่วงอายุของสินค้า



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนสินค้าลำสมยต่อหน่วยและขนาดการผลิตที่เหมาะสม

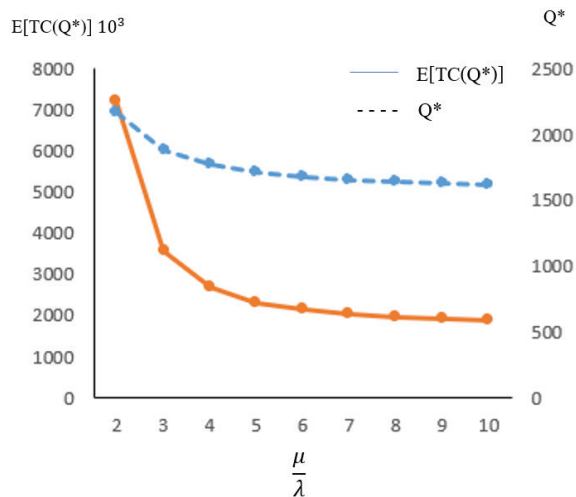


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนสินค้าลำสมยต่อหน่วยและค่าคาดหวังของต้นทุนรวมในช่วงอายุของสินค้า

ตารางที่ 4 แสดงผลกระทบของสัดส่วนของอัตราการผลิตซ่อม (μ) ต่ออัตราการผลิตความขัดข้อง (λ) ที่มีต่อขนาดการผลิตที่เหมาะสมและค่าคาดหวังของต้นทุนรวมในช่วงอายุของสินค้า จากผลการศึกษพบว่าเมื่อสัดส่วนของ μ/λ เพิ่มขึ้น ขนาดการผลิตที่เหมาะสมจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากผู้ผลิตมีแนวโน้มจะผลิตด้วยขนาดการผลิตที่ลดลง เมื่ออัตราการผลิตซ่อมมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการผลิตความขัดข้อง ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8

ตารางที่ 4 ผลกระทบของสัดส่วนของอัตราการผลิตซ่อมต่ออัตราการผลิตความขัดข้องที่มีต่อขนาดการผลิตที่เหมาะสมและค่าคาดหวังของต้นทุนรวมในช่วงอายุของสินค้า

μ/λ	Q^*	$E[TC(Q^*)]$
2	2,166	7,208,500
3	1,876	3,575,020
4	1,769	2,670,380
5	1,712	2,309,530
6	1,678	2,129,530
7	1,654	2,026,880
8	1,637	1,962,850
9	1,624	1,920,240
10	1,614	1,890,470



รูปที่ 8 ผลกระทบของสัดส่วนของอัตราการซ่อมต่ออัตราการเกิดความขัดข้องที่มีต่อขนาดการผลิตที่ประหยัดและค่าคาดหวังของต้นทุนรวมในช่วงอายุของสินค้า

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาขนาดการผลิตที่เหมาะสมสำหรับสินค้าที่มีแนวโน้มจะเกิดการล้าสมัยอย่างฉับพลันได้ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งในอนาคต และเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตสินค้าดังกล่าวสามารถเกิดความขัดข้องเชิงสุ่มได้ ณ เวลาใด ๆ ขณะที่ทำการผลิต โดยได้พิจารณาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดการผลิตที่เหมาะสม เช่น อัตราการเกิดความขัดข้อง ระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการซ่อม และต้นทุนสินค้าล้าสมัย ผลการศึกษาพบว่า

ปัจจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมา มีผลต่อขนาดการผลิตที่เหมาะสมและค่าคาดหวังของต้นทุนรวมในช่วงอายุของสินค้าอย่างมีนัยสำคัญ โดยประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัยชิ้นนี้คือ ช่วยให้การพิจารณาหาขนาดการผลิตมีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น สอดคล้องกับสภาพธุรกิจในปัจจุบันที่สินค้าที่ผลิตมีการเปลี่ยนรุ่นอยู่เสมอและเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตมีความซับซ้อนสูงซึ่งมีแนวโน้มจะเกิดความขัดข้องได้ง่าย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองเชิงความน่าจะเป็น ดังนั้นในการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ในงานจริง สถานประกอบการควรจะต้องทำการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องในอดีตไว้อย่างสม่ำเสมอ จึงจะสามารถประมาณค่าการกระจายความน่าจะเป็นและค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องได้อย่างถูกต้องและทันต่อการใช้งาน นอกจากนี้งานวิจัยชิ้นนี้ยังสามารถนำไปวิจัยต่อยอดได้ในหลายแนวทาง เช่น การพิจารณาเวลาที่ใช้ในการตั้งเครื่อง การพิจารณาการขาดแคลนสินค้า การใช้การกระจายความน่าจะเป็นแบบอื่น ๆ นอกเหนือจากเอ็กซ์โปเนนเชียล หรือพัฒนาไปสู่แบบจำลองอื่น ๆ ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น แบบจำลองการหาขนาดการผลิตและรอบเวลาการทำการบำรุงรักษาเชิงป้องกันสำหรับระบบการผลิตภายใต้การเกิดการล้าสมัยอย่างฉับพลันและการเกิดเครื่องจักรขัดข้อง เป็นต้น ซึ่งประเด็นดังกล่าวเป็นหัวข้อวิจัยที่อยู่ในระหว่างการดำเนินงานของผู้วิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Brown, G.W., Lu, J.Y. and Wolfson, R.J. Dynamic Modeling of Inventories Subject to Obsolescence. *Management Science*, 1964; 11(1): 51-63
- [2] Masters, J.M. A Note on the Effect of Sudden Obsolescence on the Optimal Lot Size. *Decision Sciences*, 1991; 22(5): 1180-1186.
- [3] Song, J.S. and Zipkin, P.H. Managing Inventory with the Prospect of Obsolescence. *Operations Research*, 1996; 44(1): 215-222
- [4] David, I., Greenshtrein, E. and Mehrez, A. A Dynamic-Programming Approach to Continuous-Review Obsolescence Inventory Problems. *Naval Research Logistics*. 1997; 44(8):757-774
- [5] Fink, M.M., and Ferrell, W.G. Inventory Policy for Products with Short Life Cycles. Proceeding of the 11th Industrial Engineering Research Conference, Orlando, 2002.
- [6] Song, Y. and Lau, H. A Periodic-Review Inventory Model with Application to the Continuous-Review Obsolescence Problem. *European Journal of Operational Research*, 2004; 159(1):110-120.

- [7] Emsermann, M. and Simon, B. Optimal Control of an Inventory with Simultaneous Obsolescence. *Interfaces*, 2007; 37(5): 445-454.
- [8] Pinçe, C. and Dekker, R. A Continuous Review Inventory Model with Advance Policy Change and Obsolescence. *Econometric Institute Research*, 2010; 1–37.
- [9] Jaarsveld, W.V. and Dekker, R. Estimating Obsolescence Risk from Demand Data to Enhance Inventory Control. *A case study International Journal of Production Economics*, 2011; 133(1): 1-9.
- [10] Prathumthip, S. and Niyamosoth T. Production Lot Sizing for Multiple Products with Sudden Obsolescence. *Proceedings of IE Network Conference*; 2015 Aug 6-7; Bangkok, Thailand. Nakhon Pathom, Silpakorn University, 2015; 999-1004.
- [11] Groenevelt, H., Pintelon, L. and Seidmann, A. Production Lot Sizes with Machine Breakdowns. *Management Science*, 1992; 38(1):104-123.
- [12] Groenevelt, H., Pintelon, D., and Seidmann, A. Production Batching with Machine Breakdowns and Safety Stocks. *Operations Research*, 1992; 40(5): 959–971.
- [13] Moinszadeh, K. and Aggarwal, P. Analysis of a Production Inventory System Subject to Random Disruptions. *Management Science*, 1997; 43: 1577-1588.
- [14] Ben-Daya, M. The Economic Production Lot-Sizing Problem with Imperfect Production Processes and Imperfect Maintenance. *International Journal of Production Economics*, 2002; 76(3): 257-264.
- [15] Giri, B.C., Yun, W.Y. and Dohi, T. Optimal Design of Unreliable Production-Inventory Systems with Variable Production Rate. *European Journal of Operational Research*, 2005; 162(2): 372-386.
- [16] Chelbi, A., Rezg, N. and Radhoui, M. Simultaneous Determination of Production Lot Size and Preventive Maintenance Schedule for Unreliable Production System. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2008; 161-176.
- [17] Jeang, A. Simultaneous determination of production lot size and process parameters under process deterioration and process breakdown. *Omega*, 2012; 40(6): 774-781.
- [18] Bouslah, B., Gharbi, A. and Pellerin R. Joint Optimal Lot Sizing and Production Control Policy in an Unreliable and Imperfect Manufacturing System. *International Journal of Production Economics*, 2013; 144: 143-156.
- [19] Jafari, L. and Makis, V. Joint Optimal Lot Sizing and Preventive Maintenance Policy for A Production Facility Subject to Condition Monitoring. *International Journal of Production Economics*, 2015, 169; 156-168.
- [20] Cheng, G.Q., Zhou, B.H. and Li, L. Joint Optimization of Lot Sizing and Condition-Based Maintenance for Multi-Component Production Systems. *Computers & Industrial Engineering*, 2017; 110: 538-549.
- [21] Niyamosoth, T., Pathumnakul, S. and Prathumthip S. Production Lot Sizing Problem with Sudden Obsolescence and Machine Breakdowns. *KKU Engineering Journal*, 2016; 43: 504-508.
- [22] Render, B., Stair, R. M. and Hanna, M. E. Quantitative Analysis for Management. 13th edition, Pearson, 2018.



พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา ในการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน Appropriate Parameters of Plasma Activated Water for Growth Inhibition of *E. coli* by Box-Behnken design

เสฏฐวุฒิ จันธิมา¹ ชนม์เจริญ แสงรัตน์^{1,*} ชีรพรรณ บุญญวรรณ²

สายสมร ลำยอง³ จตุรงค์ คำหล้า³ และ นกรินทร์ สุวรรณราช³

Settawut Janthima¹, Choncharoen Sawangrat^{1,*}, Dheerawan Boonyawan²,
Saisamorn Lumyong³, Jatorong Kumla³ and Nakarin Suwannarach³

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

²ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

³ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถ.ห้วยแก้ว ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200

¹Department of Industrial Engineering, Chiang Mai University

²Department of Physics and Materials, Faculty of Science, Chiang Mai University

³Department of Biology, Faculty of Science, Chiang Mai University

239 Huay Kaew Road, Muang District, Chiang Mai, Thailand, 50200

E-mail: Settawut.J@hotmail.com and Choncharoen@step.cmu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH[•]) และการยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ด้วยเทคนิคน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (Plasma Activated Water) แบบ Pinhole plasma jet โดยประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) ด้วยการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken design) เพื่อกำหนดเงื่อนไขของการทดลอง โดยมีตัวแปรต้นที่ศึกษา คือ ระยะเวลาดิสชาร์จ อัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอน และอัตราผสมก๊าซออกซิเจน และมีตัวแปรตาม คือ ปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล และปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ ผลการทดลองพบว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ การใช้ระยะเวลาดิสชาร์จ 20 นาที่ อัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอน 5 ลิตร/นาที่ และอัตราผสมก๊าซออกซิเจน 2% ของก๊าซอาร์กอน ซึ่งสามารถทำให้เกิดปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลได้ 10-30 ppm และสามารถลดปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้ 0.62-0.98 Log CFU/ml หรือประมาณ 70-80% นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาการใช้น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาล้างผลพริกขี้หนู ซึ่งเป็นพืชตัวอย่างในศึกษา ผลการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลาการแช่ 5, 10 และ 15 นาที่ สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลพริกขี้หนูได้ 0.69, 0.72 และ 0.82 Log CFU/g หรือประมาณ 70-80%

Received 15 August 2018

Revised 10 September 2018

Accepted 8 October 2018

ABSTRACT

The objective of this study were to find appropriate parameters of Plasma Activated Water (PAW) for hydroxyl radical ($\text{OH}^\bullet$) and growth inhibition of microorganisms. Box-Behnken design (BBD) was applied to determine parameter of factors in experiment. The independent variables were expose time, argon gas and oxygen mixture while hydroxyl radical and *E. coli* reduction were dependent variables. As a result, the optimal parameter were expose time 20 minute, argon gas flow rate 5 L/min and oxygen mixture 2% of Ar gas. The optimal parameters leads to approximately 10-30 ppm of hydroxyl radical and 0.62-0.98 (70-80%) Log CFU/ml of *E. coli* reduction. In addition, the optimal parameters was used to treat with chili and can reduce approximately 0.69, 0.72 and 0.82 (70-80%) Log CFU/g of microorganisms with treatment time 5, 10 and 15 minute, respectively.

1. บทนำ

ความสะอาดและปลอดภัยของอาหารเป็นสิ่งสำคัญสำหรับอาหารทุกชนิด สินค้าเกษตรถือเป็นสินค้าที่สำคัญของไทย โดยเฉพาะพืชผักและผลไม้ การจัดจำหน่ายและส่งออกไปยังต่างประเทศ โดยเฉพาะประเทศสมาชิกสหภาพยุโรป (EU) ซึ่งในปี 2560 พบว่า ปัญหาปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์เช่น *E. coli* และ *Salmonella* ในสินค้าเกษตรเป็นอย่างมาก จากการสุ่มตรวจการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในเขตกรุงเทพมหานครและนนทบุรี พบการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* เกินมาตรฐานประมาณ 45% จากตัวอย่างผักทั้งหมด [1] ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการลดการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์เหล่านี้ ซึ่งวิธีการโดยทั่วไปจะเติมสารฆ่าเชื้อ เช่น คลอรีน (Chlorine) ในน้ำสำหรับล้างผัก ซึ่งอาจทำให้เกิดการตกค้างหากใช้ปริมาณมาก หรือวิธีการฉายรังสีและการใช้ความร้อน ซึ่งก็ส่งผลกระทบต่อคุณภาพต่อพืชผักและผลไม้ได้ [2]

ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมา (Plasma Technology) ซึ่งถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายด้าน และก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในด้านการทำให้อาหารปลอดภัย จุดเด่นของเทคโนโลยีพลาสมา คือ เป็นเทคโนโลยีสะอาด (Clean Technology) สามารถช่วยในการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย อีกทั้งยังไม่ทำให้คุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรเสียหาย [3]

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาแบบพินโฮลพลาสมาเจ็ท (Pinhole plasma jet) ในการหาปริมาณอนุมูลอิสระ

ของไฮดรอกซิล และปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ โดยประยุกต์ใช้หลักการของการออกแบบการทดลอง (Design of experiments) ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 พลาสมากับการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์

พลาสมาถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งและทำลายการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ โดยทั่วไปองค์ประกอบที่สำคัญของพลาสมาจะประกอบด้วยอิเล็กตรอน (Electrons), ไอออน (Ions), โมเลกุล (Molecules), อะตอม (Atoms), โฟตอน (Photons) และอนุมูลอิสระ (Free radicals) ซึ่งอนุมูลอิสระเป็นองค์ประกอบที่มีความไวต่อการออกซิเดชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ($\text{OH}^\bullet$) สำหรับพลาสมาในเฟสของเหลวนี้ อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลจะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งมีความสำคัญต่อการทำปฏิกิริยาในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้ [4] โดยกลไกการยับยั้งหรือทำลายเชื้อจุลินทรีย์จากพลาสมาที่สำคัญ ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยารังสีทางเคมีระหว่างผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์กับพลาสมา และการเกิดความเสียหายต่อสารพันธุกรรม (DNA) และโปรตีน [5]

เทคนิคน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา (Plasma activated water) เป็นพลาสมาอุณหภูมิต่ำ (Non-thermal plasma) ประเภทหนึ่ง ที่เกิดจากการดิสชาร์จของไฟฟ้า ทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวกลายเป็นพลาสมา ซึ่งมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในผลผลิต

ทางการเกษตรได้ เช่น สตรอว์เบอร์รี เห็ด ผักกาดหอม แครอท และมะเขือเทศ [3, 6, 7]

2.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพ่นพลาสมาแบบ Pinhole plasma jet เป็นวิธีการออกแบบการทดลองเกิดจากการรวมกันของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^k และการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ ส่งผลในด้านประสิทธิภาพของจำนวนในการทดลองที่ไม่มาก อีกทั้งมีคุณสมบัติด้านการหมุน ทำให้ไม่มีเงื่อนไขการทดลองของจุดที่ไม่สามารถทำการทดลองได้ และสามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการทดลองได้ เพราะค่าระดับปัจจัยจะอยู่ในขอบเขตของการออกแบบการทดลองที่สามารถควบคุมและทำการทดลองได้ ซึ่งสามารถทำการทดลองได้สะดวกและประสิทธิภาพ [8]

3. วิธีดำเนินการ อุปกรณ์และวิธีการ

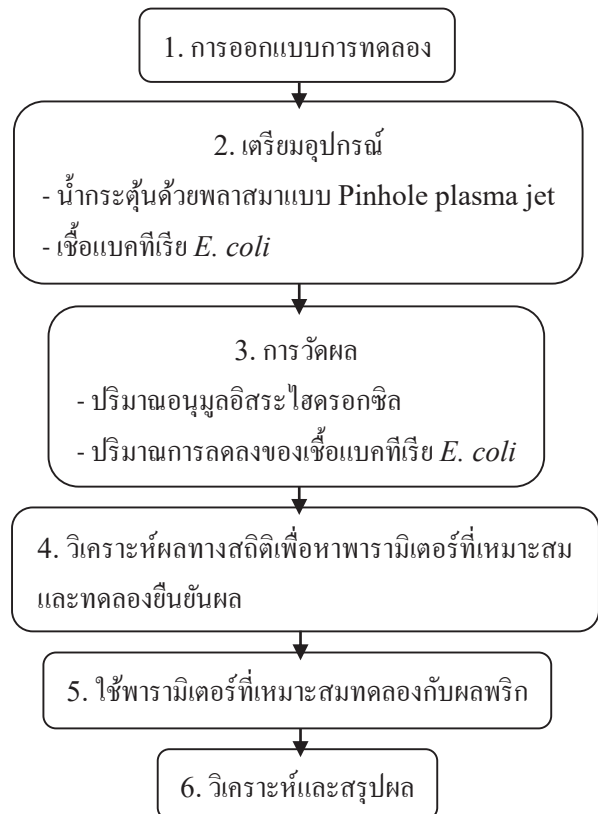
3.1 วิธีดำเนินการ

ขั้นตอนการดำเนินการในงานวิจัยนี้ สามารถแสดงดังรูปที่ 1

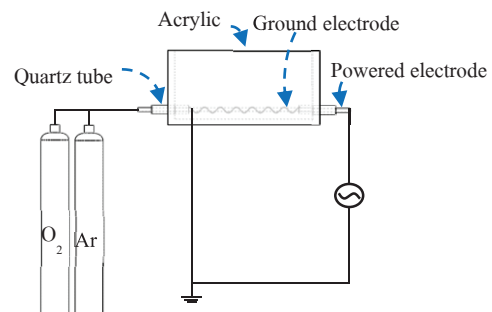
3.2 อุปกรณ์และวิธีการ

3.2.1 เครื่องกำเนิดน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา

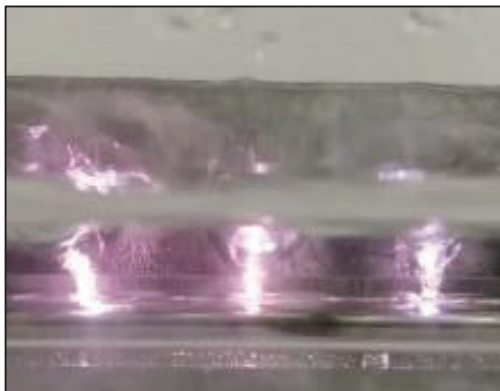
เครื่องกำเนิดน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาแบบ Pinhole plasma jet แสดงดังรูปที่ 2 โดยการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) แรงสูง 15 kV จากไฟฟ้ากระแสสลับของหม้อแปลงนิออน (Neon transformer) แบบขดลวดความถี่ต่ำ 50 Hz เมื่อจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงเข้าไปในหลอดแก้วที่อยู่ในท่อควอตซ์ (Quartz tube) จะทำให้เกิดการปล่อยประจุพลาสมาผ่านรูท่อควอตซ์ไปสัมผัสกับน้ำ สามารถทำให้เกิดการกระจายพลาสมาได้น้ำได้อย่างทั่วถึง [9] แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งการสร้างพลาสมาในน้ำจะมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้ดีกว่าในอากาศ เนื่องจากการสร้างพลาสมาได้น้ำทำให้เกิดองค์ประกอบในการออกซิเดชันที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการสร้างพลาสมาเหนือผิวน้ำ [10]



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการ



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาแบบ Pinhole Plasma jet



รูปที่ 3 ลักษณะของการปล่อยประจุพลาสมาผ่านรูท่อควอตซ์ไปสัมผัสกับน้ำ

3.2.2 การวัดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล

อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล เป็นสารที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูงมาก แต่มีครึ่งชีวิตที่สั้น โดยปกติอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลในน้ำจะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังสมการที่ (1) ดังนั้นในการวัดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลจะวัดผ่านไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด้วยกระดาษทดสอบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Test Strip) โดยจุ่มลงไปยังน้ำพลาสมาแล้วทำการวัดผล [9] แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การวัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วยกระดาษทดสอบเปอร์ออกไซด์

นอกจากนี้จะตรวจสอบความเข้มของแสง Optical Emission Spectrometer (OES) เพื่อศึกษาสมบัติการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ซึ่งจะมีความเข้มแสงในช่วงความยาวคลื่น 306-309 นาโนเมตร [6]

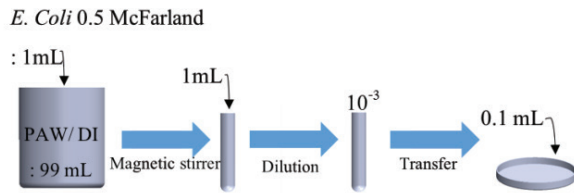
3.2.3 การเตรียมเชื้อแบคทีเรีย

ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาเชื้อแบคทีเรียอีโคไล (*Escherichia coli* ; *E. coli*) โดยการเตรียมเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้จากการการนำเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ที่ได้จากการเลี้ยงเชื้อในอาหารชนิด Nutrient Broth (NB) เป็นเวลา 18 ชั่วโมง มาทำการปรับความเข้มข้นที่ 0.5 McFarland ซึ่งจะมีจำนวนโคโลนี (Colony) ของแบคทีเรีย 1.5×10^8 cfu/mL จากนั้นจึงทำการถ่ายเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ลงในอาหารชนิด Nutrient agar (NA) ที่เตรียมไว้ในจานเพาะเชื้อแล้วทำการกระจายเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* บนอาหารเลี้ยงเชื้อ NA โดยใช้เทคนิค Spread Plate เพื่อให้เซลล์แยกออกจากกัน แล้วนำไปบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมงในห้องอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เพื่อให้เชื้อแบคทีเรีย *E. coli* เจริญ หลังจากนั้นนำไปบ่มจะได้เชื้อเป็นโคโลนีเดี่ยวที่บริสุทธิ์

3.2.4 การยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์โดยน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา

การยับยั้งปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* จะนำเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ที่ระดับเข้มข้น 0.5 McFarland ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงน้ำ DI เพื่อเป็นชุดควบคุมและน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาแต่ละเงื่อนไข ปริมาตรอย่างละ 99 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนสารละลาย (Magnetic stirrer) จากนั้นนำออกมา 1 มิลลิลิตร ไปทำเจือจางที่ระดับ 10^{-3} เนื่องจากโดยปกติการนับเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธีการ Spread Plate จะนับจำนวนเชื้อแบคทีเรีย 30-300 โคโลนี (Colony) ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้นพบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 10^{-3} จะสามารถนับจำนวนเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้ จากนั้นนำเชื้อปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ที่ระดับความเจือจาง 10^{-3} ใส่บนอาหารเลี้ยงเชื้อ NA แล้วทำการกระจายบนอาหารเลี้ยงเชื้อแล้วนำไปบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในห้องอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส แล้วทำการนับจำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ที่เจริญ และคำนวณปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย จาก $\text{Log Reduction} = \text{CFU}_{\text{control}} / \text{CFU}_{\text{PAW}}$

[11] โดยขั้นตอนในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ด้วยน้ำกระตุ้นด้วยพลาสติก แสดงดังรูปที่ 5

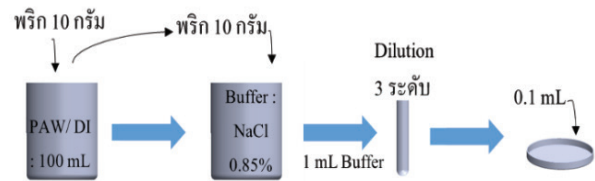


รูปที่ 5 ขั้นตอนการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ด้วยน้ำกระตุ้นด้วยพลาสติก

สำหรับการยับยั้งปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลพริกชี้หนูด้วยเทคนิคน้ำกระตุ้นด้วยพลาสติก จะนำตัวอย่างพริก 10 กรัม มาทำการตรวจหาเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลพริก แล้วทำการแช่ผลพริกด้วยน้ำกระตุ้นด้วยพลาสติก ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที โดยใช้เครื่องเขย่า (Orbital Shaker) แสดงดังรูปที่ 6 แล้วตัวอย่างพริก 10 กรัม ที่ล้างไปใส่ละลายน้ำเกลือ 0.85 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นเจือจางอย่างน้อย 3 ระดับ ความเข้มข้น และดูดตัวอย่างพริกแต่ละความเจือจาง ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่บนอาหารเลี้ยงเชื้อ NA แล้วทำการกระจายบนอาหารเลี้ยงเชื้อ แล้วนำไปบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในห้องอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส แล้วนับจำนวนโคโลนีเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดที่เจริญ [2] และคำนวณปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลพริก โดยขั้นตอนการยับยั้งปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลพริกชี้หนูด้วยเทคนิคน้ำกระตุ้นด้วยพลาสติก แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 การแช่พริกชี้หนูในน้ำพลาสติกโดยใช้เครื่องเขย่า



รูปที่ 7 ขั้นตอนการยับยั้งปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลพริกชี้หนูด้วยเทคนิคน้ำกระตุ้นด้วยพลาสติก

3.2.5 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้หลักการการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สามารถแสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองทั้งหมด 3 ปัจจัย ดังตารางที่ 1 ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยนี้ได้มาจากการทบทวนวรรณกรรม และการทดลองเบื้องต้น โดยตัวแปรตามในการทดลอง คือ ปริมาณอนุโมลอิสระไฮดรอกซิล และปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ซึ่งทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ และมีลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่ม ซึ่งจะทำให้ได้เงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 45 การทดลอง

ตารางที่ 1 การออกแบบการทดลองแบบ BBD

ปัจจัย	ระดับ			หน่วย
	ต่ำ (-)	กลาง (0)	สูง (+)	
Exposure Time (A)	15	17.5	20	นาที
Ar gas (B)	5	6.5	8	ลิตร/ นาที
O ₂ mixture (C)	0	1	2	% ก๊าซอาร์กอน

4. ผลการทดลอง

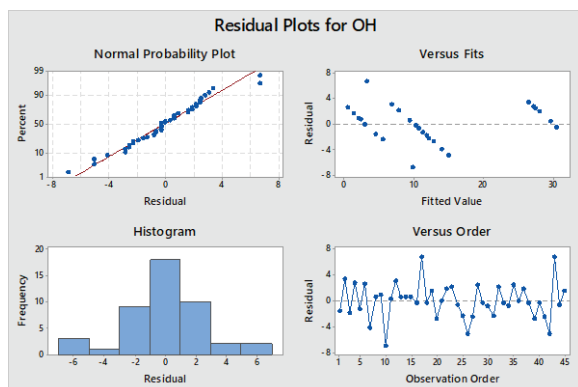
4.1 ผลการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ผลการทดลองของปริมาณอนุโมลอิสระไฮดรอกซิล และปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ *E. coli* จะนำมา

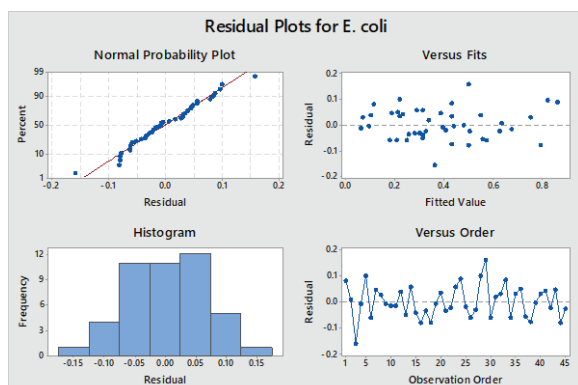
ทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 17 โดยผลการวิเคราะห์ มีดังนี้

4.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง เป็นการตรวจสอบรูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ซึ่งสามารถบ่งบอกความถูกต้องและน่าเชื่อถือของผลการทดลองได้ สามารถแสดงดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9



รูปที่ 8 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณอนุโมลอิสระไฮดรอกซิล



รูปที่ 9 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ *E. coli*

จากรูปที่ 8 เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณอนุโมลอิสระไฮดรอกซิล ได้แก่ 1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ จากแผนภูมิการกระจายตัวของข้อมูล (Normal probability plot) พบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง สามารถประมาณได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2) การ

ตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) จากแผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนของค่าส่วนตกค้าง (Versus Fits) พบว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบสุ่มทั้งทางด้านบวกและด้านลบสม่ำเสมอ แต่มีลักษณะเป็นแนวโน้ม ซึ่งอาจเกิดจากค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ไม่ละเอียดเพียงพอ 3) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ จากแผนภูมิฮิสโตแกรม (Histogram) พบว่า มีลักษณะเป็นทรงระฆังคว่ำ แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ และ 4) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) จากแผนภูมิการกระจาย (Versus Order) พบว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันและไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงว่าข้อมูลส่วนตกค้างไม่ขึ้นกับลำดับการทดลอง

จากรูปที่ 9 เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ *E. coli* ได้แก่ 1) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ จากแผนภูมิการกระจายตัวของข้อมูล พบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง สามารถประมาณได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน จากแผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนของค่าส่วนตกค้าง พบว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบสุ่มทั้งทางด้านบวกและด้านลบสม่ำเสมอและไม่มีแนวโน้ม แสดงว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระดับของปัจจัย 3) การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ จากแผนภูมิฮิสโตแกรม พบว่า มีลักษณะเป็นทรงระฆังคว่ำ แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ และ 4) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) จากแผนภูมิการกระจาย (Versus Order) พบว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันและไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงว่าข้อมูลส่วนตกค้างไม่ขึ้นกับลำดับการทดลอง

4.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการวิเคราะห์ที่ความผันแปรหรือปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทดลอง โดยจะกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ ($\alpha = 0.05$)

ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณอนุโมลอิสระไฮดรอกซิล แสดงดังตารางที่ 2 และการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* แสดงดังตารางที่ 3

จากตารางที่ 2 พบว่า ปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่มีอิทธิพลหรือผลกระทบต่อปริมาณอนุโมลอิสระไฮดรอกซิล ได้แก่ A, B และ C ส่วนปัจจัยร่วม (Interaction Effect) ได้แก่ A*A, C*C และ A*C

จากตารางที่ 3 พบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้แก่ A, B และ C ส่วนปัจจัยร่วม ได้แก่ A*A, A*C

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณอนุโมลอิสระไฮดรอกซิล

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Const	10.00	1.05	9.55	0.000
A	3.96	0.64	6.17	0.000
B	1.46	0.64	2.27	0.030
C	9.83	0.64	15.33	0.000
A*A	-3.38	0.94	-3.58	0.001
B*B	1.63	0.94	1.72	0.095
C*C	6.04	0.94	6.40	0.000
A*B	-1.75	0.91	-1.93	0.062
A*C	3.83	0.91	4.23	0.000
B*C	-1.17	0.91	-1.29	0.207
S = 3.14, R-sq = 91.66%				
R-sq(adj) = 88.87%, R-sq(pred) = 83.26%				

จากตารางที่ 2 และ 3 พบว่า การตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจของปริมาณอนุโมลอิสระของไฮดรอกซิลและปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* มีค่า R-Square เท่ากับ 91.66% และ 91.67% ตามลำดับ แสดงว่าแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองนี้เพียงพอต่อการให้ข้อมูลและมีความเหมาะสม สามารถนำไปสร้างสมการทำนายผลได้

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli*

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Const	0.4161	0.0238	17.51	0.000
A	0.07	0.02	4.63	0.000
B	-0.06	0.02	-4.28	0.000
C	0.23	0.02	15.47	0.000
A*A	-0.05	0.02	-2.27	0.030
B*B	-0.04	0.02	-1.96	0.059
C*C	0.04	0.02	1.92	0.063
A*B	-0.01	0.02	-0.47	0.645
A*C	0.08	0.02	3.82	0.001
B*C	-0.04	0.02	-1.77	0.086
S = 0.07, R-sq = 91.67%				
R-sq(adj) = 88.89%, R-sq(pred) = 85.08%				

4.1.3 การสร้างสมการทำนาย

การสร้างสมการทำนาย สามารถสร้างได้โดยการนำค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตามไปสร้างแบบจำลองสมการถดถอย โดยความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณอนุโมลอิสระไฮดรอกซิล แสดงดังสมการที่ (2) และความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* แสดงดังสมการที่ (3) ซึ่งจะแสดงผลเป็น Uncoded Units

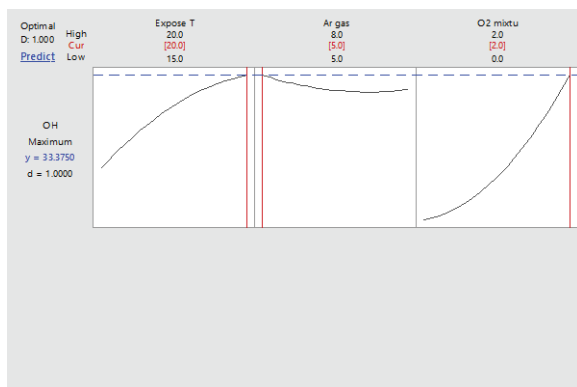
$$\text{OH}^{\bullet} \text{ (ppm)} = -194.00 + 21.98A + 0.53B - 24.03C - 0.540A^2 + 0.72B^2 + 6.04C^2 - 0.47AB + 1.53AC - 0.78BC \quad (2)$$

$$\begin{aligned} E. coli \text{ reduction (Log CFU/ ml)} = \\ -3.04 - 0.28A + 0.27B - 0.25C - 0.01A^2 - \\ 0.02B^2 + 0.04C^2 - 0.00AB + 0.03AC - 0.02BC \end{aligned} \quad (3)$$

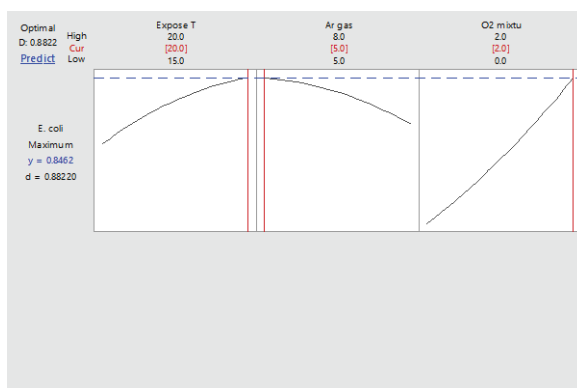
4.2 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

การหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปริมาณอนุโมลอิสระไฮดรอกซิลและปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* โดยจะกำหนดค่าเป้าหมาย (Goal) เป็นค่าที่สูงที่สุด (Maximum) จากผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งจะ

สามารถพยากรณ์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลได้ 33.38 ppm และปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้ 0.85 Log CFU/ml ดังรูปที่ 10 และ 11



รูปที่ 10 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล



รูปที่ 11 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli*

จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลและปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรตาม มีค่าเท่ากับคือ ระยะเวลาดิซซาร์จ 20 นาติ อัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอน 5 ลิตร/นาติ และอัตราผสมก๊าซออกซิเจน 2% ของก๊าซอาร์กอน แสดงให้เห็นว่าปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลจะแปรผันกับปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli*

4.3 การทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง

ในการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองจะทำซ้ำทั้งหมด 5 ซ้ำ โดยผลการทดลองเพื่อยืนยันผลของปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล และปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* แสดงดังตารางที่ 4 จากนั้นจะนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ One-Sample T-test เพื่อทำเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยจากการทดลองยืนยันผลกับค่าที่คำนวณได้จากสมการทำนายผล ซึ่งผลการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ผลการทดลองยืนยันผลของปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลปริมาณและการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli*

ลำดับการทดลอง	ผลการทดลอง	
	ปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (ppm)	ปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> (Log CFU/ml)
1	30 ± 0	0.62 ± 0.14
2	30 ± 0	0.70 ± 0.13
3	30 ± 0	0.81 ± 0.05
4	30 ± 0	0.98 ± 0.15
5	30 ± 0	0.78 ± 0.19

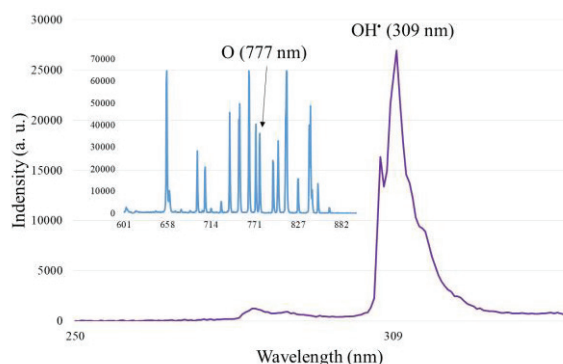
ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยจากการทดลองยืนยันผลกับค่าที่คำนวณได้จากสมการทำนายผล

One-Sample T:						
Test of $\mu = 33.42$ vs $\neq 33.42$, Test of $\mu = 0.93$ vs $\neq 0.93$						
Variable	Mean	StD	SE Mean	95% CI	T	P
OH [•]	30	0.00	0.00	(30.00, 30.00)	*	*
<i>E. coli</i> reduction	0.78	0.14	0.06	(0.61, 0.95)	-1.19	0.299

จากตารางที่ 5 พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ค่า P-value ของปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล มีค่าเป็น * เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลไม่มีความแตกต่างกัน จึงทำให้ไม่สามารถประมาณค่า P-value อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการทดลองยืนยันผลมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนายผล จึงสรุปได้ว่า ค่าเฉลี่ยของ

ปริมาณอนุโมลอิสระไฮดรอกซิลจากการทดลองขึ้นขึ้นผลกับค่าที่ได้จากการทำนายผลไม่มีความแตกต่างกัน และค่า P-value ของปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* เท่ากับ 0.299 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าค่าเฉลี่ยของปริมาณการลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* จากการทดลองขึ้นขึ้นผลกับค่าที่ได้จากการทำนายผลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้การศึกษาสมบัติอนุโมลอิสระของไฮดรอกซิลจากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด พบว่า ที่ความยาวคลื่นในช่วง 309 นาโนเมตร [6] สามารถตรวจพบความเข้มแสงปริมาณอนุโมลอิสระไฮดรอกซิลเท่ากับ 26,933 Arbitrary unit และที่ความยาวคลื่น 777 นาโนเมตร นอกจากนี้สามารถตรวจพบความเข้มแสงของ atomic oxygen เท่ากับ 36,299 Arbitrary unit แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ผลการวัดความเข้มแสงของปริมาณอนุโมลอิสระไฮดรอกซิล

4.4 การทดลองเพื่อยับยั้งปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลพริกชี้หนูด้วยเทคนิคน้ำกระเด็นด้วยพลาสมา

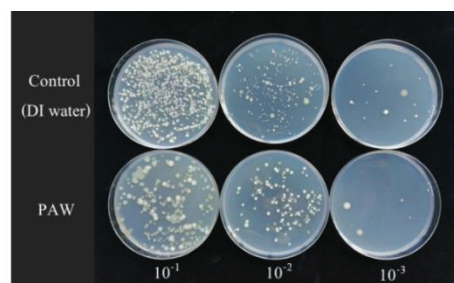
ขั้นตอนนี้จะทำการตรวจหาเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนบนผิวของผลพริกชี้หนู โดยจะทำการศึกษาระยะเวลาการแช่ผลพริกจากน้ำกระเด็นด้วยพลาสมาเป็นระยะเวลา 5, 10 และ 15 นาที ตามลำดับ ในการทดลองจะเลือกค่าจากพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ ระยะเวลาดิซาร์จ 20 นาที อัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอน 5 ลิตร/นาที และอัตราผสมก๊าซออกซิเจน 2% ของก๊าซอาร์กอน โดยผลการ

ยับยั้งปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลพริกชี้หนู แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการยับยั้งปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลพริกชี้หนู

ระยะเวลา	ปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลพริก (Log CFU/g)
5	0.69 ± 0.18 (78.23%)
10	0.72 ± 0.08 (80.74%)
15	0.82 ± 0.09 (84.53%)

จากตารางที่ 6 พบว่า ปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลพริก โดยการเปรียบเทียบจากผลพริกที่แช่ด้วยน้ำพลาสมากับผลพริกที่แช่ด้วยน้ำ DI และคำนวณปริมาณการลดลงจากสมการ $\text{Log Reduction} = \text{CFU}_{\text{control}} / \text{CFU}_{\text{PAW}}$ โดยปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลพริก จะมีการลดลงมากขึ้นตามระยะเวลา โดยลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดที่เจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อของผลพริก แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ลักษณะของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลพริกจากการกระจายเชื้อบนอาหารเลี้ยงเชื้อ

5. สรุปผล

การหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ด้วยเทคนิคน้ำกระเด็นด้วยพลาสมาแบบ Pinhole plasma jet โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน พบว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดต่อตัวแปรตาม คือ การใช้ระยะเวลาดิซาร์จ 20 นาที อัตราการจ่ายก๊าซอาร์กอน 5 ลิตร/นาที และอัตรา

ผสมก๊าซออกซิเจน 2% ของก๊าซอาร์กอน ซึ่งสามารถทำให้เกิดปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลได้ 10-30 ppm และสามารถลดปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ได้ 0.62-0.98 Log CFU/ml หรือประมาณ 70-80%

นอกจากนี้การใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาล้างผลพริกชี้หนู ซึ่งเป็นพืชตัวอย่างในการศึกษา ผลการทดลองพบว่า สามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดบนผิวของผลพริกชี้หนูได้ 0.69, 0.72 และ 0.82 Log CFU/g ที่ระยะเวลา 5, 10 และ 15 นาที ตามลำดับ หรือน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาสามารถลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลพริกชี้หนูได้ประมาณ 70-80%

6. อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพบว่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาแบบ Pinhole plasma jet นี้ สามารถทำให้เกิดองค์ประกอบของพลาสมา ที่อยู่ในกลุ่มของ reactive oxygen species (ROS) โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ซึ่งมีศักยภาพในการยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้ดี สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่พบว่า อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง รวมถึงองค์ประกอบอื่น ๆ ที่เกิดจากพลาสมา สามารถทำปฏิกิริยากับเชื้อจุลินทรีย์ [3, 6, 9, 10, 11] มีผลทำให้ผนังเซลล์หรือองค์ประกอบภายในเซลล์ เช่น DNA ของเชื้อจุลินทรีย์ได้รับความเสียหาย [5] ซึ่งเป็นสาเหตุที่

ทำให้น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ได้

ในงานวิจัยนี้สามารถลดปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* ซึ่งเป็นตัวอย่างเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาได้ 70-80% และลดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดของผลพริกชี้หนูได้ประมาณ 70-80% โดยปัญหาที่พบ น้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาแบบ Pinhole plasma jet คือ ฟองก๊าซที่เกิดจากพลาสมาที่ไหลไปสัมผัสกับน้ำยังมีขนาดใหญ่ เนื่องจากขนาดของรูท่อควอตซ์มีขนาดใหญ่ และพลาสมาเกิดไม่ต่อเนื่อง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ส่งผลต่อปริมาณความเข้มข้นของอนุมูลอิสระได้

ในการศึกษาครั้งต่อไปควรทำการศึกษาแหล่งจ่ายไฟอื่น ๆ ที่สามารถปรับค่ากำลังไฟฟ้าได้ หรือประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอื่น ๆ เช่น Micro bubble เข้ามาใช้ทำปฏิกิริยาร่วมกับพลาสมา ซึ่งอาจจะสามารถทำให้เกิดองค์ประกอบต่าง ๆ ของพลาสมาที่ดีขึ้น และสามารถใช้ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพได้มากยิ่งขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ทุนสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือในการเพาะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปรีชา จึงสมานกุล นวรัตน์ รัตนคติถก ณ ฤกษ์ และ กมลวรรณ กันแต่ง. การปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในผักสด. *วารสารสำนักคุณภาพและความปลอดภัยอาหาร กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์*, 2553; 52: 30-39.
- [2] เพ็ญแข จิรฉัตร ประเวทย์ ดุ้ยเต็มวงศ์ วรรณ ดุ้ยเต็มวงศ์ วรพจน์ สุนทรสุข และ กันจิรา เกตุแก้ว. การลดเชื้อปนเปื้อนในพริกชี้หนูสดด้วยโอโซนและคลอรีน. *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45*, 30 ม.ค.-2 ก.พ., กรุงเทพมหานคร, 2550; 165-172.
- [3] Xu, Y., Tian, Y., Ma, R., Liu, Q. and Zhang, J. Effect of Plasma Activated Water on the Postharvest Quality of Button Mushrooms, *Agaricus bisporus*. *Food Chemistry*, 2016; 197, 436-444.
- [4] Jiang, B., Zheng, J., Qiu, S., Wu, M., Zhang, Q., Yan, Z. and Xue, Q. Review on Electrical Discharge Plasma Technology for Wastewater Remediation. *Chemical Engineering*, 2014; 236: 348-368.

- [5] Han, L., Patil, S., Boehm, D., Milosavljevic', V., Cullen, P.J. and Bourkea, P. Mechanisms of Inactivation by High-Voltage Atmospheric Cold Plasma Differ for Escherichia coli and Staphylococcus aureus. Applied and environmental microbiology, 2016; 82: 450-458.
- [6] Ma, R., Wang, G., Tian, Y., Wang, K., Zhang, J. and Fang, J. Non-Thermal Plasma-Activated Water Inactivation of Food-Borne pathogen on Fresh Produce. Hazardous Materials, 2015; 300: 643-651.
- [7] Bermúdez-Aguirre, D., Wemlinger, E., Pedrow, P., Barbosa-Cánovas G., and Garcia-Perez, M. Effect of Atmospheric Pressure Cold Plasma (APCP) on the Inactivation of Escherichia coli in Fresh Produce. Food Control, 2013; 34: 149-157.
- [8] สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ และ ภูมิินทร์ แจ่มเชื้อ (2554). การลดฟองอากาศในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติก โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, หน้า 171-175.
- [9] Muhammad, S.I.K., Lee, E.J. and Kim, Y.J. Roles of Individual Radicals Generated by a Submerged Dielectric Barrier Discharge Plasma Reactor during Escherichia coli O157:H7 Inactivation. AIP ADVANCES, 2015; 5: 107111-1 - 107111-9.
- [10] Tian, Y., Ma, R., Zhang, Q., Feng, H., Liang, Y., Zhang, J. and Fang, J. Assessment of The Physicochemical Properties and Biological Effects of Water Activated by Non-Thermal Plasma Above and Beneath the Water Surface. Plasma Processes and Polymers. 2015; 12: 439-449.
- [11] Kim, H. S., Lee, D. H., Fridman A. and Cho, Y. I. Residual Effects and Energy Cost of Gliding Arc Discharge Treatment on the Inactivation of Escherichia coli in Water. Heat and Mass Transfer. 2014; 77: 1075-1083.



An Optimal Neural Network Controller for a PV Charging System using the MOGA/BPA

Rati Wongsathan

Department of Electrical Engineering and the Research Institute, North-Chiang Mai University
169 Hangdong Chiang Mai 50230, Thailand Tel. +66(81)2893400, Fax. +66(53)819998
E-mail: rati1003@gmail.com, rati@northcm.ac.th

ABSTRACT

This paper proposes an optimal integrated neural network controller (NNC) based on maximum power point tracking (MPPT) technique and voltage regulation (VR) for a PV charging system with lead-acid battery through the constant current and constant voltage (CC-CV) charge, denoted by NNC-CC/NNC-CV. The proposed controller is optimized through the hybrid multi-objective genetic algorithm and back-propagation algorithm (*h*MOGA/BPA). By means of this optimization, the number of system parameters is significantly reduced while maintaining high MPPT and VR accuracy. After determining the NN parameters using the *h*MOGA/BP, the performances of charging control against rapidly changing ambient solar irradiance and module temperature are evaluated in terms of the tradeoff between transient response, stabilized MPPT and VR accuracy, charging time, and energy utilization and charging efficiency. As results, the proposed charge controller outperforms the non-optimal NNC and on/off controller. Furthermore, validation of charging control under weather variations (i.e. fine, rainy, and cloudy), several criteria are assessed to verify the performance of the proposed NNC.

Keywords: Charge controller, MPPT, MOGA, Neural network controller, PV charging system.

ABBREVIATION

The full meaning of abbreviations used in this study is given in Table 1.

Table 1 List of abbreviations

Abbreviation	Full meaning
PV	Photovoltaic
MPPT	Maximum power point tracking
P&O	Perturb and observe
IC	Incremental conductance
NNC	Neural network controller
FLC	Fuzzy logic controller
NFC	Neuro-fuzzy controller
MPPT-NNC	MPPT based NNC
MPPT-FLC	MPPT based FLC
MPPT-NFC	MPPT based NFC
CC	Coulomb counter
BPA	Back-propagation algorithm
GA	Genetic algorithm
PSO	Particle swarm optimization
NNC-GA	NNC optimized through GA
NNC-PSO	NNC optimized through PSO
CC-CV	Constant current and Constant voltage
VR	Voltage regulation
<i>h</i> MOGA/BP	hybrid MOGA and BP

Table 1 (cont.) List of abbreviations

Abbreviation	Full meaning
SoC	State of charge
STC	Standard test condition
VRLA	Valve-regulated lead-acid battery
TS	Taylor series
SAE	Sum of absolute error
OOC	On-off controller

1. INTRODUCTION

Due to the severity of the global energy crisis and pollution, a photovoltaic (PV) energy has become a promising renewable energy source since it is considered as an essentially inexhaustible and profusely available energy resource, and environmentally friendly. In rural or off-grid connected area, the PV system plays more and more important role in electrification, especially the stand-alone PV charging system. Basically, the efficiency of this system is mainly decided by the charging efficiency [1]. To obtain the maximum efficiency of the PV charging system, the PV generator is necessary to operate at the maximum power points (MPPs) that can also sufficiently supply to the battery. Unfortunately, the locus of the MPPs strongly

Received 9 August 2018

Revised 26 September 2018

Accepted 8 October 2018

varies nonlinearly with the environmental effects resulting in inconsistency of terminal voltage of the battery, then achieving the MPPs is not always guaranteed. Therefore, an efficient charge controller along with an appropriate charging scheme is necessarily required to operate the PV panels at their MPPs, consequently, deliver to the battery for a limited daytime. The various control approaches based on the MPP tracking (MPPT) techniques have been applied to the PV charging system through a different charging scheme which each has its own advantages and disadvantages [2]-[15].

For the conventional MPPT charge controllers with a fixed step size control command such as, the perturbing and observing (P&O) [2]-[4], the incremental conductance (IC) [5] and [4], and their modifications [6]-[7], are commonly applied to the PV charging system in practice due to the simplicity and ease of implementation. They provide the fast transient response under rapidly changing weather. However, the relative high ripple voltage causing wasted energy into heat and the MPPT inaccuracy as well as oscillations at the steady state need more improvement.

On the other hand, the intelligent MPPT charge controllers with the variable step sizes control command such as, neural network (NNC) [8]-[9], fuzzy logic (FLC) [4], [10]-[12], neuro-fuzzy (NFC) [13]-[14], are alternatively applied to various PV systems. The MPPT-NNCs can track the maximum PV power (P_{mp}) accurately with negligible oscillations and have the fast transient response against the rapid weather changes when compared to the conventional MPPT controllers. However, this method lacks the heuristic sense and works as a black box with requiring a huge number of training data and long training. On the other hand, the MPPT-FLC and -NFC are outstanding in stabilized MPPT accuracy. However, it is noteworthy that all self-generated fuzzy rules do not contribute enough for accuracy improvement while increasing complexity. Furthermore, due to the conventional FLC design, i.e., generating the fuzzy rules by human expert and adjusting parameters through trial-and-error, the optimal performance may not found.

Considering the MPPT-NNCs based charge controller [15]-[17], several issues, including a number of training data, a slow convergence and local trap of solutions when using back-

propagation algorithm (BPA) [18], are the disadvantages. To overcome these problems, in [17], the system parameters were chosen from the expert without training in order to make the hidden layer output linearized, but this limits its full potential. Moreover, due to a number of hidden layers and hidden nodes in the NNC design resulting complexity, a number of parameters (i.e. weight and bias) tuning through the conventional BPA may be ineffective. Recently, to avoid *the explosion of complexity*, Wu *et al.* [19] proposed the novel NNC based on the tracking control problem. In addition, the NNC containing only one adaptive parameter [20] is introduced to simplify the online computation. Besides, to handle such the problems, the stochastic optimizations, such as genetic algorithm (GA), particle swarm (PSO), and others, are utilized in the NNC design, e.g., NNC-GA [21]-[23], NNC-PSO [24]. For the MPPT-NNC-GA, the number of hidden nodes is determined by the GA [21], whereas in [22], GA is employed to optimize the input dataset by selecting the significant data among the inputs.

Motivated by the aforementioned reviews, the purpose of this work is to design the optimal NNCs for the PV charging system with lead-acid (LA) battery through the constant current and constant voltage (CC-CV) charge, denoted by NNC-CC/NNC-CV. In that fashion, the NNC-CC-based MPPT and NNC-CV-based voltage regulation (VR) are designed and derived through the hybrid multi-objective GA (MOGA) and BPA (*h*MOGA/BP). To simplify the NN structure, the single hidden layer is used in the design, whereas the number of hidden nodes is selected through the experiment. All the NN parameters (i.e. weights and biases) are optimized through *h*MOGA/BPA to achieve the optimal charge controller. The highlights of this paper lie in the following.

- 1) An optimal NNC-CC/NNC-CV derived from MOGA/BPA is first proposed and applied to the PV charging system through the CC-CV charge.
- 2) The criteria of minimizing the tracking error and reducing the number of NN parameters are combined into one overall objective function by means of weighting method. The total number of parameters and the computational complexity is greatly reduced by about 45% and 30%,

respectively. Therefore, the tuning of parameters is much easier.

3) The proposed controller outperforms the non-optimal NNC in terms of transient response without overshoot, high stabilized MPPT accuracy with small oscillations, less required charging time, and high energy utilization and charging efficiency under rapidly changing weather.

To verify the performances of the proposed controller, the charging control is further validated under weather variation, i.e., fine, rainy and cloudy. In the following, the PV charging system is described in Section 2. The charge controller design and optimization are presented in Section 3. Section 4 provides the results and discussion. Finally, Section 5 concludes this paper.

2. DESCRIPTION OF THE PV CHARGING SYSTEM

The PV charging system (Figure 1) is composed of PV module, dc-dc buck converter, battery and charge controller interfaces. Through the CCCV charge, it starts with the CC charge mode to deliver available maximum energy from the PV module to the battery without overcharging. The proposed MPPT-NNC (NNC-CC) is employed in this stage. Until reaching the overvoltage level ($V_{b,ref}=14.4$ V) or 80% of maximum SoC (SoC_m), the continued CV charge mode completes fully charged, including preventing overvoltage and heat that shorten the battery life. The other proposed VR-NNC (NNC-CV) is employed in this stage. Then, the integrated NNC-CC/CV as the charge controller is applied to the PV charging system.

The utilized PV module composed of N_s -cell connected in series provides specifications at standard test conditions (STC), irradiance (G) of 1000 W/m^2 and module temperature (T) of 25°C , as follows: 130 W maximum power (P_{mp}), PV voltage and current (V_{PV} , I_{PV}) at MPP are (17.4 V, 7.48 A) and open circuit voltage and short circuit current are (22 V, 8.09 A). It is modelled by a single diode equivalent circuit model [25] described by 5-lumped-parameter. After determining parameters of the PV using the extraction method in [26] through the experiment, Figure 4 (a), the power-voltage (P - V) characteristics are established under

varying G and T , then t MPPs can be determined (Figure 2).

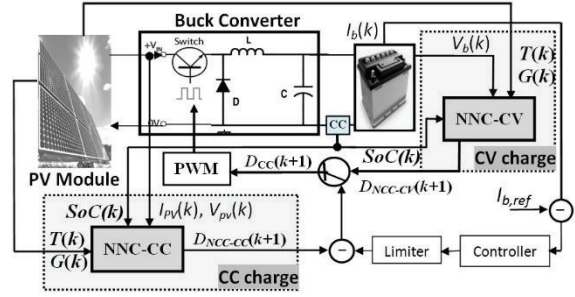


Figure 1 The block diagram of PV-battery charging system.

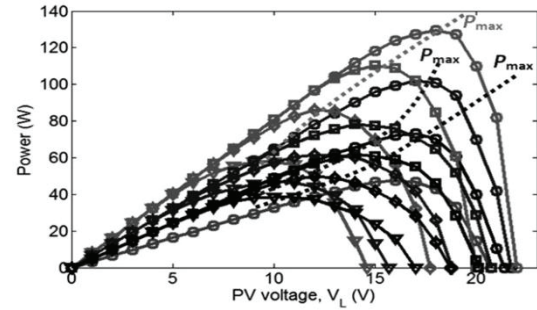


Figure 2 The electrical P - V characteristic of the utilized PV module under varying of solar irradiance (G) and module temperature (T).

The rechargeable battery applied in this study is the valve-regulated lead-acid (VRLA) battery with 12 V nominal-voltage and 50 Ah capacity which is normally operated through the CCCV charge [27]. In order to determine the relationship between the battery voltage (V_b) and current (I_b) with the current SoC (SoC_t) the equivalent circuit of the battery referred to [28] is chosen for the simulation. The terminal voltage of battery is given by,

$$V_b = (2.4 + K_1 \times SoC_t)N_s + \frac{I_b}{SoC_m} \left(K_2 + \frac{K_3}{(K_4 - SoC_t)N_s} \right), \quad (1)$$

where N_s is the number of 2.4 V cell connected in series and K_1 , K_2 , K_3 , and K_4 are the specified constants. To generate the V_b - I_b characteristics by MATLAB program, SoC_t is estimated as

$$SoC_t = SoC_{t-1} + \frac{1}{3600 f_{sp}} \left(\frac{K_b V_b I_b}{SoC_m} - K_{dc} SoC_{t-1} \right), \quad (2)$$

where K_b is the charging efficiency, K_{dc} is the self discharge rate and f_{sp} is the sampling frequency updating the rate of controller command. The SoC and the battery resistance (R_b) against the open circuit voltage of battery are shown in Figure 3.

To investigate the charging performance with an initial SoC (SoC_0), the charging efficiency (η_{Ch}) is defined as

$$\eta_{Ch} = E_b / (E_b + E_{Loss}), \quad (3)$$

where E_b is the total energy stored in the battery during the initial and final SoC (SoC_i – SoC_f) determined by integral form of work done and E_{Loss} is an energy loss due to the battery resistance. Using the approximation of $V_b(SoC)$ and $R_b(SoC)$ in Figure 3, η_{Ch} can be expressed as

$$\eta_{Ch} = \frac{1}{1 - \frac{C(\Delta SoC) \left(\frac{(\Sigma SoC)^2 - \Delta SoC - 2.65}{\Sigma SoC + 8.1} \right)}{62.5 \Delta T}}, \quad (4)$$

where $\Delta SoC \equiv SoC_f - SoC_i$, $\Sigma SoC \equiv SoC_f + SoC_i$, $\Pi SoC \equiv SoC_f \times SoC_i$, $\Delta SoC = \Sigma SoC + \Pi SoC$, C is the battery capacity in ampere-hours (A-hr) and Δt is time in second. To measure η_{Ch} , assuming the SoC at the beginning (SoC_0) and C are known the coulomb counting (CC), Figure 1, is used to estimate the SoC .

For the implementation of dc-dc buck converter used as the switching-mode regulator the maximum charging current was allowed to up to 30 A, 5% of the inductor ripple current and conductor ripple voltage were assumed, and the PWM switching frequency was 200 kHz. The maximum current output, and voltage input and output corresponding to the PV module and battery were 30 A, 22 V, and 14.4 V, respectively. The minimum inductance and capacitance estimated through the method in [29] were 20 μ H and 1.5 μ F, respectively. The prototype board of dc-dc buck converter is implemented for the test in Figure 4 (b).

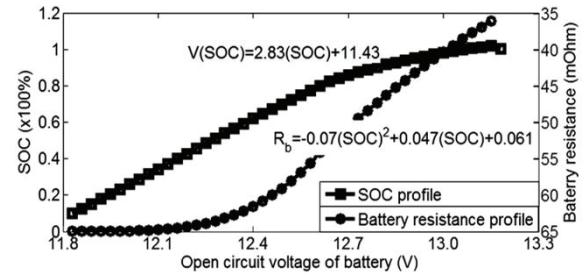


Figure 3 The SoC and battery resistance against the open circuit voltage of battery.

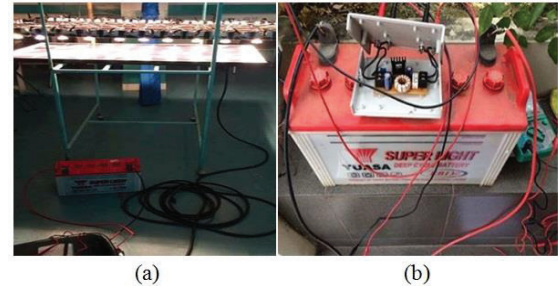


Figure 4 The experimental setting of
(a) V - $I(G, T)$ measures,
(b) converter prototype design.

3. DESIGNING METHOD AND OPTIMIZATION OF NNC

Before a NN can be used as a NNC, it is first trained offline to learn a PV charging system directly. By applying the desired range of selected inputs to the system, its corresponding outputs can be obtained and a set of training patterns are then selected. Once the NN is trained with the collected data, it can be used to produce the correct control input as a function of the desired output.

The NNC-CC and NNC-CV are derived and optimized through the hMOGA/BPA (Figure 5). The original structure of the MPPT-NNC-CC, Figure 6 (a), abbreviated to NNC-CC(5, N_{H-CC} , 1) comprises 5 input nodes including V_{PV} , I_{PV} , G , T and SoC ; N_{H-CC} -hidden node, and single the output node of the estimated-duty ratio, D_{NNC-CC} (5). On the other hand, the original structure of VR-NNC-CV, Figure 6 (b), abbreviated to NNC-CV(4, N_{H-CV} , 1) comprises 4 input nodes of V_b , G , T and SoC , N_{H-CV} -hidden node, and the single output node of D_{NNC-CV} (6). Therefore, the total number of weights and biases of the NNC-CC and -CV is $7N_{H-CC}+1$ and $6N_{H-CV}+1$, respectively.

$$D_{NNC-CC} = f\left(W_1^{(2)} \times g\left(W_1^{(1)} \times X_1 + b_1^{(1)}\right) + b_1^{(2)}\right), \quad (5)$$

$$D_{NNC-CV} = f\left(W_2^{(2)} \times g\left(W_2^{(1)} \times X_2 + b_2^{(1)}\right) + b_2^{(2)}\right), \quad (6)$$

where $X_1 = [V_{PV}, I_{PV}, G, T, SoC]^T$, $X_2 = [V_b, G, T, SoC]^T$, $W_1^{(1)}$, $W_2^{(1)}$, $b_1^{(1)}$ and $b_2^{(1)}$ are $(N_{H-CC} \times 5)$ - and $(N_{H-CC} \times 4)$ -weight matrix, and N_{H-CC} - and N_{H-CV} -bias column vector between input and hidden layer, respectively, $W_1^{(2)}$, $W_2^{(2)}$, $b_1^{(2)}$ and $b_2^{(2)}$ are N_{H-CC} -, N_{H-CV} -weight column vector and two biases between hidden and output layer, respectively, $g(\cdot)$ is hyperbolic tangent function, and $f(\cdot)$ is linear function.

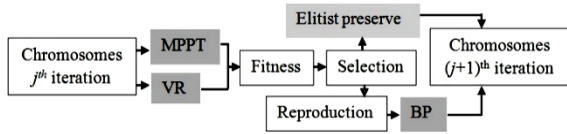


Figure 5 Designing of NNCs using hybrid MOGA and BP

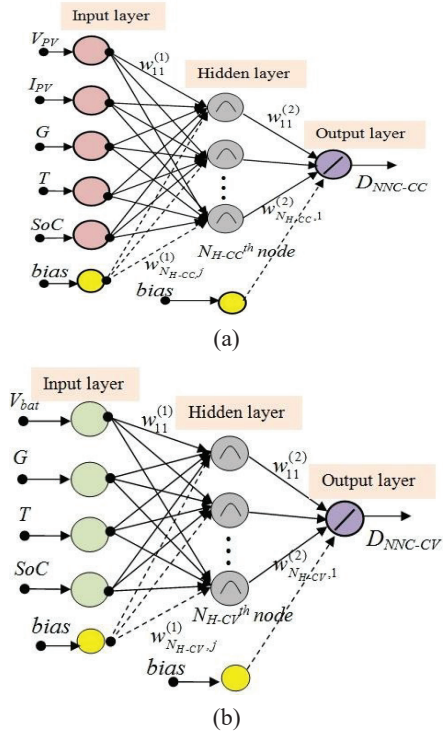


Figure 6 The structure of
(a) NNC-CC(5, N_{H-CC} , 1) and
(b) NNC-CV(4, N_{H-CV} , 1)

In order to determine the computational complexity of the NNC-CC(5, N_{H-CC} , 1)/CV(4, N_{H-CV} , 1) with regard to the multiplication counts, $g(\cdot)$ represented by Taylor series (TS) at $x=u$, i.e., $g(x) \sim (x-u) + (x-u)^3/3$, where $|x-u| \leq \pi/2$, provides 3-multiplication, then the nonlinear transformation of hidden nodes of NNC-CC and -CV requires $3N_{H-CC}$ - and $3N_{H-CV}$ -multiplication, respectively. Therefore, the NNC-CC/CV provides $(9N_{H-CC} + 8N_{H-CV})$ -multiplication. To achieve the optimal NNC-CC through the hMOGA/BPA, after normalizing the input variables, the N_{pop} -chromosome is randomly generated which each possesses vector entries with certain length of genes (parameters) using N_{bit} -length binary coding normalized within the specified range $[-1, 1]$. In the proposed encoding scheme all NN parameters (w 's and b 's) and selected parameter set are represented in one chromosome, tabulated in Table 2(a). The selected parameters are determined through the set $\{0, 1\}$ which is '0' means not consideration the accordingly parameter while '1' means to take the parameter into consideration.

During the CC charge mode, the initial operating point of PV voltage and current (V_{PV} , I_{PV}) at time k of the i^{th} chromosome corresponding to the initial P_{PV} , $P_{NNC-CC}^{k,i} = 0$, is $(0, 0)$. The SoC_0 is 0.1. The chromosomes are taken to compute the duty ratio at time $k+1$ ($D_{NNC-CC, k+1}$) in order to generate the new operating point. The differences between the updated PV power ($P_{CC}^{k+1,i}$) and the referenced power at STC ($P_{ref} = 130$) are cumulatively summed up to estimate the sum of absolute error (SAE). The MOGA seeks to maximize the multi-criteria fitness function (7) composed of the weighted sum of MPPT accuracy in terms of SAE and ratio of the initial number of parameters (NP_0) to the current number of parameters (NP_{iter}),

$$F_{i,iter}^{CC} = \frac{C_{1,i}}{\sum_{k=1}^{N_{sp}} \lambda^{N_{sp}-k} |P_{ref} - P_{CC}^{k,i}|} + C_{2,i} \frac{NP_{CC,0}}{NP_{CC(i,iter)}}, \quad (7)$$

Table 2 Chromosome representation for NNCs optimization.

(a) NNC-CC	Weights	Biases	Selected parameters
Variable	w_{CC}	b_{CC}	
Gene	$w_{1,1}^{(1)}, \dots, w_{5,N_{H-CC}}^{(1)}, w_{1,1}^{(2)}, \dots, w_{N_{H-CC},1}^{(2)}$	$b_1^{(1)}, \dots, b_{N_{H-CC}}^{(1)}, b_1^{(2)}$	$\{0,1\}$
Gene No.	$ 1 \dots 5N_{H-CC} 5N_{H-CC}+1 \dots 6N_{H-CC} $	$ 6N_{H-CC}+1 \dots 7N_{H-CC}+1 $	$ 1 \dots 7N_{H-CC}+1 $
(b) NNC-CV	Weights	Biases	Selected parameters
Variable	w_{CV}	b_{CV}	
Gene	$w_{1,1}^{(1)}, \dots, w_{4,N_{H-CV}}^{(1)}, w_{1,1}^{(2)}, \dots, w_{N_{H-CV},1}^{(2)}$	$b_1^{(1)}, \dots, b_{N_{H-CV}}^{(1)}, b_1^{(2)}$	$\{0,1\}$
Gene No.	$ 1 \dots 4N_{H-CV} 4N_{H-CV}+1 \dots 5N_{H-CV} $	$ 5N_{H-CV}+1 \dots 6N_{H-CV}+1 $	$ 1 \dots 6N_{H-CV}+1 $

where $\lambda \in (0, 1]$ is a forgetting factor, N_{SP} is the maximum samples per an iteration, C_1 is the fitness constant and C_2 is a parameter giving the percentage of contribution in the total fitness. The parent chromosomes based on their high fitness values are selected to generate the offspring by two methods. First, the elitism method is used to retain the best chromosome at 10%. Second, the roulette wheel method is used to employ by assigning a higher probability of selection to individuals with higher fitness values that passes through the reproduction process, i.e., crossover and mutation with probability of P_C and P_M , respectively. The BPA is applied to the individual offspring as the supervised training using the inputs-output sequences obtained from the simulations in Section 2. The resultant individuals refined by BPA and an elite are rearranged according to the value of fitness. Thus, the chromosomes in the $(j+1)^{th}$ iteration are obtained. The genetic process is repeated until meeting the maximum iteration (N).

For the NNC-CV optimization through the hybrid MOGA/BPA, the M_{POP} -chromosome represented in Table 2(b) is randomly generated. During the CV charge mode, the initial operating point of PV and battery at time k are taken from those of the final value of the CC charge. Then the initial duty ratio ($D_{NNC-CV,k}$) is set to zero at the beginning. The chromosomes are taken into computation of the updated duty ratio ($D_{NNC-CV,k+1}$). The new operating point of battery voltage ($V_b^{k+1,i}$) is generated and compared to $V_{b,ref}$ to cumulatively sum up the SAE estimation. MOGA seeks to maximize the multi-criteria fitness function (8) composed of the weighted sum of VR accuracy in terms of SAE and ratio of the initial number of parameters ($NP_{CV,0}$) to the current number of parameters ($NP_{CV,iter}$),

$$F_{i,iter}^{CV} = \frac{C_{3,i}}{\left(\sum_{k=1}^{N_{SP}} \lambda^{N_{SP}-k} |V_{b,ref} - V_b^{k,i}| \right)} + C_{4,i} \frac{NP_{CV,0}}{NP_{CV(i,iter)}}, \quad (8)$$

where C_3 is the fitness constant and C_4 is a parameter giving the percentage of contribution in the total fitness. The genetic process is similar to that of the NNC-CC, and is repeated until meeting the maximum iteration.

However, due to the maximizing problem (7) and (8), the global solutions may not found while over rule reduction and accuracy, then the parameter $C_{1,i}$ and $C_{2,i}$, and $C_{3,i}$ and $C_{4,i}$ are required to weight the terms of (7) and (8), respectively, and determined simultaneously with other parameters in the genetic process by forming as genes of the chromosome. Therefore, the high performance can be found for determining these appropriate values.

From the experiment perspective, C_1 , C_2 , C_3 and C_4 vary in the range of 1,000-1,500, 1-10, 1-20 and 1-10, respectively,

4. CHARGING RESULTS AND DISCUSSION

Through the test, the commercial 12 V and 50 Ah LA battery has been utilized. To optimize the NNC-CC, G and T was varied from 50 to 1,000 W/m² and from 20 to 40°C in increments of 50 and 4, respectively, and I_{PV} , V_{PV} , SoC and the corresponding D_{NNC-CC} were measured for each case. To optimize the NNC-CV, V_b was varied from 14.4 to 22 V in increments of 0.1 and the corresponding SoC and D_{NNC-CV} were measured for each case. The train:test data was set as 70:30. To avoid the local optimum traps of solutions, λ was set as 0.99.

The NNs are started with the small network and gradually added hidden nodes as long as their performances are not improved. From the

plotting of RMSE against the number of hidden nodes at the same epoch of training and testing in Figure 7 (a) and (b), N_{H-CC} and N_{H-CV} are selected as 15 and 20, respectively, then NNC-CC(5,15,1)/CV(4,20,1) yields 227 (106/121) parameters which are tuned through the h MOGA/BPA to maximize (7) and (8). The number of requiring multiplications for the NNC-CC/CV is 295 (135/160). The parameters of GA were set as follows: $N=100$, $N_{SP}=100$, $N_{pop}=10$, $M_{pop}=5$, $N_{bit}=12$, $P_c=0.85$ and $P_m=0.15$.

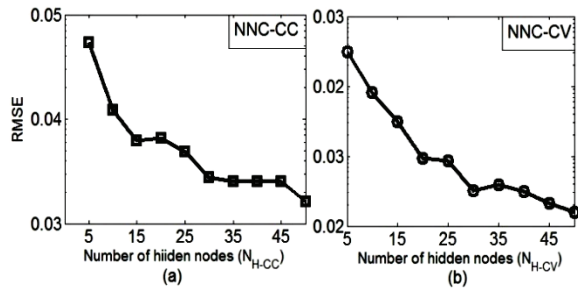


Figure 7 RMSE against the number of hidden nodes for
(a) NNC-CC and
(b) NNC-CV

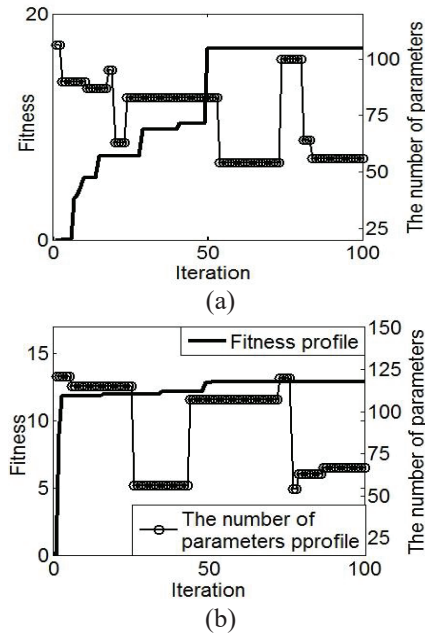


Figure 8 Fitness and the number of parameters profile using MOGA/BPA of
(a) NNC-CC and
(b) NNC-CV

As can be seen in Figure 8 (a) and (b), the fitness values increase with iteration and the number of parameters of NNC-CC and NNC-CV at the 100th iteration are reduced 47% from 106 to 56 ($35-w^{(1)}$, $8-b^{(1)}$, $12-w^{(2)}$, $1-b^{(2)}$), and 44% from 121 to 67 ($39-w^{(1)}$, $13-b^{(1)}$, $14-w^{(2)}$, $1-b^{(2)}$), respectively. Then the optimized NNC-CC/CV provides 205 (92/113) multiplications reducing the computational complexity to 30%.

Through the test, the performances of the controllers were investigated under fine, rainy and cloudy weather (Figure 9), G and T were varied from 600 to 1000 W/m², and 24 to 32°C, respectively. The measures were recorded every 12 minutes. The fine weather is characterized by maximum irradiance during the noon, this leads to an increase of the temperature which is opposite the cloudy weather, while the rainy weather has rapid changing of irradiance due to the thick cloud and rain. The charging control results by the optimized NNC-CC/CV are depicted in Figure 10(a)-(c). The proposed controller is able to complete CCCV charge with different operating points and charging time. During the CC charge, the battery voltage (red line) gradually increases depending on both the battery current and its SoC, whereas the battery current depends on the tracking power from the MPPT-controllers and varies according to the weather changes.

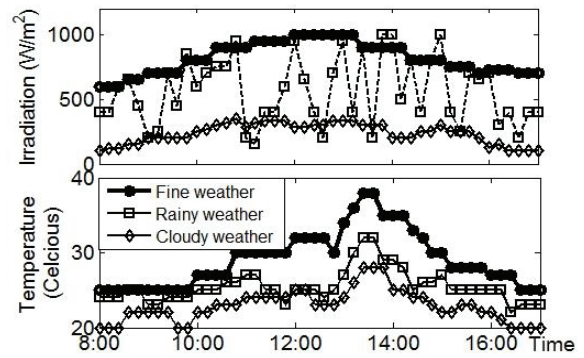


Figure 9 Varying weather conditions of solar irradiance and module temperature

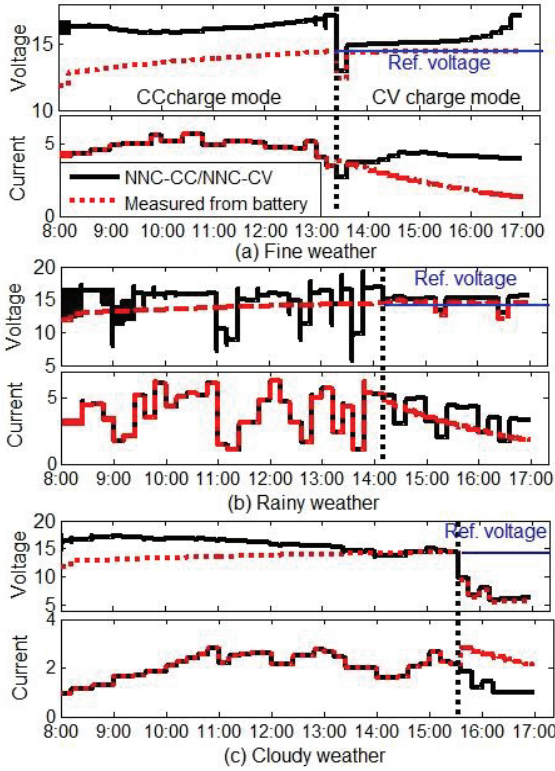


Figure 10 Charging results of the NNC-CC/CV

When the battery voltage reaches the rated voltage, the switching mode is activated to enter the CV charge mode. The other part of graph shows the battery current drops decrease exponentially to about 1.5 A, whereas the battery voltage can be regulated near the rated voltage (blue line) for preventing overvoltage. At the end of the charge-regulation stage, the open-circuit voltage of battery was found to be about 12.3 V correspond to 100% of SoC_m , then proving the success of the charge controller against the fine and rainy weather except for the cloudy weather. Furthermore, it is observed that the best charging time are 9:30-11:00 am.

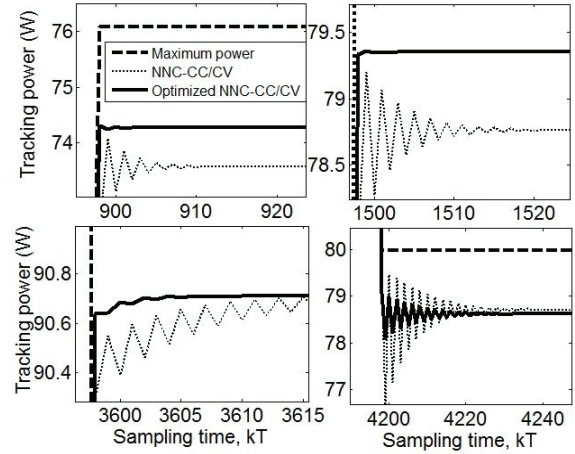


Figure 11 Transient response and stabilized MPPT accuracy of the MPPT-NNCs.

To investigate the transient response and the stabilized accuracy of the controllers (i.e. the non-optimized NNC and the optimized NNC) during the CC charge, it can be seen from some weather conditions in Figure 11 that the NNC provides fast response time, but more oscillations causing more power waste, whereas the optimized NNC provides the fast response but reach the MPPs with negligible oscillations. Furthermore, the optimized NNC performs clearly better than the other with regard to the stabilized MPPT accuracy.

In order to compare the energy utilization between the charge controllers during the CC charge, the energy utilization efficiency ($\eta_{utilize}$) over time interval $[t_i, t_f]$ is defined as

$$\eta_{utilize} = \int_{t_i}^{t_f} P_{MPPT}(t) / P_{mp}(t) dt, \quad (9)$$

where P_{MPPT} represents the extracting power obtained from the MPPT-NNCs and commercial on-off controller (OOC). It is seen from Figure 12 that the extracting powers obtained from the optimized NNC are closer to the maximum power than the others. It averagely provides approximately 5% and 10 % more energy utilization efficiency when compared to the non-optimized NNC and the OOC, respectively. Considering the VR during the CV charge mode, the non- and optimized NNC achieve high VR accuracy about 99.8% (Figure 13).

To investigate the requiring charging time for comparing between the proposed NNC and the conventional NNC and the commercial OOC, Figure 14(a), the first two controllers complete

the charge at the end of the day, whereas the conventional OOC unsuccessfully completes the charge since there is no energy transfer to the battery during the off time which results in a prolonged time in order to complete the charging. Thus for the ill-condition of weather variations, the battery does not reach the 100% SoC by the end of the day with this conventional charging controller.

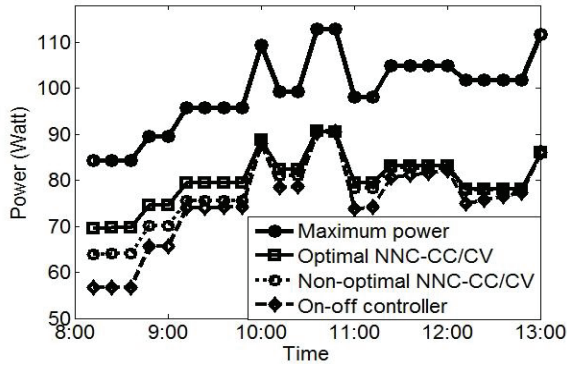


Figure 12 Maximum extracting powers of the MPPT controllers.

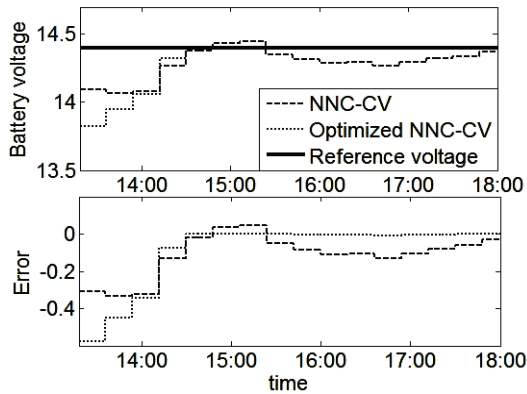


Figure 13 (a) Voltage regulations of the VR-NNCs-CV and (b) residuals

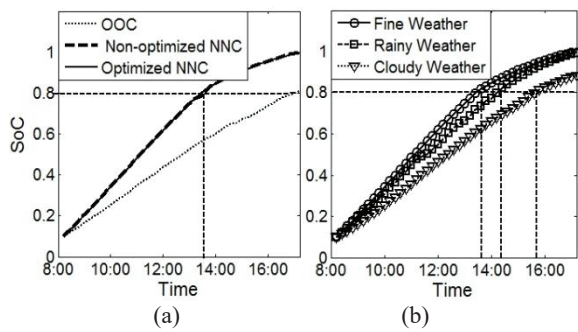


Figure 14 The SoC against charging time of (a) the charge controllers and (b) the proposed NNC under weather variations

Considering the charging time of the proposed NNC under weather variations, it is seen from Figure 14(b) that reaching 80% of SoC_m during CC charge, it had taken about 5.3 hrs (8:00-13:20), 6.25 hrs (8:00-14:15) and 7.5 hrs (8:00-15:30) for sunny, rainy and cloudy day, respectively. Therefore, on sunny day the proposed NNC significantly shortens the charging time by 15% and 30% of rainy and cloudy day, respectively. In addition, it achieved full charging at the end of the day only for sunny day.

To evaluate the charge efficiency (4) of the proposed NNC against the weather variations with the SoC at the beginning, $SoC_0=0.1$, η_{Ch} as a function of charging time (Figure 15) increases due to the increasing of energy stored in battery and SoC gain with the decreasing of battery resistance. Under fine weather, the optimized NNC provides the charge efficiency higher than the non-optimized NNC and commercial OOC, respectively. The over-voltage produced by the non-optimized NNC in order to move the charge through the battery causes dissipating energy leading to low charge efficiency. On the other hand, the conventional OOC under the Off state causes low energy stored in a battery leading to very low charge efficiency. Obviously, the proposed NNC, including the others has higher charge efficiency under fine weather as compared to under the other weathers, and also outperforms the other controllers. Minimum charge efficiency under cloudy weather is due to low irradiance which affects the generated PV power.

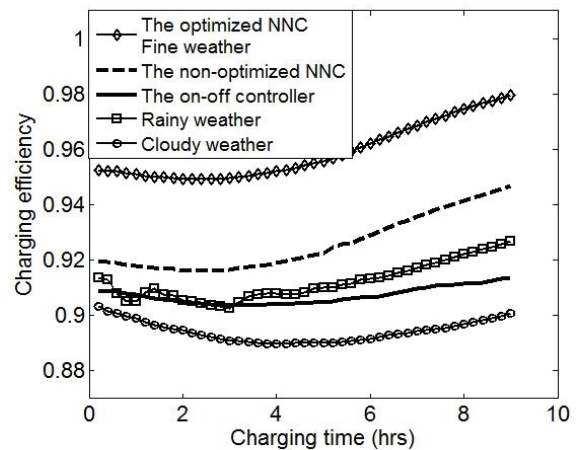


Figure 15 Charging efficiency of the proposed NNC-CC/CV

5. CONCLUSION

In this work, the optimal charge controller of integrated MPPT- and VR-NNC called NNC-CC/NNC-CV is applied through the CC-CV charge of the PV charging system with VRLA battery under rapid weather changes. The parameters of the controller have been derived and optimized through the *h*MOGA/BPA. By means of this optimization, the number of NN parameters and the computational complexity are greatly reduced means reducing the search space of the solutions. In addition, all parameters are fine-tuned for improving the MPPT and VR accuracy. From the simulation results, the optimized NNC-CC/CV outperforms the non-optimized NNC and commercial on-off controller in terms of without overshoot and fast transient-response, high stabilized MPPT accuracy with negligible oscillations and less charging time for the requiring SoC. In addition, it helps increase the battery lifespan and prevent overcharging and overvoltage during the CC and CV charge mode, respectively. Furthermore, tradeoff by several

criteria, including the validation of the charging control under weather variations, have been supported the performances of the proposed NNC. However, the MPPT accuracy needs more improvement. In addition, operate less effective and incomplete charge under cloudy weather is the main drawback for our proposed NNC which may cause the PV charging system failure for the continuous more days of cloudy weather without reaching maximum SoC. In off-grid areas, a hybrid solar/diesel or solar/wind turbine electric generators is alternatively applied. Continuing with this work, obtaining the optimal NNC with guaranteed system stability is developed.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the Research Institute of North-Chiang Mai University (NCU), Chiang Mai Thailand. I am thankful to my colleagues of the faculty of Electrical and Computer Engineering who provided experimental setting that greatly assisted the research.

REFERENCES

- [1] Tomabechi, K. Energy Resources in the Future. *Energies*, 2010; 3(5): 686-695.
- [2] Shankar, D. and Kulkarni, P.S. Soft Switching Buck Converter for Battery Charging with MPPT. *International Journal of ChemTech Research*, 2013; 5(2): 947-956.
- [3] Abdualлах, Z.M., Mahood, O.T., Ibraheem Al-Naib, A.M.T. Photovoltaic Battery Charging System Based on PIC16F877A Microcontroller. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2014; 3(4): 27-31.
- [4] Wongsathan, R. Performance of Hybrid Fuzzy and Neuro-fuzzy Controller with MOHGA Based MPPT for a Solar PV Module on Various Weather Conditions. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 2017: 24(2): 161-175.
- [5] Chafle, S.R. and Vaidya, U.B. Incremental Conductance MPPT Technique for PV System. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2013; 2(6): 2719-26.
- [6] Raj, C. M., Kumar, T.V. and Kumar, R.S. An Efficient MPPT Control Algorithm for Solar Power Plant Battery Charging System with the Improve Steady State Response. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2015; 4(4): 1913-21.
- [7] Padhee, S., Pati, U.C., Mahapatra, K. Design of Photovoltaic MPPT Based Charger for Lead-Acid Batteries. 2016 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (EmergiTech), 3-6 August, Balaclava, Mauritius, 2016.
- [8] Algarin, C.R., Hernandez, D.S. and Leal, D.R. A Low-Cost Maximum Power Point Tracking System Based on Neural Network Inverse Model Controller. *Electronics*, 2018; 7(4): 1-17.
- [9] Tiwari, R., Krishnamurthy, K. and Neelakandan, R.B. Neural Network Based Maximum Power Point Tracking Control with Quadratic Boost Converter for PMSG—Wind Energy Conversion System. *Electronics*, 2018; 7(20): 1-17.
- [10] Kaisar, M.S., Anwer, A., Aditya, S.K. and Mazumder, R.K. Design and Simulation of Fuzzy Based MPPT. *Renewable Energy Prospect and Progress*, 2005; 19-21.

- [11] Kottas, T.L., Boutalis, Y.S. and Karlis, A.D. New Maximum Power Point Tracker for PV Array Using Fuzzy Controller in Closed Cooperation with Fuzzy Cognitive Network. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006; 21(3): 793-803.
- [12] Patil, A. R., Atar, K.D., Potdar, A.A. and Mudholkar, R.R. Embedded Fuzzy Module for Battery Charger Control. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2013; 2(8): 4072-78.
- [13] Tarek, B., Said, D and Benbouzid, M. E. H. Maximum Power Point Tracking Control for Photovoltaic System Using Adaptive Neuro-Fuzzy, ANFIS. 2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 27-30 March, Monte Carlo, Monaco, 2013.
- [14] Wang, L., Singh, C. and Kusiak, A. Intelligent Control of Power Electronic System for Wind Turbines, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010; 255-295.
- [15] Petchjaturporn, P., Ngamkham, W., Khaehintung, N., Noppadol K., Phaophak S., Wiwat K., and Anatawat K. A Solar-Powered Battery Charger with Neural Network Maximum Power Point Tracking Implemented on a Low-Cost PIC-Microcontroller. TENCON 2005 IEEE Region 10, 21-24 November, Melbourne, Australia, 2005; 1-4.
- [16] Ocran, T.A., Cao, J., Cao, B. and Sun, X. Artificial Neural Network Maximum Power Point Tracker for Solar Electric Vehicle. *Tsinghua Science and Technology*, 2005; 10(2): 204-208.
- [17] Makhloufi, M. T., Abdessemed, Y. and Khireddine, M.S. An Efficient ANN-Based MPPT Optimal Controller of a DC/DC Boost Converter for Photovoltaic Systems. *Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, 2016; 57(1): 109-119.
- [18] Rojas, R. Neural Networks: A Systematic Introduction. Springer-Verlag, New York, 1995.
- [19] Wu, C., Liu, J., Xiong, Y. and Wu, L. Observer-Based Adaptive Fault-Tolerant Tracking Control of Nonlinear Nonstrict-Feedback Systems. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2018; 29(7): 3022-33.
- [20] Yin, S., Yang, H., Gao, H., Qiu, J. and Kaynak, O. An Adaptive NN-Based Approach for Fault-Tolerant Control of Nonlinear Time-Varying Delay Systems with Unmodeled Dynamics. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2017; 28(8): 1902-13.
- [21] Kulaksiz, A.A. and Akkaya, R. A Genetic Algorithm Optimized ANN-Based MPPT Algorithm for a Stand-Alone PV System with Induction Motor Drive. *Solar Energy*, 2012; 86(9): 2366-75.
- [22] Kulaksiz, A. A. and Akkaya, R. Training Data Optimization for Anns Using Genetic Algorithms to Enhance MPPT Efficiency of a Stand-Alone PV System. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2012; 20(2): 241-254.
- [23] Prasad, L.B., Sahu, S., Gupta, M., Srivastava, B., Mozhui, L. and Asthana, D.N. An Improved Method for MPPT Using ANN and GA with Maximum Power Comparison Through Perturb & Observe Technique. 2016 IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics Engineering (UPCON), 9-11 December, Varanasi, India, 2016.
- [24] Lee, C.Y., Shen, Y.X., Cheng, J.C., Li, Y.Y. and Chang, C.W. Neural Networks and Particle Swarm Optimization Based MPPT for Small Wind Power Generator. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2009; 3(12): 2222-2228.
- [25] De Blass, M. A., Torre, J. L., Prieto, E. and Garcia, A. Selecting a Suitable Model for Characterizing Photovoltaic Devices. *Renewable Energy*, 2002; 25: 371-380.
- [26] Wongsathan, R. and Seedadan, I. Artificial Intelligence and ANFIS Reduced Rule for Equivalent Parameter Estimation of PV Module on Various Weather Conditions Utilize for MPPT. *International Journal of Renewable Energy*, 2017; 12(1): 38-55.
- [27] Kujundzic, G., Iles, S., Matusko, J., and Vasak, M. Optimal Charging of Valve-Regulated Lead-Acid Batteries Based on Model Predictive Control. *Applied Energy*, 2016; 187: 189-202.
- [28] Nelson, J.P., and Bolin, W.D. Basics and Advances in Battery System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1995; 31(2): 419-428.
- [29] Kolsi, S., Samet, H., and Amar, M.B. Design Analysis of DC-DC Converters Connected to a Photovoltaic Generator and Controlled by MPPT for Optimal Energy Transfer Throughout a Clear Day. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014; 2(1): 27-34.



การพัฒนาระบบสำหรับเลือกตำแหน่งและตรวจสอบคุณภาพของ อิเล็กโทรดสำหรับวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้ากล้ามเนื้อ Development of Automatic Electrode Position Selection and Electrode Integrity Determination System for Electromyography Signal Measurement

วิฑิต แซ่ลิม* พรชัย พุกพัทธารานนท์ และ กิตติคุณ ทองพูล

Withit Sae-lim*, Pornchai Phukpattaranont and Kittikhun Thongpull

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Kohong, Hatyai, Songkhla 90112, Thailand

*E-mail: k.withit@hotmail.com, Tel: 0805207327

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบการเลือกตำแหน่งและตรวจสอบคุณภาพของอิเล็กโทรดสำหรับวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้ากล้ามเนื้อ โดยใช้การวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนัง (electrode-skin impedance) ในการบ่งบอกถึงคุณภาพของอิเล็กโทรดในการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ ระบบการวัดอิมพีแดนซ์ใช้ AD5933 ในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนัง ซึ่งสามารถวัดอิมพีแดนซ์ได้ในช่วง $1\text{ k}\Omega - 10\text{ M}\Omega$ ในย่านความถี่ตั้งแต่ $5\text{ kHz} - 100\text{ kHz}$ โดยได้ออกแบบการสอบเทียบอัตโนมัติ (Auto calibration) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดอิมพีแดนซ์ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น AD5933 ทำงานบนไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ควบคุมและแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ จากการทดลองพบว่า ที่ความถี่ 5 kHz ในการวัดอิมพีแดนซ์ช่วง $1\text{ k}\Omega - 1\text{ M}\Omega$ ระบบสามารถวัดอิมพีแดนซ์ได้อย่างถูกต้องมีความผิดพลาดน้อยกว่า 2% แต่ในการวัดอิมพีแดนซ์ช่วง $1\text{ M}\Omega - 10\text{ M}\Omega$ มีความผิดพลาดที่สูงและจากการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังเปรียบเทียบกับคุณภาพของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อโดยใช้อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio, SNR) ในการวิเคราะห์ พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังที่ต่ำจะทำให้คุณภาพของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อที่ดีกว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังที่สูง การตรวจสอบคุณภาพและเลือกตำแหน่งการติดของอิเล็กโทรดสำหรับวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อสามารถใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังในการวิเคราะห์ได้และได้นำไปประยุกต์ใช้กับอิเล็กโทรดแบบตาราง (electrode grid) ขนาด 3×3 เพื่อเป็นการเลือกคู่อิเล็กโทรดที่เหมาะสมในการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อให้มีคุณภาพ

ABSTRACT

This study presents a development of automatic electrode position selection and electrode integrity determination system for electromyography (EMG) signal measurement. The quality of electrode for EMG measurement was determined using an electrode-skin impedance. The impedance measurement system was developed based on AD5933 with frequency range of 5 kHz to 100 kHz and the impedance range of $1\text{ k}\Omega$ to $10\text{ M}\Omega$. This work proposes an “Auto calibration” system which is designed for increasing the accuracy of impedance measurement system. AD5933 was controlled by an Arduino Mega 2560 and measurement results were displayed and recorded by a computer. The experimental results show that the accuracy of impedance from the proposed system is lower than 2%

Received 2 May 2018

Revised 20 September 2018

Accepted 26 November 2018

on the impedance range of 1 k Ω to 1 M Ω at the operation frequency 5 kHz while the range of 1 M Ω to 10 M Ω results in higher measurement error. Then, the electrode-skin impedance measured from the proposed system was used to compare with the quality of EMG signals. Results show that signal to noise ratio (SNR) of the EMG signals from the low electrode-skin impedance is better than that from the high electrode-skin impedance. The proposed system was applied for electrode position selection and electrode integrity determination based on a dry 3 $\times$ 3 electrode grid.

1. บทนำ

สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ (electromyography, EMG) เป็นสัญญาณที่เกิดจากการหดตัวของกล้ามเนื้อ ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นการนำสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อมาใช้ในการวินิจฉัยโรคกล้ามเนื้อร่วมประสาท (neuro-muscular diseases) [1] นำสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อมาใช้ในการฟื้นฟู บำบัดรักษา [2] นำสัญญาณมาใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า นำมาประยุกต์ใช้เพิ่มความสะดวกให้แก่ผู้พิการและยังมีการนำสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อมาใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์อีกด้วย [3]

การที่จะได้มาซึ่งสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อที่มีคุณภาพนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบรูปร่างอิเล็กโทรดสำหรับวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ วัสดุที่ใช้ในการทำอิเล็กโทรด รวมถึงสารที่ใช้เคลือบอิเล็กโทรดทั้งอิเล็กโทรดแบบแห้งและแบบเป็นเจล ส่วนมีผลต่อการนำกระแสและค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนัง (electrode-skin impedance) [4-6] ซึ่งการออกแบบอิเล็กโทรดที่จะทำให้ได้คุณภาพของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อที่ดี จะต้องมีย่านค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังที่ต่ำ [7] เพื่อให้มีสัญญาณรบกวนที่น้อย เนื่องจากสัญญาณรบกวนส่วนหนึ่งก็มาจากค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนัง [8] แรงกระทำจากภายนอกก็มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนัง [9] ด้วย

ตามโครงสร้างของผิวหนัง ค่าอิมพีแดนซ์ของผิวหนัง (skin impedance) จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า ถ้าความถี่มีค่ามากค่าอิมพีแดนซ์ของผิวหนังจะมีค่าน้อย [10] ทำให้การออกแบบวงจรขยาย

สัญญาณจะต้องมีอิมพีแดนซ์ด้านขาเข้าที่สูงมาก ๆ เพื่อป้องกันการไม่สมดุลของค่าอิมพีแดนซ์ของผิวหนังในการแปลงจากแรงดันไฟฟ้ารวมเป็นผลต่างแรงดันไฟฟ้าในทุกย่านความถี่ [11]

ตำแหน่งของกล้ามเนื้อในการติดอิเล็กโทรดก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อให้มีคุณภาพ เนื่องจากตำแหน่งในการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อให้มีคุณภาพของแต่ละบุคคลไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับความยาวของกล้ามเนื้อด้วย [12-13] การเลือกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อที่มีคุณภาพอาจเลือกจากค่าของการติดอิเล็กโทรดที่ให้ขนาดของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อที่ได้มีค่าสูงที่สุด [14]

ปัจจัยต่างๆ ข้างต้นล้วนส่งผลต่อคุณภาพของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ ซึ่งการได้มาของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อที่ไม่มีคุณภาพอาจส่งผลการวินิจฉัยโรค ทำให้การวินิจฉัยโรคผิดพลาด การควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า การควบคุมหุ่นยนต์ แขนขาเทียมมีความผิดพลาด การเลือกตำแหน่งและตรวจสอบคุณภาพของอิเล็กโทรดก่อนการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อที่จะได้สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อที่มีอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio, SNR) ที่ดี

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาารระบบสำหรับเลือกตำแหน่งและตรวจสอบคุณภาพของอิเล็กโทรดสำหรับวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้ากล้ามเนื้อ เพื่อให้ได้สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อที่มีคุณภาพโดยเน้นในปัจจัยของค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังซึ่งมีผลต่อคุณภาพของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อและการออกแบบระบบการวัดอิมพีแดนซ์ที่มีความถูกต้องสูงด้วยการสอบเทียบอัตโนมัติ (Auto calibration) เพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของ

อิเล็กทรอนิกส์และวิเคราะห์ถึงตำแหน่งของคู่อิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมในการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ

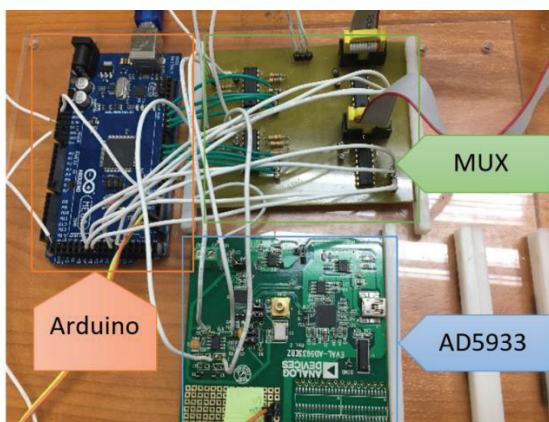
2. วิธีการ

2.1 ภาพรวมการทำงานของระบบการวัดอิมพีแดนซ์และการเลือกตำแหน่งของอิเล็กทรอนิกส์

การวัดอิมพีแดนซ์สามารถทำได้โดยการจ่ายสัญญาณด้านเข้าเป็นสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ค่าหนึ่งให้กับอุปกรณ์ที่ต้องการวัดค่าอิมพีแดนซ์ โดยทำการวัดค่าแอมพลิจูดแรงดันตกคร่อมและกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์แล้วนำมาประมวลผลหาค่าอิมพีแดนซ์ ดังสมการที่ (1)

$$Z = \frac{V}{I} \quad (1)$$

ระบบการวัดอิมพีแดนซ์ได้ออกแบบโดยใช้ AD5933 ซึ่งเป็นไอซีสำหรับวัดอิมพีแดนซ์ ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบการวัดอิมพีแดนซ์

ซึ่งมีการสื่อสารแบบ I²C ที่มีอัตราการชักตัวอย่างที่ 1 MS/sec ทำให้สามารถวัดอิมพีแดนซ์ได้ในช่วงความถี่ที่ 5 kHz - 100 kHz โดยสัญญาณเข้า AD5933 จะมีการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและมีการแปลงฟูริเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง ทำให้ผลที่ได้จากการแปลงฟูริเยร์แบบไม่ต่อเนื่องของ AD5933 มี 2 ค่า คือ ค่าที่เป็นส่วนจริงและค่าที่เป็นส่วนจินตภาพ [15] ซึ่งสามารถนำมาคำนวณเป็นค่าอิมพีแดนซ์ได้ โดยกำหนดค่าคงที่ให้กับ

ระบบ ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งการที่จะวัดอิมพีแดนซ์ให้มีความถูกต้อง Rfb และ Rcal มีผลเป็นอย่างมากเนื่องจาก Rfb เป็นความต้านทานป้อนกลับของวงจรขยายกระแสซึ่งกำหนดอัตราขยายกระแสและค่าความต้านทานสอบเทียบ หรือ Rcal เป็นตัวกำหนดค่าอัตราขยายชดเชย (Gain Factor) ซึ่งค่า Rfb กับ Rcal ถ้าไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจะทำให้ผลการวัดอิมพีแดนซ์มีความไม่ถูกต้องสูง

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ของระบบวัดอิมพีแดนซ์

ตัวแปร	ค่าคงที่
V _{dd}	3.3 V
Output Excitation Voltage Amplitude (V _{pk})	1.98 V _{p-p}
V _{DCoffset}	1.48 V
Gain	1

ระบบการวัดถูกออกแบบให้มีการสอบเทียบอัตโนมัติ ซึ่งเป็นการปรับพารามิเตอร์ Rfb และ Rcal ในการวัดแบบอัตโนมัติเพื่อการวัดอิมพีแดนซ์มีความถูกต้องตลอดช่วงการวัดที่ 1 kΩ - 10 MΩ ซึ่งได้แบ่งช่วงการวัดอิมพีแดนซ์ออกเป็น 6 ช่วง ดังแสดงในตารางที่ 2 เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของอิเล็กทรอนิกส์และผิวหนังจะมีค่าอยู่ในช่วง 1 kΩ - 100 kΩ จึงได้ออกแบบให้ช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 มีความกว้างของช่วงน้อยกว่าช่วงที่ 3 ถึงช่วงที่ 6 เพื่อที่จะให้มีความถูกต้องที่สูงในช่วงของการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กทรอนิกส์และผิวหนัง ส่วนช่วงที่ 3 ถึงช่วงที่ 6 ได้ออกแบบให้มีช่วงการวัดที่กว้างเพื่อที่จะได้วัดอิมพีแดนซ์ครอบคลุมเต็มประสิทธิภาพที่ไอซี AD5933 ที่สามารถวัดได้และเพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องในการวัดอิมพีแดนซ์ที่มีผลกระทบมาจาก Rfb และ Rcal ต่อความกว้างของช่วงการวัด

ตารางที่ 2 ช่วงการวัดอิมพีแดนซ์และค่าความต้านทานของ Rfb และ Rcal ในการสอบเทียบอัตโนมัติ

ช่วง	อิมพีแดนซ์ (kΩ)	Rfb (kΩ)	Rcal (kΩ)
1	1-10	0.6	3.8
2	10-100	6.6	38.0
3	100-300	67.3	120.4

ตารางที่ 2 (ต่อ) ช่วงการวัดอิมพีแดนซ์และค่าความต้านทานของ Rfb และ Rcal ในการสอบเทียบอัตโนมัติ

ช่วง	อิมพีแดนซ์ (kΩ)	Rfb (kΩ)	Rcal (kΩ)
4	300-600	220.5	299.0
5	600-1,000	286.3	515.7
6	1,000-10,000	671.0	4140.0

โดยความกว้างของช่วงต่าง ๆ ได้นำมาคำนวณหาค่า Rfb [16] ดังสมการที่ (2) และการคำนวณหาค่า Rcal [16] ดังสมการที่ (3) ซึ่งค่า Z_{min} คือ ค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุด และ Z_{max} คือค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดของช่วงการวัดในแต่ละช่วง

$$Rfb = \frac{((\frac{V_{dd}}{2}) - 0.2) \times Z_{min}}{V_{pk} + (\frac{V_{dd}}{2}) - V_{DCoffset}} \times \frac{1}{Gain} \quad (2)$$

$$Rcal = \frac{Z_{max} + Z_{min}}{3} \quad (3)$$

ซึ่งตัวต้านทานที่นำมาใช้เป็น Rfb และ Rcal เป็นตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอนที่มีความผิดพลาด $\pm 5\%$ และได้ใช้มัลติมิเตอร์รุ่น FLUKE 111 TRUE RMS ความผิดพลาด $\pm 0.9\%$ ในการวัดค่าของ Rfb และ Rcal ซึ่งใช้ตัวเลือกช่องสัญญาณแบบแอนะล็อก (Analog Multiplexer) 8:1 CD74HC4051E เป็นสวิตช์ในการเลือก Rfb และ Rcal ภาพรวมการทำงานแสดงในรูปที่ 2 โดยใช้ Analog MUX1 ทำหน้าที่ในการเลือก Rfb และ Analog MUX2 ทำหน้าที่ในการเลือก Rcal โดยในการสอบเทียบจะใช้ช่องสัญญาณของตัวเลือกช่องสัญญาณแบบแอนะล็อกจำนวน 6 ช่อง คือ CH1 - CH6 เมื่อทำการสอบเทียบเพื่อคำนวณค่าอัตราขยายชัดเจนแล้ว ระบบจะทำการวัดอิมพีแดนซ์ที่ต้องการวัดจาก CH7 ซึ่งมี Analog MUX3 และ Analog MUX4 ทำหน้าที่ในการเลือกคู่ของอิเล็กโทรดแบบตารางขนาด 3×3 โดยอิเล็กโทรดที่เลือกจาก Analog MUX3 จะต่อเข้ากับขา A ของ EVALUATION BOARD AD5933 และ

อิเล็กโทรดที่เลือกจาก Analog MUX4 จะต่อเข้ากับขา CH7 ของ Analog MUX2

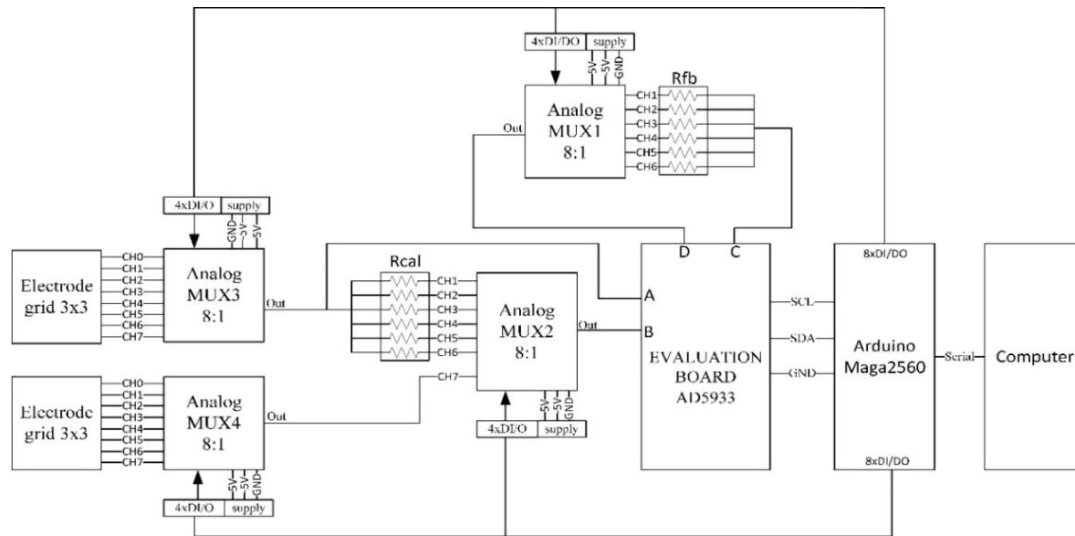
2.2 การทำงานของระบบการสอบเทียบอัตโนมัติ

ระบบการวัดอิมพีแดนซ์จะทำการวัดอิมพีแดนซ์ในช่วงการสอบเทียบช่วงที่ 1 ก่อน ซึ่งระบบจะสั่งให้ตัวเลือกช่องสัญญาณแบบแอนะล็อกเลือก Rfb และ Rcal ของช่วงที่ 1 จากนั้นทำการวัดอิมพีแดนซ์และตรวจสอบผลการวัดอิมพีแดนซ์ว่ามีค่าอยู่ในช่วงที่ 1 หรือไม่ ถ้าไม่ใช่สั่งให้ช่องสัญญาณแบบแอนะล็อกเลือก Rfb และ Rcal ในช่วงที่ 2 และตรวจสอบผลการวัดว่าอยู่ในช่วงที่ 2 หรือไม่ ถ้าไม่ก็ทำการวัดในช่วงที่ 3 ต่อไปจนถึงช่วงที่ 6 แต่ถ้าใช่ ระบบก็จะแสดงผลการวัดอิมพีแดนซ์ที่ถูกต้องดังแสดงใน pseudo code

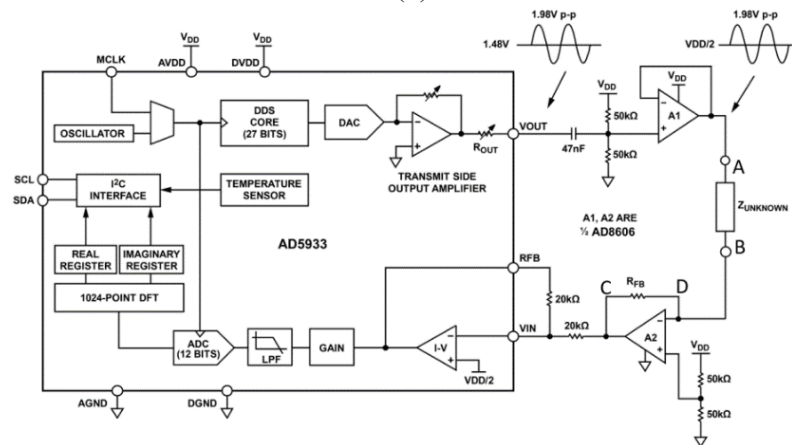
pseudo code : ระบบการสอบเทียบอัตโนมัติ

```

int i = 1;
if( 0 < i < 7) then
    select Rfb and Rcal on range i;
    impedance measurement;
    if (impedance is on range i)
        return impedance
    else i = i++;
end
end
    
```



(1)



(2)

รูปที่ 2 ภาพรวมระบบการวัดอิมพีแดนซ์

(1) บล็อกไดอะแกรมของระบบการวัดอิมพีแดนซ์

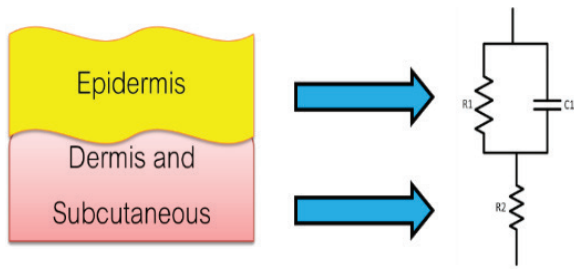
(2) บล็อกไดอะแกรมของ EVALUATION BOARD AD5933 [17]

2.3 การทดสอบความถูกต้องในการวัดอิมพีแดนซ์

2.3.1 การทดสอบความถูกต้องของระบบในย่านความถี่ 5 kHz-100 kHz

การทดสอบได้ใช้แบบจำลองอิมพีแดนซ์ของผิวหนัง ดังแสดงในรูปที่ 3 กำหนดให้ $R_1 = 149 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 296.7 \Omega$, $C_1 = 27 \text{ pF}$ เป็นค่าที่วัดจากมัลติมิเตอร์รุ่น FLUKE 111 TRUE RMS ความผิดพลาด $\pm 0.9\%$ โดยค่าพารามิเตอร์ได้ต้นแบบมาจากวงจรแบบจำลองของผิวหนัง [9] ซึ่งมาจากการแปลงกายวิภาคของผิวหนังให้อยู่ในรูปของวงจรไฟฟ้า โดยโครงสร้างของผิวหนังแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้น คือ ชั้นหนังกำพร้า (epidermis) ชั้นหนังแท้

(dermis) และชั้นใต้ผิวหนัง (subcutaneous) การทดสอบความถูกต้องของระบบการวัดอิมพีแดนซ์ ได้วัดอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ ตั้งแต่ 5 kHz - 100 kHz และนำผลที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาความผิดพลาดของระบบการวัดอิมพีแดนซ์



รูปที่ 3 แบบจำลองอิมพีแดนซ์ของผิวหนัง

2.3.2 การทดสอบความถูกต้องของระบบในช่วงอิมพีแดนซ์ 1 k Ω - 10 M Ω

การทดสอบโดยให้ระบบการวัดอิมพีแดนซ์วัดอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอนที่มีความผิดพลาด $\pm 5\%$ ตั้งแต่ 1 k Ω - 10 M Ω ซึ่งเป็นช่วงที่ระบบการวัดอิมพีแดนซ์ที่ได้พัฒนาขึ้น โดยใช้ไอซี AD5933 สามารถวัดได้ โดยเปรียบเทียบผลการวัดค่าความต้านทานที่ได้จากระบบที่นำเสนอกับค่าความต้านทานที่อ่านได้จากมัลติมิเตอร์รุ่น FLUKE 111 TRUE RMS ความผิดพลาด $\pm 0.9\%$ โดยกำหนดความถี่คงที่ที่ 5 kHz เนื่องจากความถี่ที่ต่ำ ระบบมีความถูกต้องในการวัดที่สูง ในการทดสอบได้ทำการวัดซ้ำ 5 ครั้ง

2.4 การวัดค่าสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อและอิมพีแดนซ์

ในการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังและสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อเพื่อนำมาวิเคราะห์คุณภาพของการติดอิเล็กโทรดและคุณภาพของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ มีผู้ทดสอบ 4 คน ซึ่งการทดสอบได้ใช้อิเล็กโทรดแบบเจล 2 ชนิด คือ อิเล็กโทรดเจลที่มีความสมบูรณ์กับอิเล็กโทรดเจลที่เจลเสื่อมสภาพ ก่อนการติดอิเล็กโทรดได้ทำความสะอาดผิวหนังก่อนด้วยแอลกอฮอล์ ซึ่งลักษณะการติดอิเล็กโทรดได้ติดแบบวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อแบบสองขั้ว (bipolar configuration) บนกล้ามเนื้อเฟลกเซอร์คาร์ไพอัลนริส โดยระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ห่างกันประมาณ 2 เซนติเมตร เนื่องจากเป็นระยะห่างที่เหมาะสมในการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ เมื่อติดอิเล็กโทรดที่มีเจลสมบูรณ์แล้ว ทำการวัดอิมพีแดนซ์ระหว่างขั้วของอิเล็กโทรด โดยการวัดอิมพีแดนซ์ได้เก็บข้อมูลในช่วงความถี่ต่าง ๆ ตั้งแต่

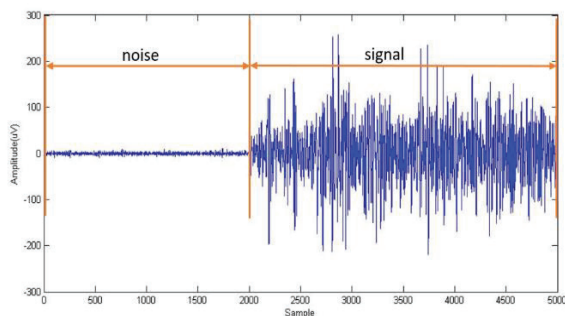
5 kHz ถึง 20 kHz เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของผิวหนังมีค่าเปลี่ยนไปตามความถี่ ตามลักษณะของแบบจำลองอิมพีแดนซ์ของผิวหนังดังแสดงในรูปที่ 3 และการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อได้ใช้เครื่องวัดสัญญาณ MOBI6 ผลิตโดย บริษัท ทีเอ็มเอส อินเทอร์เนชันนัล ประเทศเนเธอร์แลนด์ ซึ่งเป็นเครื่องมือในการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ โดยกำหนดอัตราการสุ่มตัวอย่างที่ 1024 Hz และในการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อได้ทำการควบคุมการออกแรงโดยให้ผู้ทดสอบยกมวล 5 กิโลกรัม เพื่อให้เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อในแต่ละครั้งใกล้เคียงกัน เมื่อวัดเสร็จทำการเปลี่ยนอิเล็กโทรดเป็นอิเล็กโทรดที่เจลเสื่อมสภาพ โดยคิดในตำแหน่งเดียวกัน แล้วทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังและสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อด้วยวิธีการเดียวกันกับใช้อิเล็กโทรดที่เจลสมบูรณ์ โดยการวัดจะทำซ้ำ 3 ครั้ง

2.5 การวิเคราะห์สัญญาณ

จากสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อที่ได้บันทึกไว้ นำมาผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธที่ 20 - 500 Hz แล้วคำนวณหา V_{rms} ดังสมการที่ (4) เพื่อนำไปหาอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ดังสมการที่ (5) ซึ่ง V_{rms_signal} คำนวณจากสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อขณะที่กล้ามเนื้อเกิดการหดตัว และ V_{rms_noise} คำนวณจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นขณะที่กล้ามเนื้อไม่มีการหดตัว ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อไปวิเคราะห์เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อกับอิมพีแดนซ์ของอิเล็กโทรดเพื่อบ่งบอกคุณภาพของการติดอิเล็กโทรดและนำความสัมพันธ์นี้ไปใช้ในระบบการเลือกตำแหน่งของอิเล็กโทรด

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (4)$$

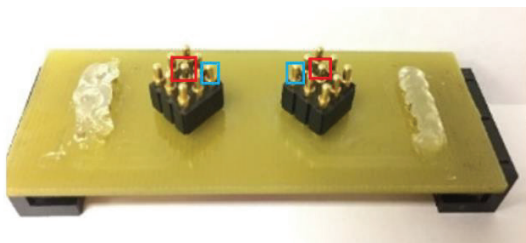
$$SNR = 20 \log \frac{V_{rms_signal}}{V_{rms_noise}} \quad (5)$$



รูปที่ 4 สัญญาณรบกวนและสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ

2.6 การประยุกต์ใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังในการเลือกตำแหน่งสำหรับอิเล็กโทรดแบบตารางขนาด 3×3

จากผลการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังทำให้สามารถนำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังมาเป็นปัจจัยในการเลือกตำแหน่งของอิเล็กโทรดสำหรับวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อให้มีคุณภาพที่ดี ซึ่งได้นำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับอิเล็กโทรดแบบตารางขนาด 3×3 ซึ่งได้ออกแบบอิเล็กโทรดสำหรับวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อแบบสองขั้ว (bipolar configuration) ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 อิเล็กโทรดแบบตารางขนาด 3×3 โดยระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของอิเล็กโทรดในแต่ละด้าน (กรอบสีแดง) ห่างกัน 2 เซนติเมตร อิเล็กโทรดด้านในสุด (กรอบสีฟ้า) ใช้เป็นจุดอ้างอิงสำหรับวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ

อิเล็กโทรดที่ใช้ในการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ มีฝั่งละ 8 ตัว จำนวนคู่อิเล็กโทรดทั้งหมดที่สามารถวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อได้ คือ 64 คู่ การวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังจะวัดทีละคู่โดยใช้

ตัวเลือกของสัญญาณแบบแอนะล็อกเป็นตัวช่วยในการสลับตำแหน่งของคู่อิเล็กโทรด เพื่อที่จะหาคู่อิเล็กโทรดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังที่ต่ำที่สุดในการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ ซึ่งการวัดอิมพีแดนซ์ได้ใช้ความถี่คงที่ที่ 5 kHz เมื่อได้คู่ที่จะทำการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อแล้วก็จะทำการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ และแสดงผลการวัดและเลือกคู่อิเล็กโทรดที่เหมาะสมทางคอมพิวเตอร์

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการสอบเทียบอัตโนมัติ

การเลือก R_{fb} และ R_{cal} ที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เนื่องจากเป็นตัวปรับค่าอัตราขยายขดเซย์ให้เหมาะสมในการวัดอิมพีแดนซ์ในย่านต่างๆ ค่าที่ได้จาก AD5933 จะมี 2 ค่า คือ ค่าที่เป็นจำนวนจริง (R) และค่าที่เป็นจำนวนจินตภาพ (I) ซึ่งสามารถหาค่าแมกนิจูด [15] ได้ดังสมการที่ (6) และสามารถคำนวณหาอัตราขยายขดเซย์ [15] ได้ดังสมการที่ (7) ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการคำนวณอัตราขยายขดเซย์คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของ R_{cal}

$$\text{Magnitude} = \sqrt{R^2 + I^2} \quad (6)$$

$$\text{Gain Factor} = \frac{1/\text{Impedance}}{\text{Magnitude}} \quad (7)$$

อัตราขยายขดเซย์ที่ได้จากระบบการสอบเทียบอัตโนมัติ ได้ผลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าอัตราขยายขดเซย์ที่ได้จากระบบการสอบเทียบอัตโนมัติ

ช่วง	อิมพีแดนซ์ (kΩ)	อัตราขยายขดเซย์
1	1-10	1.383×10^{-7}
2	10-100	1.515×10^{-8}
3	100-300	1.483×10^{-9}
4	300-600	4.391×10^{-10}
5	600-1,000	2.494×10^{-10}
6	1,000-10,000	1.138×10^{-10}

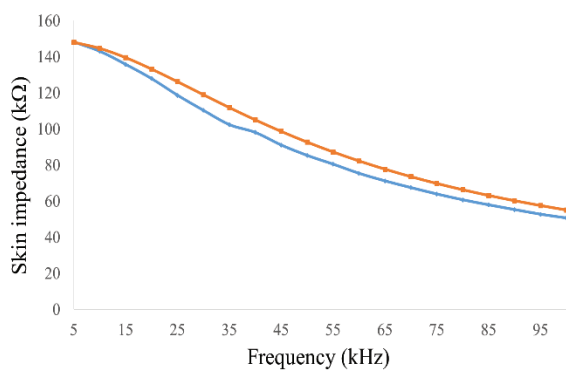
3.2 ผลการทดสอบความถูกต้องในการวัดอิมพีแดนซ์

จากค่าอัตราขยายขดเชย ที่ได้จากการสอบเทียบ ได้นำมาใช้ในการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ที่ต้องการวัด ซึ่งคำนวณอิมพีแดนซ์ [15] ได้ดังสมการที่ (8)

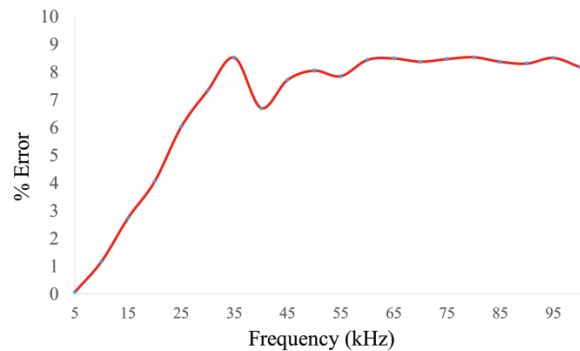
$$\text{Impedance} = \frac{1}{\text{Gain Factor} \times \text{Magnitude}} \quad (8)$$

3.2.1 การทดสอบความถูกต้องในย่านความถี่ 5 kHz - 100 kHz

รูปที่ 6 แสดงผลการวัดแบบจำลองอิมพีแดนซ์ของผิวหนังโดยกวาดความถี่ตั้งแต่ 5 kHz - 100 kHz เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางไฟฟ้าของวงจรแบบจำลองอิมพีแดนซ์ของผิวหนัง พบว่า ระบบการวัดอิมพีแดนซ์ มีความถูกต้องสูงในการวัดอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่ำ ซึ่งที่ความถี่ที่ 5 kHz มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดใกล้เคียงศูนย์ เมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นความผิดพลาดในการวัดอิมพีแดนซ์ก็จะมีความสูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นผลมาจากค่าผิดพลาดควอนไทเซชัน (quantization error) ความถี่ที่ 5 kHz จึงเป็นความถี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังต่อไป



รูปที่ 6 ผลการวัดแบบจำลองอิมพีแดนซ์ของผิวหนังในย่านความถี่ 5 kHz – 100 kHz (สีฟ้า) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ (สีส้ม)



รูปที่ 7 เปอร์เซนต์ความผิดพลาดของระบบการวัดอิมพีแดนซ์ในย่านความถี่ 5 kHz – 100 kHz

3.2.2 ผลการทดสอบความถูกต้องในช่วงอิมพีแดนซ์ 1 kΩ - 10 MΩ

จากการทดสอบวัดอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานแบบฟิล์มคาร์บอนที่มีความผิดพลาด $\pm 5\%$ ค่าต่าง ๆ ในช่วง 1 kΩ - 10 MΩ โดยกำหนดความถี่คงที่ 5 kHz เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์รุ่น FLUKE 111 TRUE RMS ความผิดพลาด $\pm 0.9\%$ พบว่า ระบบมีความถูกต้องในการวัดเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีระบบการสอบเทียบอัตโนมัติที่ช่วยปรับค่าอัตราขยายขดเชยให้เหมาะสมกับการวัดอิมพีแดนซ์ในช่วงต่าง ๆ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความถูกต้องในการวัดอิมพีแดนซ์ในช่วง 1 k Ω - 10 M Ω

อิมพีแดนซ์ วัดโดยมัลติมิเตอร์ (k Ω)	อิมพีแดนซ์ที่วัดโดยระบบ (k Ω)	% ความ ผิดพลาด	ช่วงการ สอบเทียบ	Rcal (k Ω)
1.007	1.010 $\pm$ 0.000	0.297	1	3.8
2.472	2.458 $\pm$ 0.001	0.566	1	3.8
4.996	4.998 $\pm$ 0.001	0.040	1	3.8
7.330	7.388 $\pm$ 0.003	0.791	1	3.8
9.810	9.974 $\pm$ 0.009	1.671	1	3.8
10.980	10.763 $\pm$ 0.002	1.976	2	38.0
24.820	24.532 $\pm$ 0.007	1.160	2	38.0
50.400	50.515 $\pm$ 0.016	0.228	2	38.0
74.900	75.962 $\pm$ 0.033	1.417	2	38.0
98.900	99.164 $\pm$ 0.518	0.266	2	38.0
101.700	101.463 $\pm$ 0.023	0.233	3	120.4
148.700	148.588 $\pm$ 0.041	0.075	3	120.4
197.200	197.759 $\pm$ 0.060	0.283	3	120.4
247.700	248.335 $\pm$ 0.192	0.256	3	120.4
297.000	298.388 $\pm$ 0.094	0.467	3	120.4
303.600	303.478 $\pm$ 0.197	0.040	4	299.0
378.000	378.343 $\pm$ 0.249	0.091	4	299.0
454.100	454.736 $\pm$ 0.121	0.140	4	299.0
528.500	530.361 $\pm$ 0.620	0.352	4	299.0
598.000	598.590 $\pm$ 0.141	0.099	4	299.0
601.000	602.051 $\pm$ 1.093	0.175	5	515.7
702.000	703.205 $\pm$ 3.843	0.172	5	515.7
802.000	803.181 $\pm$ 0.676	0.147	5	515.7
901.000	904.075 $\pm$ 0.617	0.341	5	515.7
987.000	986.452 $\pm$ 3.201	0.056	5	515.7
1014.000	1109.313 $\pm$ 3.321	9.400	6	4140.0
2346.000	2439.328 $\pm$ 5.573	3.978	6	4140.0
3081.000	3062.182 $\pm$ 7.947	0.611	6	4140.0
3725.000	3752.141 $\pm$ 5.936	0.729	6	4140.0
5167.000	4371.184 $\pm$ 21.037	15.402	6	4140.0
6080.000	4855.983 $\pm$ 19.377	20.132	6	4140.0
7090.000	5808.221 $\pm$ 23.273	18.079	6	4140.0
8090.000	6436.601 $\pm$ 9.516	20.438	6	4140.0
9100.000	7003.012 $\pm$ 15.543	23.044	6	4140.0
9900.000	7600.750 $\pm$ 27.541	23.225	6	4140.0

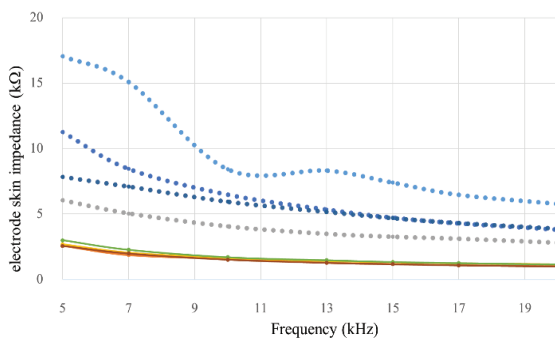
เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการวัดอิมพีแดนซ์ในช่วง 1 k Ω - 1 M Ω (การสอบเทียบอัตโนมัติช่วงที่ 1 – 5) มีความถูกต้องเป็นอย่างมาก ความผิดพลาดน้อยกว่า 2% แต่ในช่วง 1 M Ω - 10 M Ω (การสอบเทียบอัตโนมัติช่วงที่ 6) พบว่ามีความผิดพลาดที่สูงเนื่องจากช่วงของการสอบเทียบกว้างมากกว่าช่วงอื่น ๆ โดยช่วงการวัดนี้ใช้ Rcal = 4.1 M Ω การวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่มีค่าใกล้เคียง

กับ Rcal มีความผิดพลาดน้อยแต่ค่าอิมพีแดนซ์ที่ยิ่งห่างจาก Rcal ก็ยิ่งมีความผิดพลาดมากขึ้น ทำให้เห็นถึงความสำคัญของ Rcal ในระบบการสอบเทียบที่ทำให้ระบบการวัดมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

3.3 ผลการวัดอิมพีแดนซ์กับสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ

3.3.1 ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนัง

ผลจากการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังของผู้ทดสอบทั้งหมด 4 คน ทั้งอิเล็กโทรดที่มีคุณภาพและไม่มีความคุณภาพ พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากอิเล็กโทรดที่ไม่มีคุณภาพจะมีค่าสูงกว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากอิเล็กโทรดที่มีคุณภาพ และเมื่อเพิ่มความถี่สูงขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังก็จะลดลง ซึ่งเป็นไปตามรูปแบบของแบบจำลองอิมพีแดนซ์ของผิวหนังดังรูปที่ 3 และพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังในตำแหน่งการติดอิเล็กโทรดตำแหน่งเดียวกันของแต่ละผู้ทดสอบจะมีค่าไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของกล้ามเนื้อด้วย ซึ่งผลของการวัดอิมพีแดนซ์ของผิวหนังแสดงใน รูปที่ 8

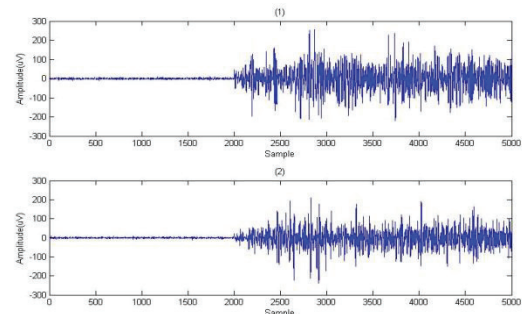


รูปที่ 8 ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังของผู้ทดสอบทั้งหมด 4 คน ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังที่วัดจากอิเล็กโทรดที่มีคุณภาพ (เส้นทึบ) ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังที่วัดจากอิเล็กโทรดที่ไม่มีคุณภาพ (เส้นประ)

3.3.2 เปรียบเทียบคุณภาพของสัญญาณกับอิมพีแดนซ์

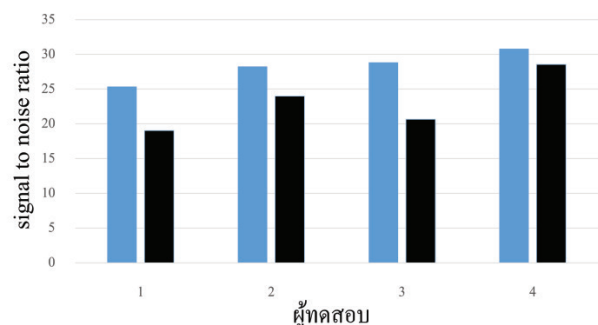
จากการนำสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อที่ได้จากการใช้อิเล็กโทรดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 9 มาวิเคราะห์อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ พบว่าสัญญาณไฟฟ้า

กล้ามเนื้อที่มีคุณภาพ (มีอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่สูง) เกิดการติดอิเล็กโทรดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังที่ต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 9 สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ

- (1) สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อจากอิเล็กโทรดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังต่ำ
- (2) สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อจากอิเล็กโทรดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังสูง



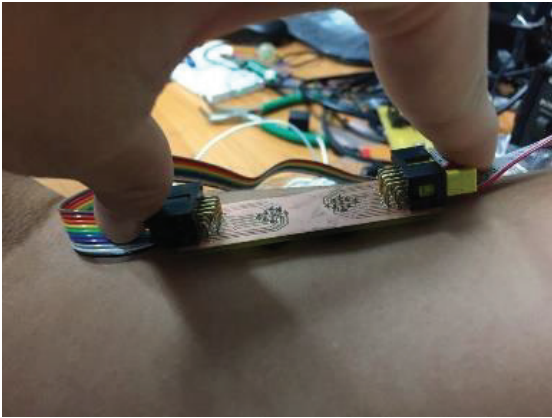
รูปที่ 10 อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อที่ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังต่างกัน ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังต่ำ (สีฟ้า) ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังสูง (สีดำ)

3.4 การนำไปใช้เลือกตำแหน่งสำหรับอิเล็กโทรดแบบตารางขนาด 3×3

3.4.1 การวางอิเล็กโทรด

ระบบการวัดอิมพีแดนซ์ จะทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังของคู่อิเล็กโทรดทั้งหมด 64 คู่

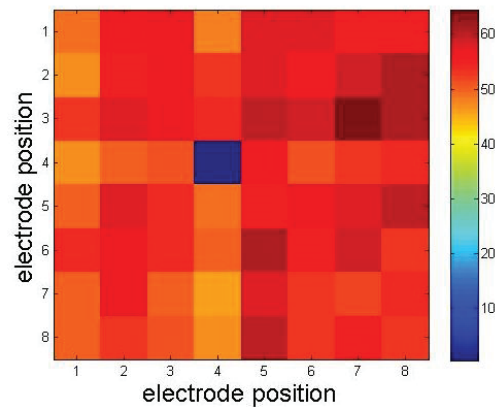
เพื่อหาอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังที่ต่ำที่สุด โดยใช้ความถี่ที่ 5 kHz ในการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนัง ซึ่งลักษณะวางอิเล็กโทรดบนกล้ามเนื้อ ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 การทดสอบการวางอิเล็กโทรดแบบตารางขนาด 3x3 เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ

3.4.2 การแสดงผลการเลือกตำแหน่ง

เมื่อระบบวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนัง ค่าที่วัดจะแสดงผลทางคอมพิวเตอร์ โดยแสดงผลค่าที่วัดได้เป็นเจดสี โดยสีน้ำเงินเข้มเป็นตำแหน่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังต่ำที่สุด เหมาะสมสำหรับนำไปวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 หน้าต่างแสดงผลการเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมในการวัดอิมพีแดนซ์ โดยสีน้ำเงินแสดงถึงค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังต่ำที่สุด และสีแดงค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังสูงที่สุด

4. สรุปผลการทดสอบ

การออกแบบระบบการวัดอิมพีแดนซ์ โดยใช้ AD5933 ซึ่งมีระบบการสอบเทียบอัตโนมัติที่ทำให้ระบบการวัดอิมพีแดนซ์มีความยืดหยุ่นและเพิ่มประสิทธิภาพในการวัด การวัดอิมพีแดนซ์ในย่านความถี่ต่าง ๆ ตั้งแต่ 5 kHz - 100 kHz พบว่า ที่ความถี่ต่ำจะมีความถูกต้องในการวัดอิมพีแดนซ์มากกว่าที่ความถี่สูง ซึ่งการวัดอิมพีแดนซ์ในช่วง 1 k Ω - 1 M Ω ที่ความถี่ 5 kHz ให้ความถูกต้องในการวัดสูง โดยมีความผิดพลาดน้อยกว่า 2% เนื่องจากการแบ่งช่วงของระบบการสอบเทียบอัตโนมัติมีความละเอียด แต่การวัดอิมพีแดนซ์ในช่วง 1 M Ω - 10 M Ω มีความผิดพลาดสูง เนื่องจากเป็นช่วงที่กว้างในการสอบเทียบ สังเกตได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ถูกวัดถ้ามีค่าใกล้เคียงกับ Rcal ในการสอบเทียบจะมีความถูกต้องสูง แต่ค่าอิมพีแดนซ์ที่ถูกวัดมีค่าห่างจาก Rcal ความถูกต้องก็ยิ่งลดลง เพื่อที่จะทำให้ช่วงการวัดนี้มีความถูกต้องมากขึ้น ควรแบ่งช่วงการวัดนี้ออกเป็นช่วงย่อยๆ เพิ่มขึ้นในระบบการสอบเทียบอัตโนมัติ เพื่อให้มีการคำนวณค่าอัตราขยายชดเชยที่เหมาะสมในการวัดอิมพีแดนซ์

ระบบการวัดอิมพีแดนซ์นี้ ได้นำมาวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังเพื่อมาวิเคราะห์

เปรียบเทียบกับคุณภาพของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ พบว่าสัญญาณที่มีคุณภาพที่ดีจะต้องมาจากอิเล็กโทรดที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังที่ต่ำ และการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากอิเล็กโทรดและผิวหนังจึงถูกนำมาใช้ในการเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมและตรวจสอบคุณภาพของอิเล็กโทรดในการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อเพื่อให้ได้สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อที่มีคุณภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนโครงการปริญญาตรี-โท 5 ปี และโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bose, R., Samanta, K. and Chatterjee, S. Cross-Correlation Based Feature Extraction from EMG Signals for Classification of Neuro-muscular Diseases. 2016 International Conference on Intelligent Control Power and Instrumentation (ICICPI), 21-23 October, Kolkata, India 2016; 241–245.
- [2] Nazmi, N., Rahman, M. A. A., Mazlan, S. A., Zamzuri, H. and Mizukawa, M. Electromyography (EMG) based Signal Analysis for Physiological Device Application in Lower Limb Rehabilitation. 2015 2nd International Conference on Biomedical Engineering (ICoBE), 30-31 March, Penang, Malaysia, 2015; 1–6.
- [3] Yao, W., Jin, H., Liu, C., Xu, M., Yang, J. and Dong, E. Research of a Dual Stage Bending Dexterous Robotic Hand with EMG Control. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 3-7 December, Qingdao, China, 2016; 515–520.
- [4] Ghosh, S., Mahadevappa, M. and Mukhopadhyay, J. A 2D Electrode-Skin Model for Electrical & Contact Impedance Characterization of Bio Impedance. 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON), 22-25 November, Singapore, 2016; 2292–2295.
- [5] Liu, H., Tao, X., Xu, P., Zhang, H. and Bai, Z. A Dynamic Measurement System for Evaluating Dry Bio-potential Surface Electrodes. *Measurement*, 2013; 46(6): 1904–1913.
- [6] Liu, W., Zhou, W., Liu, S., Zhang, C., Huang, S. and Li, Y. Electrical Impedance Performance of Metal Dry Bioelectrode with Different Surface Coatings. *Sensor and Actuators A*, 2018; 269: 515–523.
- [7] Wang, L. F., Liu, J. Q., Yang, B. and Yang, C. S. PDMS-Based Low Cost Flexible Dry Electrode for Long-Term EEG Measurement. *IEEE Sensors Journal*, 2012; 12(9): 2898–2904.
- [8] Saadi, H. and Attari, M. Electrode-Gel-Skin Interface Characterization and Modeling for Surface Biopotential Recording: Impedance Measurements and Noise. 2013 2nd International Conference on Advances in Biomedical Engineering, 11-13 September, Tripoli, Lebanon, 2013; 49–52.
- [9] Albulbul, A. and Chan, A. D. C. Electrode-Skin Impedance Changes Due to an Externally Applied Force. 2012 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications Proceedings, 18-19 May, Budapest, Hungary, 2012; 1–4.
- [10] Huang, C. W., Huang, Y. J. and Pan, C. L. Skin Impedance Model for Biological Signal Analysis. 2013 International Symposium on Next-Generation Electronics, 25-26 February, Kaohsiung, Taiwan, 2013; 260–261.
- [11] Rosell, J., Colominas, J., Riu, P., Pallas-Areny, R. and Webster, J. G. Skin Impedance From 1 Hz to 1 MHz. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1988, 35(8): 649–651.
- [12] Rainoldi, A., Melchiorri, G. and Caruso, I. A Method for Positioning Electrodes During Surface EMG Recordings in Lower Limb Muscles. *Journal of Neuroscience Methods*, 2004; 134(1): 37–43.
- [13] Ghapanchizadeh, H., Ahmad, S. A. and Ishak, A. J. Recommended Surface EMG Electrode Position for Wrist Extension and Flexion. 2015 IEEE Student Symposium in Biomedical Engineering Sciences (ISSBES), 4 November, Shah Alam, Malaysia, 2015; 108–112.

- [14] Nojd, N., Hannula, M. and Hyttinen, J. Electrode Position Optimization for Facial EMG Measurements for Human-computer Interface. 2008 Second International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare, 30 January-1 February, Tampere, Finland, 2008; 319–322.
- [15] 1 MSPS, 12-Bit Impedance Converter, Network Analyzer AD5933. Data Sheet, Analog Devices, [Online] Available; <http://www.analog.com>
- [16] Usach, M. How to Configure the AD5933/AD5934. Application Note, Analog Devices, [Online] Available; <http://www.analog.com>
- [17] Evaluating the AD5933 1 MSPS, 12-Bit Impedance Converter Network Analyzer. Data Sheet, Analog Devices, [Online] Available; <http://www.analog.com>



การปรับปรุงกระบวนการก่อสร้างในงานติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จของ โครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียว (ส่วนเหนือ)

Improvement for Segmental Box Girder for Installation Process of Mass Rapid Transit, The Green Line Project (Northern Zone)

ประพจน์ รัตตมณี* และ ดนัย วันทนากอร์

Prapot Rattamanee* and Danai Wantanakorn

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เลขที่ 99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Faculty of Engineering, Thammasat University,

99 Moo 18 Phaholyothin Rd., Amphur Khlongluang, Pathumthani, 12120

*E-mail: prapot129070@hotmail.com, Tel.: 085-577-4911

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องการปรับปรุงกระบวนการก่อสร้างของงานติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จของโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียว (ส่วนเหนือ) ด้วยการนำความสำเร็จรูปกล่อง (Segmental Box Girder) จำนวนหนึ่งมาเรียงต่อกันเป็นพื้นสะพานทางวิ่งในโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีเขียว (ส่วนเหนือ) นั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาปัจจัยที่ทำให้การปฏิบัติงานขาดประสิทธิภาพ ควบคู่ไปกับการเก็บรวบรวมข้อมูลด้านเวลาและต้นทุนในขั้นตอนการติดตั้งชิ้นส่วนของระบบการทำงานแบบเดิม เพื่อนำอุปสรรคเหล่านั้นไปปรับปรุงการติดตั้งจนได้ระบบการทำงานรูปแบบใหม่แล้วนำระบบติดตั้งแบบใหม่นี้ไปใช้งานจริงพร้อมทั้งเก็บข้อมูลด้านเวลาและต้นทุนอีกครั้ง เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการทำงานด้วยระบบการติดตั้งแบบใหม่กับระบบการติดตั้งแบบเดิม

ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยหลักที่ทำให้ระบบการติดตั้งขาดประสิทธิภาพอันส่งผลกระทบต่อระยะเวลาและต้นทุนการก่อสร้างคือ การวางแผนระบบการทำงานแบบเรียงกันเป็นลูกโซ่ การจัดลำดับขั้นตอนการทำงานและวิธีการติดตั้งที่ไม่เหมาะสม รวมทั้งข้อจำกัดทางด้านการจราจร จากการปรับปรุงระบบการติดตั้งในรูปแบบใหม่ด้วยการจัดลำดับขั้นตอนให้เหมาะสมพร้อมทั้งเพิ่มขั้นตอนที่สามารถทำคู่ขนานกันไปได้ และพิจารณาสายงายวิกฤติ (CPM/PERT) ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้สามารถลดกระบวนการทำงานจากเดิมทั้งหมด 35 ขั้นตอน ลงเหลือ 34 ขั้นตอน และกิจกรรมวิกฤติจากเดิม 32 ขั้นตอนลดลงเหลือเพียง 27 ขั้นตอน ในการเปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยและต้นทุนเฉลี่ยของการติดตั้งชิ้นส่วนจากทั้งสองระบบ สรุปได้ว่าเวลาการปฏิบัติงานและต้นทุนการติดตั้งของระบบการทำงานในรูปแบบใหม่สามารถลดลงจากระบบทำงานรูปแบบเดิมได้โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 25.76 และ 24.43 ต่อหนึ่งช่วงพื้นสะพานทางวิ่ง ตามลำดับ

ABSTRACT

The objective of research on construction process improvement in segmental box girder of the Green Line mass rapid transit project (Northern Zone) is to identify obstacles and factors causing inefficient operations. Time and cost of operations from the original working system were initially collected. Based on the obstacles and bottlenecks found, a new working system was developed. Then,

Received 10 April 2018

Revised 24 October 2018

Accepted 28 November 2018

the new system was implemented and data related to time and cost were collected in order to compare them with those obtained from the original working system.

The results reveal that main factors causing work inefficiency in both time and cost are from sequential work plan, inappropriate working process and installation methods, and traffic restrictions. Taking those negatively influential factors into account, the new system was then created by rearranging working process in association with concurrent steps and critical path. As a result, the new process can reduce operations from 35 steps as in the original process to 34 steps, and critical activities from 32 steps to 27 steps. In comparison of the average time and cost between the two processes, this study shows that the working time and operation cost of the new process can be decreased from those of the original work process approximately 25.76% and 24.43% per span, respectively.

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการขยายตัวของเขตเมืองอย่างต่อเนื่องทั้งในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ทำให้ภาครัฐได้ริเริ่มการพัฒนาาระบบสาธารณูปโภคขั้นพื้นฐาน (Infrastructure) ขนาดใหญ่ขึ้นมากมายหลายโครงการ ซึ่งส่วนหนึ่งคือยุทธศาสตร์การพัฒนาระบบการคมนาคมขนส่งของไทย 20 ปี (พ.ศ.2558 - 2565) ทั้งนี้ลักษณะของโครงการจะเป็นการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทั้งทางถนน ทางน้ำ ทางอากาศ และทางรถไฟ โดยเฉพาะระบบรถไฟฟ้าในเขตกรุงเทพและปริมณฑล [1] จะเห็นได้ว่าเครื่องจักรกลที่เรียกว่า “Launching gantry” ซึ่งเป็นอุปกรณ์โครงเหล็กเคลื่อนได้เริ่มมีความนิยมนำมาใช้มากขึ้นเรื่อยๆในงานติดตั้งชิ้นคานคอนกรีตอัดแรงรูปกล่องสำเร็จ (Segmental box girder) สำหรับงานก่อสร้างถนน สะพาน และทางวิ่งของรถไฟฟ้า เพราะสามารถก่อสร้างได้อย่างรวดเร็วแบบทีละช่วงเสา (Span-by-Span)

เพื่อตอบสนองการพัฒนาาระบบสาธารณูปโภคขั้นพื้นฐานของรัฐที่เพิ่มมากขึ้นในอนาคต และเพื่อเพิ่มศักยภาพการแข่งขันของประเทศไทยทั้งในระดับอาเซียน และระดับสากล ผู้รับเหมางานระบบสาธารณูปโภคจึงได้นำเครื่องจักรติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จ (Launching gantry) นี้มาใช้งาน อันช่วยให้สามารถใช้ทรัพยากรน้อยลงรวมทั้งลดระยะเวลา และประหยัดงบประมาณค่าก่อสร้างของรัฐ

การติดตั้งชิ้นส่วนคานรูปกล่องด้วยเครื่องจักร Launching gantry สำหรับงานก่อสร้างรถไฟฟ้ามหานคร (ส่วนเหนือ) นั้น ได้แบ่งระบบการทำงาน

ออกเป็นชุดปฏิบัติการหลายชุด โดยที่แต่ละชุดจะทำงานในลักษณะตามกันและมีกระบวนการปฏิบัติงานในลักษณะทำซ้ำกันในทุกๆช่วงเสา [2] อย่างไรก็ตามกิจกรรมที่ทำนั้นอาจมีการสลับหรือข้ามขั้นตอนกันได้ แต่จะทำให้เวลาที่ใช้ในการทำงานไม่แน่นอน นอกจากนี้การใช้งานเครื่องจักร Launching gantry ยังอยู่ในวงจำกัด ทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ มากมาย ได้แก่ แผนงานก่อสร้างไม่เหมาะสม วิธีปฏิบัติงานเกิดอุปสรรค และการจัดลำดับขั้นตอนการติดตั้งขาดประสิทธิภาพ อันส่งผลให้เกิดการสูญเสียเวลาในการทำงานและต้นทุนค่าก่อสร้างเพิ่มขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการค้นหาปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นอุปสรรคต่อประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน แล้วนำข้อมูลเหล่านั้นไปปรับปรุงกระบวนการจนได้ระบบการทำงานรูปแบบใหม่ที่ทำให้เวลาการทำงาน และต้นทุนค่าก่อสร้างลดลง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 รูปแบบเครื่องจักรที่ใช้ในการก่อสร้างช่วงสะพาน

การก่อสร้างช่วงสะพานทางวิ่งโดยใช้ชิ้นส่วนสำเร็จแบบคานรูปกล่องหลายชิ้นมาต่อกันจนเป็นทางวิ่งยกระดับนั้น ต้องใช้เครื่องจักรกลดังรูปที่ 1 ช่วยในการติดตั้ง กล่าวคือ เมื่อติดตั้งชิ้นส่วนของช่วงสะพานทางวิ่งปัจจุบันเสร็จแล้ว เครื่องจักรนี้จะเคลื่อนไปข้างหน้าเพื่อติดตั้งชิ้นส่วนในช่วงต่อ ๆ ไปได้

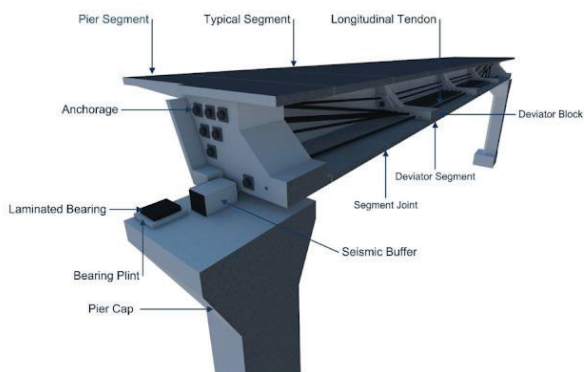


รูปที่ 1 เครื่องจักรติดตั้งแบบ Launching gantry

เครื่องจักรนี้ประกอบด้วยรอกที่ใช้ยกชิ้นส่วนสำเร็จรูปกล่องแต่ละชั้นจากด้านล่างขึ้นมาเรียงต่อกันตามระดับความสูงที่กำหนดในแบบจนเต็มตลอดความยาวของช่วงสะพานทางวิ่งพอดี จากนั้นจึงทำการอัดแรง (Post tension) ให้คอนกรีตด้วยการร้อยเส้นลวดอัดแรง (PC strand) ผ่านชิ้นส่วนทุกชั้น แล้วดึงที่ปลายอีกด้านเพื่อให้เส้นลวดยืดออก

2.2 ประเภทของชิ้นส่วนคานรูปกล่องที่ใช้ในการติดตั้ง

โครงสร้างของสะพานทางวิ่งรถไฟฟ้าสายสีเขียวนี้ก่อสร้างโดยใช้ชิ้นส่วนสำเร็จแบบรูปกล่องกลวงมาเรียงต่อกันไปตลอดความยาวของช่วงเสา แล้วใช้ลวดอัดแรง (Tendon) ร้อยชิ้นส่วนทั้งหมดเพื่อยึดเข้าหากัน รูปที่ 2 แสดงองค์ประกอบของสะพานทางวิ่งรถไฟฟ้า [2, 3]



รูปที่ 2 องค์ประกอบของสะพานทางวิ่งรถไฟฟ้า

ชิ้นส่วนสำเร็จของคานรูปกล่องที่ใช้ติดตั้งเป็นสะพานทางวิ่งนี้ มีรูปแบบที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งซึ่งจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้



รูปที่ 3 ชิ้นส่วน Pier segment

1. ชิ้นส่วนรับแรงที่ถ่ายมาจากลวดอัดแรง (Pier segment) มีลักษณะเป็นชิ้นส่วนที่ตันกว่าชิ้นอื่นดังรูปที่ 3 ชิ้นส่วนนี้ใช้วางอยู่ที่หัวเสาทั้งสองข้างของช่วงสะพาน

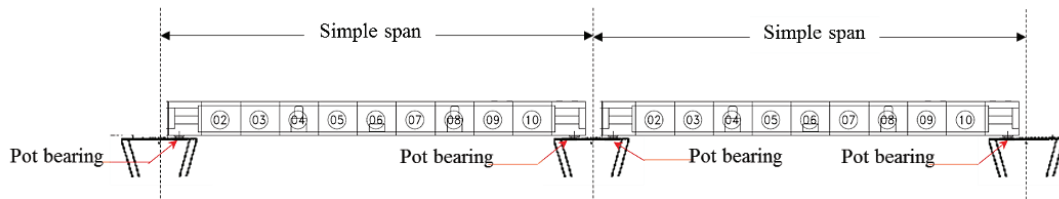


รูปที่ 4 ชิ้นส่วน Deviator segment

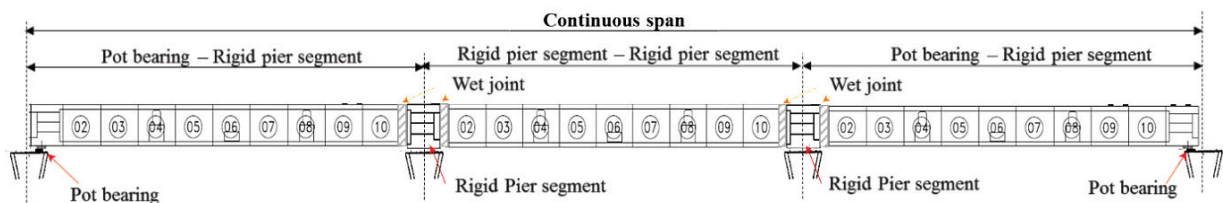
2. ชิ้นส่วนสร้างแรงยกตัว (Deviator segment) มีลักษณะเป็นชิ้นส่วนกลางที่เสริมคานไว้ตรงกลางดังรูปที่ 4 ชิ้นส่วนนี้ใช้เพื่อบังคับทิศทางของการร้อยเส้นลวดอัดแรงให้ตรงตามการออกแบบ และช่วยให้เกิดแรงยกตัวของชิ้นส่วนในขณะอัดแรง



รูปที่ 5 ชิ้นส่วน Standard segment



รูปที่ 6 สะพานทางวิ่งแบบช่วงเดียว (Simple span)



รูปที่ 7 สะพานทางวิ่งแบบช่วงเสาต่อเนื่องกันมากกว่าหนึ่งช่วง (Continuous span)

3. ชิ้นส่วนมาตรฐาน (Standard segment) มีลักษณะเป็นชิ้นส่วนกลางตรงกลางที่ใช้คอนกรีตและเหล็กเสริมในปริมาณน้อยที่สุดดังรูปที่ 5 โดยชิ้นส่วนนี้จะวางอยู่ระหว่างชิ้นส่วน Pier segment และ Deviator segment

2.3 วิธีการติดตั้งสะพานทางวิ่งด้วย Launching gantry

การติดตั้งสะพานทางวิ่งแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ การติดตั้งแบบช่วงสะพานเดี่ยว (Simple span) ดังรูปที่ 6 และการติดตั้งแบบต่อเนื่องกัน 3 ช่วงเสา (Continuous span) ดังรูปที่ 7 ทั้งนี้ถ้าหากมองในแง่ของกระบวนการปฏิบัติงาน การติดตั้งแบบต่อเนื่องกัน 3 ช่วงเสาจะมีกระบวนการที่ซับซ้อนกว่า และมีประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกมากกว่าแบบช่วงเดี่ยว [4]

2.4 ส่วนประกอบของเครื่องจักร Launching gantry และกระบวนการที่เกี่ยวข้อง

เครื่องจักรกลนี้มีชิ้นส่วนประกอบที่สำคัญจำนวน 10 ชิ้น [5] ดังรูปที่ 8 และอีก 3 กระบวนการที่เกี่ยวข้องแต่ละขั้นของเครื่องจักรทำหน้าที่ ดังนี้

1. ฐานรองรับน้ำหนัก (Support) ใช้เพื่อรับ Main truss โดยมีอยู่ 3 ตัวจัดวางที่ด้านหน้า กลาง และหลัง ฐานรองรับน้ำหนักนี้สามารถเคลื่อนย้ายได้ด้วยรอกไฟฟ้า และยัดขึ้นหรือหกลงตามแนวดิ่งได้ด้วยระบบไฮดรอลิก

2. ฐานรองรับน้ำหนักชั่วคราว (Leg) ใช้สำหรับรับน้ำหนัก Main truss เช่นกัน แต่เป็นแบบชั่วคราวในช่วงเวลาเท่านั้น โดยมีอยู่ 2 ตัวที่ด้านหน้าและหลัง สามารถยัดหรือหกลงได้ด้วยระบบเกลียวหมุน

3. ชิ้นส่วนแบบโครงหักฉาก (Portal frame) ใช้ติดตั้งบนเสาที่มีจุดรองรับน้ำหนักแบบ Pot bearing เพื่อปรับระดับจากหัวเสาขึ้นมาให้อยู่ในระดับเดียวกันกับระดับของชิ้นส่วน Pier segment โดยเมื่อเลื่อนเครื่องจักรไปข้างหน้าแล้วจะทำให้ได้ระดับความสูงเท่ากัน

4. ค้ำยันหัวเสา (Pier bracket) ใช้เพื่อถ่าน้ำหนักชั่วคราวของปลาย Main truss ผ่านขาค้ำยันในขณะที่ Main truss มีการยื่นปลายด้านหนึ่งออกไปข้างหน้ามาก

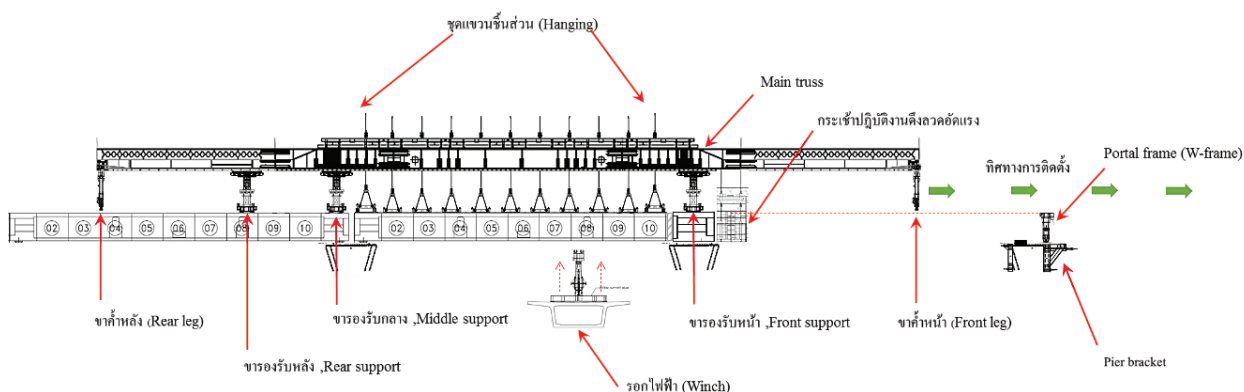
5. รอกไฟฟ้า (Winch) ควบคุมการสั่งงานด้วยรีโมท ใช้สำหรับยกชิ้นส่วนคานขึ้นมาอยู่ในระดับการติดตั้งและเลื่อนชิ้นส่วนให้เข้าชิดติดกันตามตำแหน่งที่ระบุในแบบ

6. ชุดแขวนชิ้นส่วนสำเร็จ (Hanging) ประกอบด้วยเส้นลวดสลิงขนาดใหญ่ที่ใช้สำหรับแขวนชิ้นส่วนสำเร็จทั้งหมดให้ลอยอยู่ในระดับที่ต้องการติดตั้ง

7. กระบวนการตรวจวัดงานสำรวจ (Survey) เมื่อแขวนชิ้นส่วนสำเร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้วตลอดทั้งช่วงสะพานแล้ว ต้องทำการสอบวัดค่าระดับและแนวอย่างละเอียดอีกครั้งด้วยการยึดฐานรองรับหลักขึ้นหรือลงเพื่อปรับระดับของช่วงสะพานขึ้นหรือลง และปรับระนาบของ

ชิ้นส่วนทั้งหมดให้ตรงตามแบบโดยการดึงด้วยรอกโซ่ที่หัวและท้ายเสาของช่วงสะพาน

8. กระบวนการเชื่อมรอยต่อ (Wet joint) ระหว่างชิ้นส่วนที่อยู่ชิดเสา กับชิ้นส่วน Pier segment ที่วางอยู่บนหัวเสา หลังจากปรับแนวและระดับของชิ้นส่วนทั้งหมดแล้ว จะทำให้เกิดช่องว่างซึ่งเป็นรอยต่อขนาด 10–20 เซนติเมตรที่บริเวณใกล้หัวเสา จึงต้องใช้ก้อนคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ทากาวอีพ็อกซีมาอัดแทรกลงในช่องว่างจำนวน 4 ตำแหน่งเพื่อดันชิ้นส่วนสำเร็จทั้งสองให้ตรงแนบและยึดติดกัน หลังจากออกแรงดึงลดเพียง 15% เสร็จแล้วจึงค่อยเทคอนกรีตปิดช่องว่างในภายหลังเพื่อเชื่อมสะพานทางวิ่งให้มีความต่อเนื่องกัน



รูปที่ 8 ส่วนประกอบของเครื่องจักรติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จ (Launching gantry)

2.5 ระบบการทำงานแบบเดิมในการติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จ

การติดตั้งชิ้นส่วนคานรูปกล่องเพื่อประกอบกันเป็นช่วงสะพานทางวิ่งโดยใช้เครื่องจักรติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จนั้น โดยปกติแล้วจะมีกระบวนการทำงานแบบวนซ้ำเดิม (Routine) ตลอดทุกช่วงเสาใน 1 วงรอบของการติดตั้งชิ้นส่วนคานรูปกล่อง จะประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนหลักดังแสดงในรูปที่ 9 นั่นคือขั้นตอนเตรียมการก่อนเคลื่อน Launching gantry (LG) ขั้นตอนเคลื่อน LG เข้าตำแหน่งติดตั้ง ขั้นตอนติดตั้งชิ้นส่วนคานรูปกล่องและขั้นตอนดึงลดอัดแรงรวมทั้งปรับแต่งระดับและแนว

ในการวิเคราะห์กระบวนการปฏิบัติงานดังรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่า ในกระบวนการที่ 1 นั้น เวลาเกือบทั้งหมดใช้ในการทำงานด้านการเตรียมงาน และการรื้ออุปกรณ์เพื่อ

9. การติดตั้งกระเช้าสำหรับงานดึงลดอัดแรง เนื่องจากการรื้อและดึงลดอัดแรงจะกระทำที่ช่วงปลายสะพานทางวิ่งซึ่งเป็นพื้นที่โล่งกลางอากาศ ดังนั้น กระเช้าจึงใช้เป็นอุปกรณ์เพื่อให้คนงานมีพื้นที่ยืนปฏิบัติงานดึงลดอัดแรงได้อย่างสะดวกและปลอดภัย

10. กระบวนการขนส่งอุปกรณ์ช่วยในการยกติดตั้งกลับคืนโรงงาน เมื่อกระบวนการติดตั้งเสร็จสิ้นแล้ว ต้องทำการปลดวัสดุอุปกรณ์ช่วยยกที่ติดมาพร้อมกับชิ้นส่วนสำเร็จส่งกลับคืนโรงงาน เพื่อจะได้นำไปใช้ติดตั้งเข้ากับชิ้นส่วนสำเร็จของช่วงเสาอื่นๆต่อไป

นำกลับมาใช้ซ้ำในการติดตั้งช่วงเสาถัดไป สำหรับกระบวนการที่ 2–4 โดยรวมแล้วมีขั้นตอนการทำงานที่เรียงต่อกันเป็นแบบลูกโซ่ จะมีเฉพาะบางขั้นตอนเท่านั้นที่จัดขั้นตอนทำงานแบบคู่ขนานกัน

ในการปฏิบัติงานได้กำหนดเป็น 2 ช่วงเวลา คือ กลางวันเวลา 08:00 - 17:00 น. และกะกลางคืนเวลา 20:00 - 05:00 น. ของวันถัดไป อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเวลาเฉลี่ยที่ใช้ทำงานใน 1 วัน ของระบบการทำงานแบบเดิมดังแสดงในตารางที่ 1 จะพบว่าไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ นั่นคือ กลางวันโดยส่วนใหญ่จะทำงานได้ไม่เต็มเวลา และมีถึง 2 กะ ที่ไม่สามารถทำงานได้ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการจัดเรียงขั้นตอนปฏิบัติงาน

ที่ไม่เหมาะสมทำให้ต้องรอกอยอันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านพื้นที่ทำงาน และด้านระเบียบการจราจร

ตารางที่ 1 เวลาเฉลี่ยของปฏิบัติงานในระบบเดิม

วันที่	กะกลางวัน	กะกลางคืน
1	08:00 - 11:11	20:00 - 00:57
2	เวลารอกอย	20:00 - 05:12
3	08:00 - 13:26	20:00 - 04:44
4	08:00 - 16:12	รออายุคอนกรีต
5	09:57 - 12:19	-

3. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงระบบการปฏิบัติงานติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จรูปของทางวิ่งรถไฟฟ้าสายสีเขียวให้มีประสิทธิภาพ โดยมุ่งที่การลดระยะเวลาและต้นทุนการก่อสร้าง ขั้นตอนการวิจัยมีดังนี้

1) ทำการบันทึกข้อมูลด้านการปฏิบัติงานของการติดตั้งชิ้นส่วนคานรูปกล่องด้วยระบบการทำงานแบบเดิมจำนวน 6 ช่วงเสา ได้แก่ เวลา จำนวนแรงงาน และเครื่องจักรที่ใช้ในการทำงานของแต่ละขั้นตอน จากนั้นจึงคำนวณหาเวลาและต้นทุนเฉลี่ยในการปฏิบัติงานเพื่อใช้เป็นฐานในการวัดประสิทธิภาพการทำงาน

2) รวบรวมขั้นตอนปฏิบัติงานของระบบการทำงานแบบเดิมทั้งหมด 35 ขั้นตอนตามรูปที่ 9 รวมทั้งสำรวจปัจจัยและอุปสรรคที่ทำให้งานขาดประสิทธิภาพ เพื่อนำไปปรับปรุงและออกแบบระบบการทำงานแบบใหม่ให้มีประสิทธิภาพ

3) นำปัจจัยและอุปสรรคที่รวบรวมได้ไปสัมภาษณ์ผู้ชำนาญการที่เกี่ยวข้องในงานติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จจำนวน 15 คนเพื่อคัดเลือกเอาเฉพาะปัจจัยสำคัญหลักที่ทำให้งานขาดประสิทธิภาพ พร้อมทั้งให้ระบุแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของงาน [5]

4) นำข้อมูลด้านกระบวนการปฏิบัติงานและระยะเวลาทำงานจากขั้นตอนที่ 1) – 3) มาใช้ออกแบบระบบการทำงานรูปแบบใหม่โดยคำนึงถึงสายงานวิกฤต

5) นำระบบการทำงานแบบใหม่ไปทดสอบการใช้งานจริง พร้อมทั้งเก็บรวบรวมข้อมูลการปฏิบัติงานด้านเวลาและค่าใช้จ่ายเช่นเดียวกันกับขั้นตอนที่ 1)

6) เปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านเวลาและต้นทุนระหว่างระบบการติดตั้งแบบเดิมและแบบใหม่ โดยคิดเฉพาะต้นทุนทางตรงด้านแรงงาน และเครื่องจักร ทั้งนี้ไม่รวมต้นทุนทางตรงด้านวัสดุ เนื่องจากมีปริมาณการใช้งานเท่าเดิมไม่ว่าจะทำงานในช่วงเวลาใดก็ตาม และไม่รวมต้นทุนทางอ้อมเพราะเป็นค่าใช้จ่ายซึ่งคำนวณเป็นตัวเลขที่แน่นอนได้ค่อนข้างยาก

4. ผลการศึกษา

การวิจัยเพื่อทำการปรับปรุงกระบวนการสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานด้านเวลา และต้นทุนในการก่อสร้างสะพานทางวิ่งรถไฟฟ้าโดยใช้ชิ้นส่วนสำเร็จแบบคานรูปกล่องนั้น ผลการศึกษามีดังนี้

4.1 การปรับปรุงกระบวนการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

ผลการปรับปรุงระบบการติดตั้งชิ้นส่วนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน โดยแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการหลัก 35 ขั้นตอนย่อย ดังต่อไปนี้

กระบวนการที่ 1 การเตรียมงานก่อนการเลื่อน Launching gantry ในขั้นตอนการติดตั้ง Pier bracket นั้น ได้แก่ ไขสลักที่ผิวดินโดยเปลี่ยนให้ตรงตามขนาดที่ใช้งานจริง สำหรับขั้นตอนการติดตั้ง Portal frame พบว่าอุปกรณ์ยึดชิ้นส่วน (Tie down) ให้ติดกับหัวเสาหมักจะหลุดจมไปในระหว่างเทคอนกรีต จึงปรับแก้จากการผูกอุปกรณ์ไว้กับเหล็กเสริมเป็นการเชื่อมติดกับเหล็กเสริมแทน ส่วนในขั้นตอนการส่งอุปกรณ์กลับคืนโรงงาน พบว่ามีการยกอุปกรณ์ลงมากองไว้ก่อน แล้วรอให้รถบรรทุกมาขนไปในภายหลัง ซึ่งทำให้เสียเวลาการทำงานซ้ำ จึงแก้ไขโดยจัดรถบรรทุกไว้ให้พร้อมที่หน้างานเพื่อจัดอุปกรณ์ขึ้นรถบรรทุกและส่งกลับคืนโรงงานได้ในทันที ในขั้นตอนการติดตั้งราวกันตกและการรื้อแบบ Wet joint มักถูกละเลยจนไม่มีอุปกรณ์ใช้งานในช่วงเสาถัดไป จึงได้

เพิ่มงานนี้เข้าไปเป็นขั้นตอนหนึ่งในระบบการทำงานแบบใหม่ด้วย

กระบวนการที่ 2 การเลื่อน Launching gantry เข้าตำแหน่งติดตั้ง ในกระบวนการนี้ประกอบไปด้วย 16 ขั้นตอน สำหรับขั้นตอนที่ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพ คือ ขั้นตอนการล้างค้ำหลัง และการขึ้นขา ค้ำหลัง ซึ่งสูญเสียเวลาในการตรวจสอบการคลายตัวของนอตทุกครั้งด้วยการใช้ประแจขันนอตทุกตัวให้แน่น จึงปรับปรุงโดยใช้ปากกาสี ชีดแสดงตำแหน่งที่นอตขันแน่นไว้ ทำให้สามารถตรวจสอบเฉพาะนอตที่คลายตัวได้รวดเร็วขึ้น ในขั้นตอนการถอดกระเช้าดึงลวดอัดแรงนั้น พบว่า ชิ้นส่วนบนและล่างของกระเช้าที่ยึดไว้ด้วยสลิงมักแยกตัวออกจากกันในขณะที่ทำการถอด ทำให้ต้องเสียเวลานาน จึงทำการเปลี่ยนโดยใช้รอกโซ่มือแทน เพื่อช่วยบีบให้ชิ้นส่วนกระเช้าบนและล่างประกบชิดติดกัน สำหรับขั้นตอนการปลดขาค้ำหน้า และขั้นตอนติดตั้งขาค้ำหน้านั้น พบว่าสลักเหล็กเส้น PT bar มักโก่งงอง่าย ทำให้เสียเวลาในการเปลี่ยนอันใหม่ จึงปรับปรุงโดยเปลี่ยนไปใช้สลักเหล็กหล่อซึ่งมีคุณสมบัติที่ทนทานกว่า และในขั้นตอนการย้ายขารองรับ มักประสบปัญหาเรื่องลวดสลิงชุดแขวนชิ้นส่วนเกี่ยวพันกับขารองรับ จึงปรับปรุงโดยเชื่อมเหล็กเส้นไว้รอบขารองรับเพื่อใช้เป็นเครื่องนำทางในการดึงลวดสลิง อันช่วยลดการเสียเวลาในการยกหรือดึงลวดสลิงหลบขารองรับ

กระบวนการที่ 3 การติดตั้งชิ้นส่วน Segment จากการศึกษาพบว่า ระยะช่วงเสามีความยาวที่แตกต่างกัน ทำให้ต้องปรับเลื่อนตำแหน่งตะขอสำหรับแขวนกระเช้าดึงลวดอัดแรงใหม่ทุกครั้ง จึงปรับปรุงโดยกำหนดตำแหน่งตะขอที่ตายตัวแล้วใช้วิธีการเลื่อนขยับ Main truss ให้พอเหมาะกับความยาวของช่วงเสาแทน โดยอยู่ในระยะที่รับน้ำหนักได้อย่างปลอดภัย สำหรับขั้นตอนติดตั้ง Segment มักพบกับปัญหาการแตกบิ่นของขอบชิ้นงาน ทำให้เสียเวลาและค่าซ่อมแซม จึงแก้ไขโดยใช้หมอนไม้รองชิ้นส่วนไม่ให้กระแทกกันเองในขณะที่ติดตั้ง

กระบวนการที่ 4 การปฏิบัติงานหลังการติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จ ในขั้นตอนการเชื่อมรอยต่อ (Wet joint) พบว่า ช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จตรงบริเวณหัวเสามีขนาดไม่ที่แน่นอน ทำให้ต้องเสียเวลาค้นข้างมากในการตัดและเจียรก่อนลูกบาศก์คอนกรีตให้มีขนาดพอดีที่จะนำมาใช้อัดแทรกลงในช่องว่าง จึงได้ทำการแก้ไขเพื่อลดเวลาทำงานโดยหล่อก้อนคอนกรีตที่มีขนาดเริ่มตั้งแต่ 10 ซม. แล้วค่อย ๆ เพิ่มความกว้างขึ้นครั้งละ 1 ซม. จนถึงขนาด 20 ซม. เพื่อให้พร้อมใช้งานได้ทันทีกับขนาดความกว้างของช่องว่าง ในขั้นตอนการดึงลวดอัดแรง มีการตัดแปลงชิ้นส่วน Portal frame ใหม่ เพื่อไม่ให้ชิดติดกับกระบอกไฮดรอลิกดึงลวดอัดแรงและเพิ่มรางเลื่อนแนวระนาบเพื่อให้การโยกกระบอกไปยังตำแหน่งดึงใหม่ทำได้ง่าย ใช้เวลาลดลง

4.2 การปรับปรุงระบบการติดตั้งชิ้นส่วน Segment Box Girder โดยวิธีสายงานวิกฤต

จากผลวิเคราะห์อุปสรรคในกระบวนการติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จจากรูปกล่องด้วยระบบการทำงานแบบเดิม ซึ่งประกอบไปด้วย 35 ขั้นตอน ดังรูปที่ 9 นั้น เมื่อได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของแต่ละขั้นตอนการทำงานตามหัวข้อที่ 4.1 แล้ว ได้ทำการออกแบบระบบการทำงานรูปแบบใหม่ดังรูปที่ 10 โดยปรับเปลี่ยนขั้นตอนการปฏิบัติงานให้มีการทำงานถ่วงน้ำหนักเพิ่มขึ้น พร้อมทั้งคำนึงถึงสายงานวิกฤต จะเห็นได้ว่าในระบบการทำงานแบบใหม่มีการออกแบบดังนี้

- 1) ปรับแผนโดยให้เริ่มงานวันแรกในช่วงกะกลางคืนซึ่งเป็นงานยากของคนที่สูงที่ต้องปิดกั้นการจราจร
- 2) ปรับเปลี่ยนขั้นตอนเตรียมการก่อนเลื่อน Launching gantry ของกระบวนการที่ 1 ในระบบการทำงานแบบเดิม ดังรูปที่ 9 ไปดำเนินการในช่วงที่ต้องหยุดรอกคอย นั่นคือปรับเปลี่ยนขั้นตอนการติดตั้ง Pier bracket และการติดตั้ง Portal frame ไปทำในกะกลางคืนที่ 3 ดังรูปที่ 10 ซึ่งเป็นช่วงที่ว่างงาน เพราะต้องรอกคอนกรีตให้ได้อายุก่อนที่จะดำเนินการในขั้นตอนหลักอื่น ๆ ต่อไปได้

3) ปรับเปลี่ยนขั้นตอน การติดตั้งราวกันตก และการ รื้อถอนแบบ Wet joint ไปดำเนินการควบคู่กับขั้นตอน การดึงลวดอัดแรง

4) จัดให้มีการทำงานคู่ขนานเพิ่มขึ้นจากระบบเดิมมี 6 ขั้นตอนเป็น 10 ขั้นตอนในระบบใหม่

5) สำหรับขั้นตอนปฏิบัติงานหลักซึ่งไม่สามารถข้าม ขั้นตอนได้ยังคงจัดทำแบบเรียงลำดับเช่นเดิม

ผลจากการจัดเรียงขั้นตอนการทำงานในระบบการทำงานรูปแบบใหม่ จะเห็นได้ว่าขั้นตอนปฏิบัติงานในสายงาน วิกฤตลดลงจาก 32 ขั้นตอนเหลือเพียง 27 ขั้นตอน โดยมี ขั้นตอนที่ทำควบคู่กันไปได้ 10 ขั้นตอน ซึ่งส่งผลให้ แผนการทำงานที่ต้องใช้เวลา 4.5 วัน (9 กะทำงาน) ในระบบเดิมลดลงเหลือ 3 วัน (6 กะทำงาน) ในระบบใหม่

4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านเวลาระหว่างระบบการทำงานแบบเดิม กับระบบการทำงานแบบใหม่

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางด้านเวลาในการ ติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จของทางวิ่งรถไฟฟ้าแบบช่วงต่อเนื่อง ระหว่างระบบการติดตั้งแบบเดิมกับรูปแบบใหม่นั้น ค่าเวลาเฉลี่ยในการทำงานของแต่ละขั้นตอนได้แสดง ดังตารางที่ 2

เมื่อพิจารณาตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการ ปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละขั้นตอน และการ ปรับเปลี่ยนขั้นตอนการปฏิบัติงานดังที่ได้กล่าวมาแล้วใน หัวข้อที่ 4.1 - 4.2 ส่งผลให้กระบวนการติดตั้งชิ้นส่วนด้วย ระบบการทำงานแบบใหม่มีระยะเวลาเฉลี่ยลดลง ในเกือบทุกขั้นตอน เมื่อพิจารณาเวลาในการทำงานจนจบ ทุกขั้นตอนพบว่า ระบบการทำงานรูปแบบใหม่สามารถ ลดเวลาในการทำงานลงได้โดยเฉลี่ย 894 นาที หรือ ร้อยละ 25.76 ต่อการติดตั้งหนึ่งช่วงเสา อย่างไรก็ตามหาก คิดเวลาในการทำงานทั้งโครงการซึ่งมีการติดตั้งชิ้นส่วน ทั้งหมด 345 ช่วงเสาแล้ว ระบบการทำงานแบบใหม่ จะสามารถลดเวลาการทำงานลงได้ถึง 321 วัน หรือ ประมาณ 10.71 เดือน

4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านต้นทุนระหว่างระบบการทำงานแบบใหม่ กับระบบการทำงานแบบเดิม

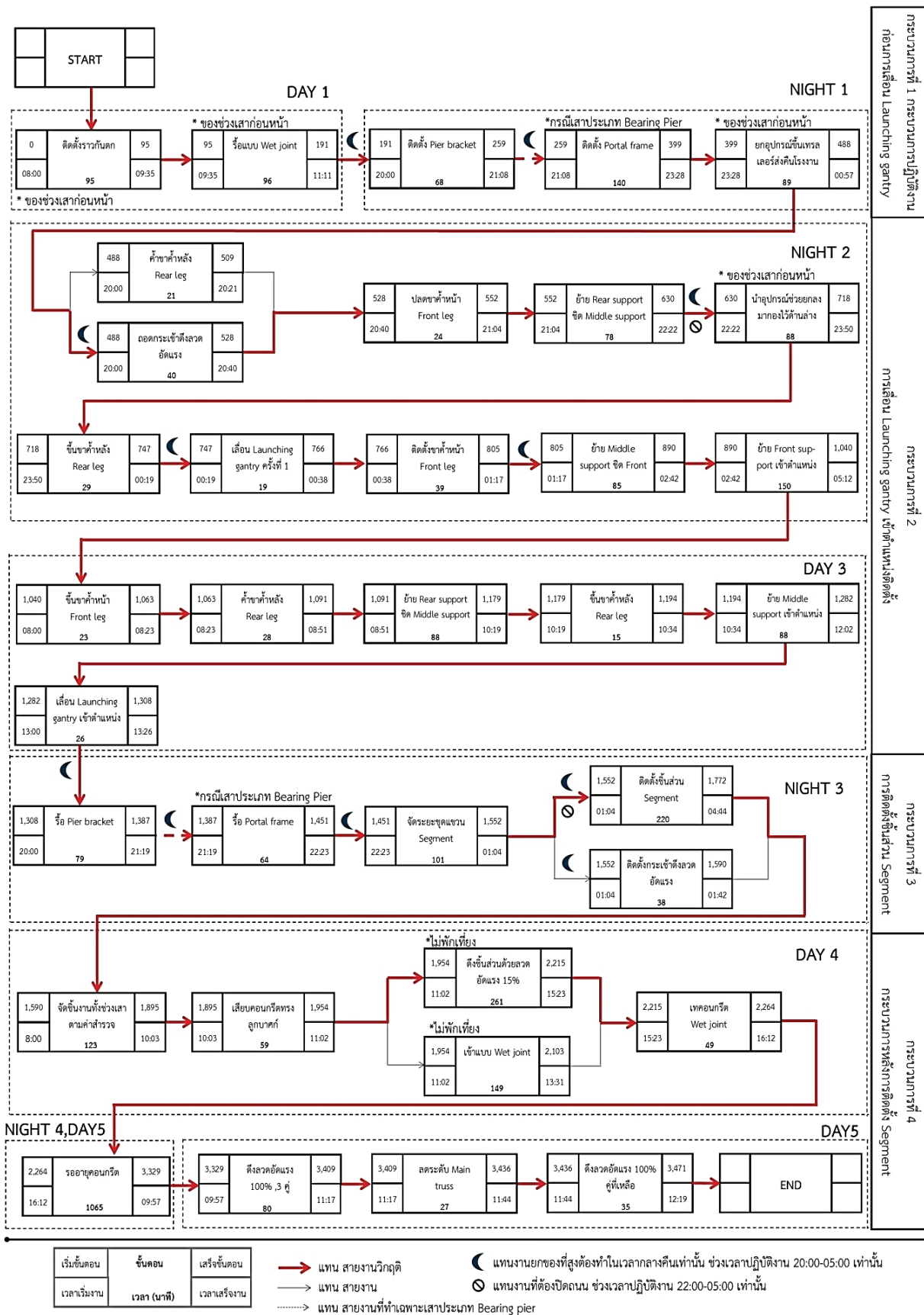
ผลการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทางตรงในการติดตั้ง ชิ้นส่วนคานารูปกล่องของทางวิ่งรถไฟฟ้า ซึ่งคิดเฉพาะ ค่าแรงและค่าเครื่องจักร จากระบบการทำงานทั้ง 2 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 3 นั้น พบว่าในระบบการติดตั้งรูปแบบ ใหม่มีต้นทุนลดลงทั้ง 3 รายการเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ ระบบการทำงานแบบเดิม นั่นคือระบบการติดตั้งแบบใหม่มี ประสิทธิภาพในการลดต้นทุนรวมลงได้โดยเฉลี่ยเท่ากับ 9,893.29 บาท หรือร้อยละ 24.43 ต่อหนึ่งช่วงเสา ใน ทำนองเดียวกันหากพิจารณาการติดตั้งตลอดทั้งโครงการซึ่ง มีทั้งหมด 345 ช่วงเสาแล้ว การปฏิบัติงานด้วยระบบใหม่ จะสามารถลดต้นทุนค่าแรงงานและค่าเครื่องจักรลงได้ มากกว่า 3.4 ล้านบาท

5. สรุปผลการศึกษา

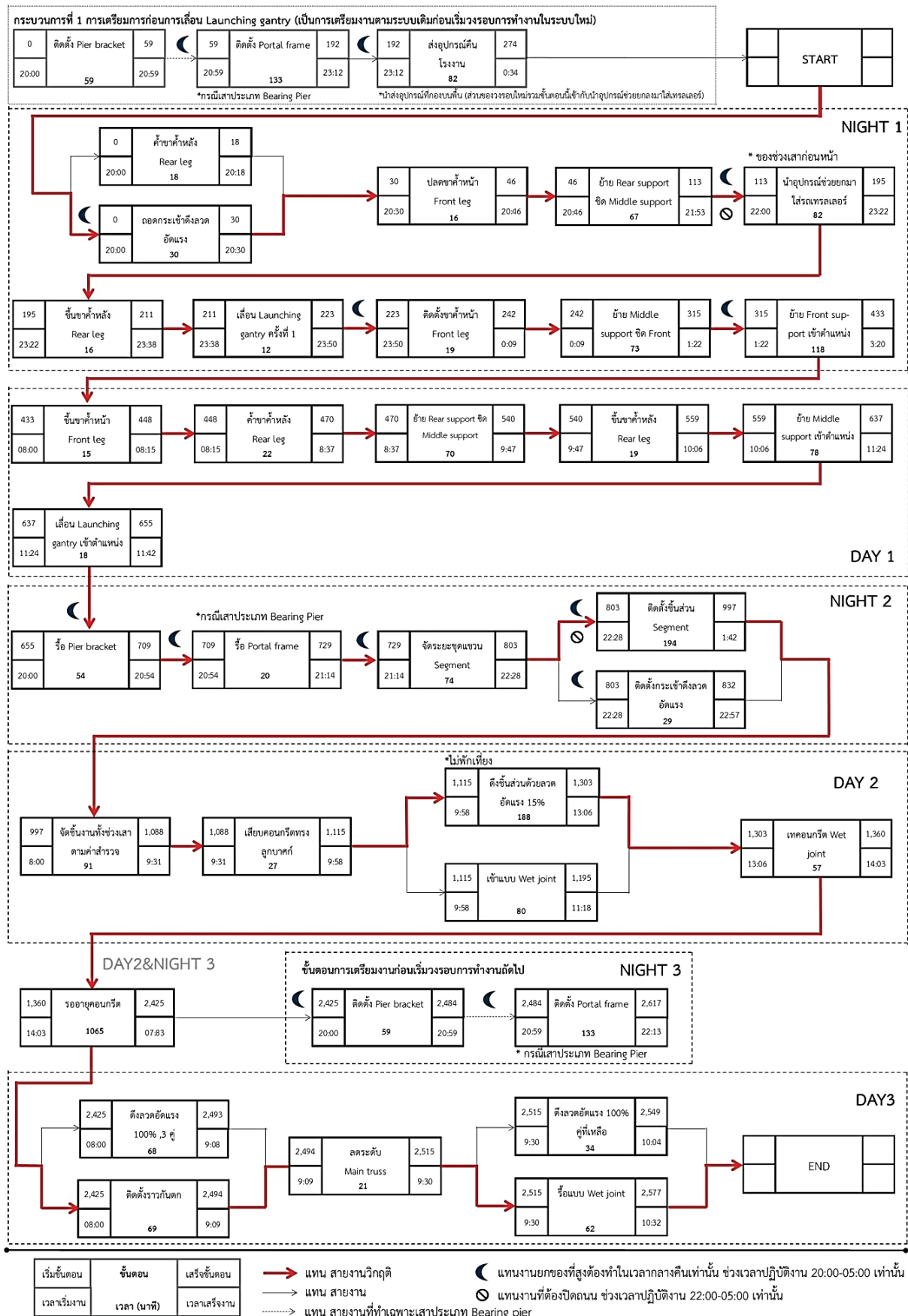
การศึกษาวิจัยเรื่อง การปรับปรุงกระบวนการก่อสร้าง ในงานติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จของโครงการรถไฟฟ้าสาย สีเขียว (ส่วนเหนือ) มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาปัจจัยต่าง ๆ ในแต่ละกระบวนการติดตั้งที่ทำให้เกิดการสูญเสียเวลา และค่าใช้จ่าย แล้วนำปัญหาเหล่านั้นไปทำการปรับปรุง กระบวนการทำงานประสิทธิภาพ พร้อมจัดเรียงขั้นตอน ปฏิบัติงานเพื่อให้ได้กระบวนการทำงานรูปแบบใหม่ จากนั้นจึง ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่างระบบ ทั้งสองทั้งทางด้านเวลาและต้นทุนการติดตั้ง

ผลการศึกษาพบว่า ในการจัดเรียงขั้นตอนการทำงาน ของระบบการทำงานรูปแบบใหม่ทำให้ขั้นตอนปฏิบัติงาน ในสายงานวิกฤตลดลงเหลือเพียง 27 ขั้นตอนจากทั้งหมด 32 ขั้นตอนในระบบการทำงานแบบเดิม และมีขั้นตอนที่ ทำงานควบคู่กันได้ 10 ขั้นตอน ซึ่งส่งผลให้แผนการทำงาน ที่ต้องใช้เวลา 4.5 วัน (9 กะทำงาน) ในระบบเดิม ลดลง เหลือ 3 วัน (6 กะทำงาน) ในระบบใหม่

ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่าง ระบบใหม่กับระบบเดิม พบว่ากระบวนการทำงาน แบบใหม่สามารถลดเวลาปฏิบัติงานจากระบบเดิมลงได้ 894 นาที หรือร้อยละ 25.76 และต้นทุนลงได้ 9,893.29 บาท หรือร้อยละ 24.43 ต่อหนึ่งช่วงเสา ตามลำดับ



รูปที่ 9 กระบวนการติดตั้งชิ้นส่วนด้วยระบบการทำงานแบบเดิม



รูปที่ 10 กระบวนการติดตั้งชิ้นส่วนด้วยระบบการทำงานแบบใหม่

ตารางที่ 2 ระยะเวลาเฉลี่ยในการปฏิบัติงานของระบบการทำงานแบบใหม่เปรียบเทียบกับแบบเดิม

ลำดับ	กระบวนการ	ระยะเวลาเฉลี่ย (นาที)		ระยะเวลาที่ลดลง	
		กระบวนการเดิม	กระบวนการรูปแบบใหม่	หน่วย (นาที)	หน่วย (ร้อยละ)
1	ติดตั้ง Pier bracket	68	59**	9	13.24
2	ติดตั้ง Portal frame	140	133**	7	5.00
3	ส่งอุปกรณ์ขึ้นโรงงาน	89	82	7	7.87
4	ติดตั้งราวกันตก	95	69	26	27.37
5	รื้อแบบ Wet joint	96	62	34	35.42
6	ล้างค้ำหลัง	21**	18**	3	14.29
7	ถอดกระเช้าดึงลวดอัดแรง	40	30	10	25.00
8	ปลดขาค้ำหน้า Front leg	24	16	8	33.33
9	ย้าย Rear support ชิด Middle support	78	67	11	14.10
10	นำอุปกรณ์ช่วยยกลงมากองไว้ด้านล่าง	88	-	88	100.00
11	ขึ้นขาค้ำหลัง Rear leg	29	16	13	44.83
12	เลื่อน Launching gantry ครั้งที่ 1	19	12	7	36.84
13	ติดตั้งขาค้ำหน้า Front leg	39	19	20	51.28
14	ย้าย Middle support ชิด Front support	85	73	12	14.12
15	ย้าย Front support เข้าตำแหน่ง	150	118	32	21.33
16	ขึ้นขาค้ำหน้า Front leg	23	15	8	34.78
17	ล้างค้ำหลัง Rear leg	28	22	6	21.43
18	ย้าย Rear support ชิด Middle support	88	70	18	20.45
19	ขึ้นขาค้ำหลัง Rear leg	15	19	-4	-26.67
20	ย้าย Middle support เข้าตำแหน่ง	88	78	10	11.36
21	เลื่อน Launching gantry เข้าตำแหน่ง	26	18	8	30.77
22	รื้อ Pier bracket	79	54	25	31.65
23	รื้อ Portal frame	64	20	44	68.75
24	จัดระยะชุดแขวน Segment	101	74	27	26.73
25	ติดตั้งกระเช้าดึงลวดอัดแรง	38**	29**	9	23.68
26	ติดตั้งชิ้นส่วน Segment	220	194	26	11.82
27	จัดชิ้นส่วนตลอดช่วงเสาตามค่างานสำรวจ	123	91	32	26.02
28	การอัดแทรกก้อนลูกบาศก์คอนกรีต	59	27	32	54.24
29	เข้าแบบ Wet joint	149**	80**	69	46.31
30	ดึงชิ้นส่วนด้วยลวดอัดแรง 15%	261	188	73	27.97
31	เทคอนกรีต Wet joint	49	57	-8	-16.33
32	รื้ออายุคอนกรีต	1,065	1,065	0	0

ตารางที่ 2 (ต่อ) ระยะเวลาเฉลี่ยในการปฏิบัติงานของระบบการทำงานแบบใหม่เปรียบเทียบกับแบบเดิม

ลำดับ	กระบวนการ	ระยะเวลาเฉลี่ย (นาที)		ระยะเวลาที่ลดลง	
		กระบวนการเดิม	กระบวนการรูปแบบใหม่	หน่วย (นาที)	หน่วย (ร้อยละ)
33	ดึงลวดอัดแรง 100% จำนวน 3 คู่	80	68**	12	15
34	ลดระดับ Main truss	27	21	6	22.22
35	ดึงลวดอัดแรง 100% จนครบตามจำนวน	35	34**	1	2.86
รวมเวลาในสายงานวิกฤต (นาที)		3,471	2,577	894 นาที หรือ 25.76%	

หมายเหตุ: ** = ขั้นตอนที่ไม่อยู่ในสายงานวิกฤต

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบต้นทุนทางตรงในการปฏิบัติงานระหว่างระบบการทำงานแบบใหม่กับระบบการทำงานแบบเดิม

ลำดับ	ประเภทต้นทุน	จำนวนเงิน (บาท)			ต้นทุนที่ลดลง (ร้อยละ)
		ระบบการติดตั้งแบบเดิม	ระบบการติดตั้งแบบใหม่	ต้นทุนที่ลดลง	
1	ต้นทุนแรงงาน - รายเดือน	43,734.41	31,962.67	11,771.74	26.92
2	ต้นทุนแรงงาน - รายวัน	124,636.91	93,930.84	30,706.07	24.64
3	ต้นทุนเครื่องจักร	74,591.67	57,709.72	16,881.95	22.63
รวมเป็นเงินต่อ 6 ช่วงเสา (บาท)		242,962.99	183,603.23	59,359.76	24.43
เฉลี่ยต่อ 1 ช่วงเสา (บาท)		40,493.83	30,600.54	9,893.29	24.43

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง “การปรับปรุงกระบวนการก่อสร้างในงานติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จของโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายสีเขียว (ส่วนเหนือ)” ผู้จัดทำขอขอบคุณโครงการหลักสูตรนวัตกรรมทางวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมศาสตร์และการจัดการธุรกิจ ที่ได้เปิดสอนหลักสูตรที่มีคุณค่าต่อการศึกษ

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.จรงค์ ผลิตประเสริฐ ที่คอยให้ข้อเสนอ รวมทั้งคำแนะนำงานวิจัยเรื่องนี้ตลอดมา

ขอขอบพระคุณ บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวล๊อปเม้นต์ จำกัด (มหาชน) บุคลากรหน่วยงานสะพาน ที่ได้มอบโอกาสในการทำงาน และมอบความรู้จนกระทั่งการศึกษาค้นคว้างานวิจัยนี้บรรลุผลสำเร็จ

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อย่างสูงที่คอยสนับสนุนด้านกำลังใจ อีกทั้งยังเป็นกำลังใจที่สำคัญ และพี่ ๆ เพื่อน ๆ ในสาขาวิชาที่ได้คอยช่วยเหลือด้านความรู้ คอยแนะนำตักเตือนตลอดจนการให้กำลังใจที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้หวังว่างานวิจัยนี้จะประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจได้นำไปประยุกต์ใช้เพื่อให้งานของท่านช่วยพัฒนาองค์ความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อวงการวิศวกรรมของประเทศต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงคมนาคม. ยุทธศาสตร์โครงสร้างพื้นฐานด้านการคมนาคมขนส่งของไทย พ.ศ. 2558-2565. 2560; [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: https://www.mot.go.th/file_upload/.../InfrastructureOpportunities_under_Thailand_4.0.pdf
- [2] สรกฤตย์ พันธมนตรี. การผลิตและติดตั้งชิ้นส่วนสะพานคอนกรีตสำเร็จรูปชนิดกล่อง (Casting and Erection of Viaduct Segmental Boxes Girder). 2527; [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://www.mckeller.co.th/knowledge-and-experience/casting-and-erection-of-viaduct-segmental-boxes-girder>
- [3] Superstructure Railway of Bangkok. องค์ความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างรองรับทางวิ่งยกระดับทั้งระบบขนส่งทางราง. 2560; [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: https://kmrailways.blogspot.com/2017/06/blog-post_1.html
- [4] Segmental Concrete Bridge Construction. NBM Media Pvt. Ltd., New Delhi, INDIA, 2014; [Online] available: <https://www.nbmcw.com/tech-articles/bridges/290-segmental-concrete-bridge-construction.html>
- [5] The Components of Bridge Girder Launcher. Zhengzhou Huazhong Construction Machinery Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, China, 2014; [Online] available: <https://zzhz.com/News/doc820.html>



การจำลองลักษณะของฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้วิธีวิเคราะห์อนุภาค ไม่ต่อเนื่องร่วมกับการคำนวณพลศาสตร์ของไหล Simulation of a Fluidized Bed Characteristics using DEM-CFD Coupling

ปรีดา ปรากรณ์^{1,*} และ สาทพร วังฉาย²

Preeda Prakotmak^{1,*} and Sathaphon Wangchai²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

²ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Kasetsart University, Khamphengsean Campus, Nakhonpathom 73140

²Department of Materials Handling & Logistics Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

*E-mail: fengpdpr@ku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลแบบหลายสถานะร่วมกับการวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (CFD-DEM) เพื่อจำลองลักษณะของฟลูอิดไคซ์เบดและปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลกับอนุภาค การเคลื่อนที่ของอนุภาครูปทรงรีถูกอธิบายด้วยแบบจำลองแยกส่วนชนิดหนาแน่น (DDPM) บนพื้นฐานของกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันซึ่งนำมาประยุกต์ใช้กับอนุภาคแต่ละตัว ส่วนการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องของของไหลในแต่ละตำแหน่งอธิบายด้วยสมการนาเวียร์-สโตกส์ ในแบบจำลองนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของความเร็วอากาศขาเข้าที่มีต่อการเคลื่อนที่และการชนกันของอนุภาค โดยการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละตัวขึ้นอยู่กับแรงสัมผัสระหว่างอนุภาคและแรงของอากาศที่กระทำต่ออนุภาค ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคซ์เซชันมีค่าเท่ากับ 1.65 m s^{-1} และความดันตกคร่อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนอนุภาคในเบด ความเร็วของอากาศที่สูงขึ้นทำให้เกิดโพรงอากาศขนาดใหญ่ทั่วทั้งเบดและทำให้อัตราการผสมกันของอนุภาคสูงขึ้นอีกด้วย หลังจาก 2 s ของการเกิดฟลูอิดไคซ์เซชันอนุภาคมีการผสมกันอย่างทั่วถึง ข้อสังเกตเหล่านี้ช่วยให้เกิดความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเบดระหว่างการเกิดฟลูอิดไคซ์เซชัน

คำสำคัญ: พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง, ฟลูอิดไคซ์เบด, การไหลหลายสถานะ

ABSTRACT

This paper presents a coupled multiphase computational fluid dynamics and discrete element method (CFD-DEM) approach to simulate the behavior of fluid-particle interactions and flow characteristics of fluidized bed. The motion of discrete particles with ellipsoidal particle is described by dense discrete particle model (DDPM) on the basis of Newton's laws of motion applied to individual particles and the flow of continuum fluid by the CFD based on the local averaged Navier-Stokes equations. The influence of inlet air velocity on the particle motion and collision behavior is investigated. Here, the motion of individual particle is based on the contact force between particles and

Received 15 August 2018

Revised 15 November 2018

Accepted 30 November 2018

the fluid force acting on the particles. Simulation results showed that minimum fluidization velocity was 1.65 m s^{-1} and pressure drops increased with increases in the number of particles. Higher superficial flow velocities gave rise to larger and more plentiful bubbles throughout the bed which led to higher rates of mixing. The particles were observed to be well-mixed after 2 s of fluidization. These observations have achieved a general understanding of phenomena which take place inside the bed during fluidization.

Keywords: CFD, DEM, Fluidized bed, Multiphase flow

1. บทนำ

การไหลแบบหลายสถานะ (Multi-phase flow) โดยมีอนุภาคร่วมอยู่ด้วยพบเห็นได้หลายรูปแบบ เช่น ฟลูอิดไชเซชัน [1, 2] สเปคตัมเบด [3] การชนถ่ายวัสดุ [4] การดักฝุ่น [5] และการเคลือบผลิตภัณฑ์ [6] ในอดีตที่ผ่านมาการศึกษาพลศาสตร์ของอนุภาคและของไหลเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมเคลื่อนที่ด้วยการทดลองทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายมาก นอกจากนี้การวัดค่าต่าง ๆ ในระหว่างการทดลองเป็นการรบกวนระบบทำให้ผลการทดลองมีความถูกต้องน้อยลง สำหรับกระบวนการฟลูอิดไชเซชันสองสถานะ (Two-phase fluidization) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการที่เม็ดของแข็งหรืออนุภาคสัมผัสกับของไหลแล้วทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปตามกระแสการไหลนั้นและประพัตต์ตัวคล้ายกับของไหล

แบบจำลองที่สามารถอธิบายปฏิสัมพันธ์ระหว่างของไหลและอนุภาคในขณะเกิดฟลูอิดไชเซชันคือ CFD-DEM ซึ่งสามารถวิเคราะห์ด้วยวิธีอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Element Method; DEM) ร่วมกับวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) โดยวิธี DEM ทำการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากกฎของนิวตันโดยพิจารณาถึงปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างอนุภาคกับอนุภาคและอนุภาคกับของไหล ส่วนการเคลื่อนที่ของของไหลนั้นจะใช้วิธี CFD เพื่อคำนวณอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับของไหล การเข้าใจพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถนำไปใช้ในการออกแบบห้องอบแห้งช่วยให้ทราบตำแหน่งจุดอับ (Dead zone) ที่เกิดฟลูอิดไชเซชันไม่ทั่วถึงช่วยทำให้ระยะเวลา (Residual time) ในการอบแห้ง

สั้นลง ในปัจจุบันนักวิจัยได้นำแบบจำลอง CFD-DEM มาศึกษาพฤติกรรมของการไหลแบบสองสถานะของก๊าซและของแข็งที่เกิดขึ้นภายในฟลูอิดไชเซชัน [7-9] นักวิจัยเหล่านั้นพบว่า ผลการจำลองการไหล การเกิดฟองอากาศ การผสมกันของอนุภาค ตลอดจนรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง นอกจากนี้การประยุกต์ใช้แบบจำลอง CFD-DEM มาทำนายพฤติกรรมของอนุภากระหว่างการเกิดฟลูอิดไชเซชันยังมีประโยชน์อย่างมากต่อการอุตสาหกรรม เช่น การอบแห้ง (Drying) [10] การผสม (Mixing) [11] การเคลือบผิวเม็ดยา (Tablet coating) [12] การชนกันของอนุภาค (Collision dynamics) [13] และการยึดเกาะกันของอนุภาคเปียก (Wet particle agglomerates) [14] เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษากระบวนการฟลูอิดไชเซชันด้วยวิธีวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) ร่วมกับวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล (CFD) โดยคำนวณหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไชเซชัน ความดันคร่อมเบด และดัชนีการผสมกันของอนุภาค

2. วัสดุและวิธีการทดลอง

2.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุและพารามิเตอร์ต่าง ๆ

พารามิเตอร์ ที่ใช้ในแบบจำลองแสดงในตารางที่ 1 โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

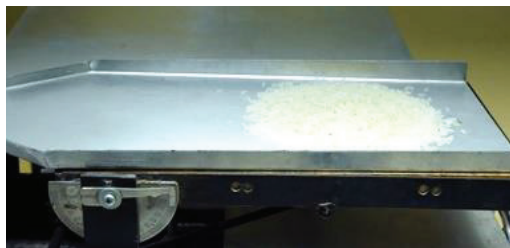
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต (Coefficient of static friction, μ_s) พิจารณาจากการนำวัสดุวางบนพื้นผิวระนาบของแผ่นที่ใส่ทำห้องอบแห้งดังรูปที่ 1(a) และปรับมุมเอียง (α) ของแผ่นระนาบเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่ง

วัสดุเริ่มการเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างทำการจดบันทึกค่ามุมที่อ่านได้จากสเกลและคำนวณโดยใช้สมการ

$$\mu_s = \tan^{-1}(\alpha) \quad (1)$$

มุมกองวัสดุ (Angle of repose) พิจารณาโดยการนำเมล็ดข้าวเทในแนวตั้งโดยให้เมล็ดข้าวเคลื่อนที่ตามธรรมชาติและกองบนพื้นระนาบที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 1(b) มุมกองวัสดุได้จากการวัดความกว้างของฐานกองวัสดุและความสูงของกองวัสดุ และคำนวณได้จาก

$$\text{มุมกองวัสดุ} = \tan^{-1}(\text{ความกว้างฐาน}) / \text{ความสูงกองวัสดุ} \quad (2)$$



(a) Coefficient of static friction



(b) Angle of repose



(c) Bulk density

รูปที่ 1 วิธีการทดลองหาสมบัติวัสดุ

ความหนาแน่นจริง (Solid density, ρ_s) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักวัสดุต่อปริมาตรของเมล็ดข้าวทดลองโดยการนำเมล็ดข้าวที่ทราบน้ำหนักแทนที่ในน้ำที่ทราบปริมาตรแล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรสำหรับความหนาแน่นรวม (Bulk density, ρ_b) พิจารณาช่องว่างระหว่างชิ้นวัสดุ โดยการนำวัสดุเทลงในบีกเกอร์ให้เต็มและเกลี่ยเอาส่วนเกินออกดังรูปที่ 1(c) และนำเมล็ดข้าวไปชั่งน้ำหนักบันทึกค่าและคำนวณได้จาก

อัตราส่วนของน้ำหนักเมล็ดข้าวต่อปริมาตรที่เกิดขึ้น [15] ทำการทดลองจำนวน 5 ครั้งแล้วพิจารณาจากค่าเฉลี่ยสำหรับค่าความพรุน (Porosity, ε) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของวัสดุจริงและความหนาแน่นรวมของเมล็ดข้าว พิจารณาได้จากความสัมพันธ์

$$\varepsilon = (1 - \rho_b) / \rho_s \quad (3)$$

ตารางที่ 1 สมบัติวัสดุและพารามิเตอร์ในการจำลองด้วย CFD-DEM

ชนิด	พารามิเตอร์	ค่าในแบบจำลอง
ข้าวสาร	Density (kg/m ³)	1450
	Poisson ratio	0.25
	Shear modulus, G _p (Pa)	3.75 x 10 ⁸
ห้องอบแห้ง	Density (kg/m ³)	8000
	Poisson ratio	0.3
	Shear modulus, G _p (Pa)	7.5 x 10 ¹⁰
ข้าว-ข้าว	Restitution coefficient, e	0.6
	Coefficient of static friction, μ_s	0.3
	Coefficient of rolling friction, μ_r	0.01
ข้าว-ห้องอบแห้ง	Restitution coefficient, e	0.5
	Coefficient of static friction, μ_s	0.2
	Coefficient of rolling friction, μ_r	0.01
Simulation	Grid type	Hexahedron
	Grid number (CFD)	5181
	CFD time step (s)	1.9 x 10 ⁻⁴
	DEM time step (s)	1.9 x 10 ⁻⁶
	Number of particles	30,000 (150,000 spheres)
	Simulation duration (s)	9

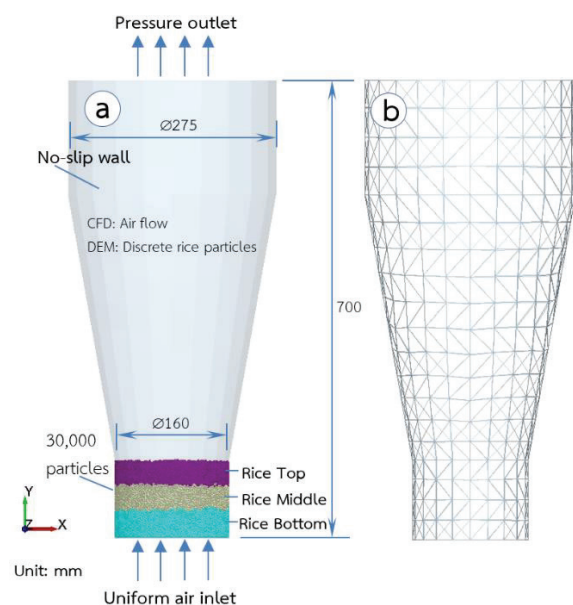
สัมประสิทธิ์การคืนตัว (Coefficient of restitution, e) คืออัตราส่วนรากที่สองของความสูงระหว่างความสูงของวัตถุหลังจากตกกระทบพื้นและกระดอนขึ้นในแนวตั้ง (h_r) และความสูงเริ่มต้นของวัตถุก่อนตกกระทบพื้น (h_i) พิจารณาได้จาก

$$e = (h_r/h_i)^{0.5} \quad (4)$$

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการกลิ้งตัว (Coefficient of rolling friction, μ_r) คือ ความสัมพันธ์การกลิ้งของวัตถุเกิดขึ้นระหว่างวัตถุกับวัตถุหรือเกิดขึ้นระหว่างวัตถุกับผนัง ในที่นี้ได้จากการประมาณค่าจากการจำลองด้วย DEM และเปรียบเทียบผลมุมของวัตถุที่สอดคล้องกับการทดลอง (Trial and error) [1]

2.2 เงื่อนไขการจำลอง

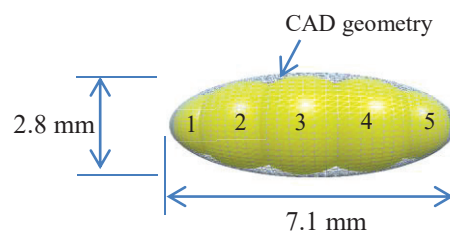
รูปที่ 2 แสดงขนาดโดเมนที่พิจารณาในกระบวนการพลูอิไดซ์เบด งานวิจัยนี้ได้ทดลองหาจำนวน Grid ที่เหมาะสม (Grid independent) โดยกำหนดให้ Grid หยาบขึ้นเพื่อให้มีจุดคำนวณน้อยลง แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อคำตอบที่ได้ จะช่วยให้การจำลองสามารถทำได้เร็วขึ้น



รูปที่ 2 a) โดเมน CFD-DEM

b) Mesh ของแบบจำลอง

การทดสอบ Grid independent ทำโดยการบรรจุอนุภาคจำนวน 40,000 อนุภาคแล้วกำหนดฟังก์ชันความเร็วอากาศเข้าเบตทางด้านล่างให้เพิ่มขึ้นตามเวลาในโปรแกรม ANSYS Fluent ซึ่งสามารถดูรายละเอียดวิธีนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [16] แล้วคำนวณหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดพลูอิไดซ์เซชัน (U_{mf}) โดยทดสอบที่จำนวน Grid เท่ากับ 3447, 4231, 5181, 6093, 7290 และ 8644 ตามลำดับ จากการจำลองพบว่าค่า U_{mf} มีค่าแตกต่างกันน้อยกว่า 2% เมื่อมีจำนวน Grid มากกว่าหรือเท่ากับ 5,181 งานวิจัยนี้จึงเลือกจำนวน Grid นี้ทุกเงื่อนไขการจำลอง ส่วนการจำลองรูปร่างอนุภาคจะสร้างเป็นเม็ดข้าวรูปทรงรี ขนาดยาว 7.1 mm กว้าง 2.8 mm ลึก 2.8 mm ในแบบจำลองได้วาดรูปร่างเม็ดข้าวไฟล์ CAD เพื่อเป็นขอบเขตในการบรรจุทรงกลม 5 ชั้น ตามวิธี Multi-Sphere method [17] สามารถแสดงในรูปที่ 3 ทรงกลมจะต่อแบบซ้อนทับกันบางส่วน โดยทั่วไปการเพิ่มจำนวนทรงกลมหลายอันจะได้รูปทรงที่ใกล้เคียงกับเม็ดข้าว แต่ต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสเปคสูงและใช้เวลาในการจำลอง ปัญหาเพิ่มขึ้นอีกหลายเท่า ในแบบจำลองพลูอิไดซ์เบดของงานวิจัยนี้ภายในเบตบรรจุเม็ดข้าวจำนวน 30,000 เม็ด (ทรงกลม 150,000 ชั้น) เพื่อตรวจสอบดัชนีการผสมกัน (Mixing index) จะแบ่งเม็ดข้าวเป็นสามกลุ่มเท่า ๆ กัน กลุ่มละ 10,000 เม็ดได้แก่ Top, Middle และ Bottom ดังรูปที่ 2



รูปที่ 3 รูปทรงข้าวแบบ Multi-sphere

การจำลองจะเริ่มจากการปล่อยเม็ดข้าวในรูปที่ 3 ด้วยอัตรา 5,000 เม็ดต่อวินาทีให้ตกลงตามแรงโน้มถ่วงและวางตัวอย่างอิสระภายในโดเมน หลังจากปล่อย

เมล็ดครบตามจำนวนที่กำหนดและทุกเมล็ดหยุดนิ่ง ไม่เคลื่อนไหวยะถือว่าเป็นสถานะเริ่มต้น ($t=0$) หลังจากนั้นจะเริ่มปล่อยให้อากาศไหลเข้าระบบทางด้านล่าง (Air inlet) ด้วยความเร็วที่กำหนด เมื่ออากาศเคลื่อนที่ผ่าน กองวัสดุแล้วจะไหลออกทางด้านบนของโดเมนซึ่งกำหนดเงื่อนไขเป็น (Pressure outlet) ส่วนผนังของโดเมน กำหนดเงื่อนไขเป็นแบบ No-slip wall ดังแสดงใน รูปที่ 2

2.3 แบบจำลอง CFD-DEM

แบบจำลอง CFD-DEM แบบ 3 มิติที่สร้างขึ้นนี้ ภายในห้องฟลูอิดซ์เบดมีอนุภาคของแข็งและก๊าซซึ่งมีอันตรกิริยาระหว่างกัน โดยอนุภาคของแข็งจะมีพฤติกรรม การเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล ในงานวิจัยนี้ทำการ จำลองการไหลของอากาศ (CFD) ด้วยวิธี Eulerian-Lagrangian ร่วมกับการวิเคราะห์อนุภาคไม่ต่อเนื่อง (DEM) การเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค (index i) มวล m_i และปริมาตร V_i ในระบบจะคำนวณโดยใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) ดังนี้

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{d^2r_i}{dt^2} = -V_i \nabla p + \frac{V_i \beta}{1-\varepsilon} (\mathbf{u}_g - \mathbf{v}_i) + m_i \mathbf{g} + \mathbf{F}_{C,i} + \mathbf{F}_{A,i} \quad (5)$$

เมื่อ $\mathbf{v}_i$ คือความเร็วของอนุภาค i , $\mathbf{u}_g$ คือ ความเร็วของก๊าซและ $\mathbf{r}_i$ คือเวกเตอร์แสดงตำแหน่งของอนุภาค i ส่วนแรงที่แสดงด้านขวาของสมการที่ (5) คือ ความแตกต่างของความดัน (Pressure gradient) แรงต้านอากาศ (Drag) แรงโน้มถ่วง (Gravity, $m_i \mathbf{g}$) แรงสัมผัส (Contact force, $\mathbf{F}_{C,i}$) และแรงดึงดูดระหว่างมวล (Van der Waals, $\mathbf{F}_{A,i}$) ซึ่งแรงนี้จะไม่คิดในแบบจำลอง ในระหว่างการเคลื่อนที่อนุภาคอาจเกิดการหมุนอธิบายจาก สมการโมเมนตัมเชิงมุมดังนี้

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \mathbf{T}_i \quad (6)$$

เมื่อ $\mathbf{T}_i$ คือทอร์ก I_i คือโมเมนต์ความเฉื่อยของอนุภาค i ส่วนค่าสัมประสิทธิ์โมเมนตัม β คำนวณจาก

สมการ (7) และ (8) โดยพิจารณาจากความพรุน ε ของอนุภาคในเบดดังนี้

$$\beta_{Ergun} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon} \frac{\eta_g}{d_p^2} + 1.75(1-\varepsilon)Re_p, \varepsilon < 0.8 \quad (7)$$

$$\beta_{Wen\&Yu} = \frac{3}{4} C_D Re_p \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^{2.65}} \frac{\eta_g}{d_p^2}, \varepsilon \geq 0.8 \quad (8)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านคำนวณตามช่วงของเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Re_p)

$$C_D = \begin{cases} 24 \left(\frac{1+0.15Re_p^{0.687}}{Re_p} \right) & \text{ถ้า } Re_p < 1000, \\ 0.44 & \text{ถ้า } Re_p \geq 1000, \end{cases} \quad (9)$$

โดย $Re_p = \varepsilon \rho_g |\mathbf{u}_g - \mathbf{v}_i| d_p / \eta_g$ เมื่อ ρ_g คือความหนาแน่นของก๊าซ, d_p คือเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลมของอนุภาค, η_g คือความหนืดไดนามิกของก๊าซ และค่า ε คือความพรุนหรือสัดส่วนเชิงปริมาตรของของไหล สำหรับอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคจะอธิบายด้วยแบบจำลอง Hertz-Mindlin [18] แรงและทิศทางในการชนกันของอนุภาคแต่ละตัวจะถูกเก็บไว้ในตัวแปรต่างกัน เพื่อแยกความแตกต่างระหว่างการเกิดการชนของอนุภาคกับอนุภาค และอนุภาคกับผนังห้องอบแห้ง สำหรับของไหลจะพิจารณาให้อยู่ในรูปการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuum) ห้องอบแห้งจะถูกแบ่งในรูปแบบตารางโครงข่าย (Mesh) การเคลื่อนที่ของของไหลจะถูกคำนวณโดยการเฉลี่ยปริมาตร (Volume-averaged) จากสมการ Navier-Stokes และสมการ Continuity ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_g) + \nabla \cdot (\rho_g \varepsilon \mathbf{u}_g) = 0 \quad (10)$$

หรือเขียนในรูปสมการสมดุลโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_g \mathbf{u}_g) + \nabla \cdot (\rho_g \varepsilon \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) = -\varepsilon \nabla p_g - \nabla \cdot (\varepsilon \boldsymbol{\tau}_g) + \rho_g \varepsilon \mathbf{g} - \mathbf{S}_p \quad (11)$$

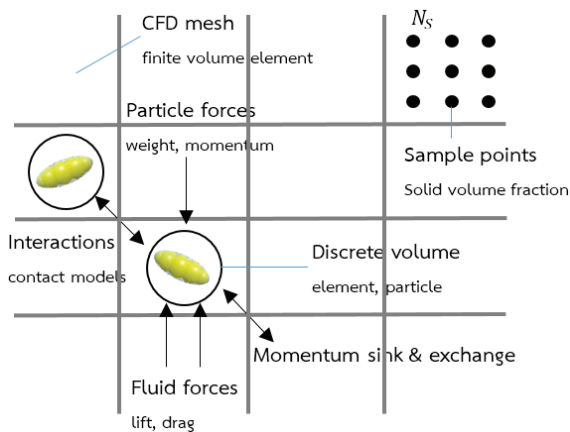
สมการความปั่นป่วนของของไหล (Turbulence) เป็นแบบ Standard $k - \varepsilon$ [19, 20] และความเค้นในของไหลเขียนอยู่ในรูปของเทนเซอร์ได้ดังนี้

$$\tau_g = -\left(\lambda_g - \frac{2}{3}\eta_g\right)(\nabla \cdot \mathbf{u}_g)\mathbf{I} - \eta_g\left((\nabla \cdot \mathbf{u}_g) + (\nabla \cdot \mathbf{u}_g)^T\right) \quad (12)$$

สำหรับของไหลค่า Bulk viscosity (λ_g) กำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ รูปที่ 4 แสดงหลักการคำนวณของวิธี CFD-DEM ด้วยโครงข่ายสี่เหลี่ยมซึ่งแทน Mesh สำหรับโดเมนของไหลและต้องมีขนาดโตกว่าอนุภาค 3 เท่าขึ้นไป ดังรูปที่ 2(b) อนุภาคไม่ต่อเนื่องจะเคลื่อนที่ภายในโดเมนนี้และเกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน โดยแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างของไหลกับอนุภาค และอนุภาคกับอนุภาค ในขณะที่วัสดุค่อยๆ ไปตามกระแสของไหลจะเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคหรือความพรุน การคำนวณค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาค (Particle volume fraction, ε_p) ทำได้โดยการรวมจำนวน N_S ในแต่ละตำแหน่งของ Mesh นั้น ๆ ดังสมการ

$$\varepsilon_p = \frac{N_S \sum_{i=1}^{N_p} V_i}{V_{cell}} \quad (13)$$

เมื่อ V_{cell} คือปริมาตรของ Mesh และ N_p คือจำนวนอนุภาคทั้งหมดภายใน Mesh



รูปที่ 4 หลักการของแบบจำลอง CFD-DEM

อนุภาคในห้องอบแห้งเป็นเสมือนสิ่งกีดขวางการไหลซึ่งมีอิทธิพลต่อความเร็วของของไหลที่วิ่งผ่าน อนุภาคจะถูกเป่าให้ลอยขึ้นและตกลงด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก ขณะเดียวกันทิศทางและความเร็วของอนุภาคเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเนื่องจากการชนกันกับอนุภาคอื่น ๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ $\mathbf{S}_p$ (Momentum exchange) เพื่อใช้แทนค่าลงในสมการที่ (11)

$$\mathbf{S}_p = \frac{1}{V_{cell}} \int_{V_{cell}} \sum_{i=0}^{N_p} \frac{V_i \beta}{1 - \varepsilon} (\mathbf{u}_g - \mathbf{v}_i) D(\mathbf{r} - \mathbf{r}_i) dV \quad (14)$$

โดยคำนวณฟังก์ชันการกระจายตัวของแรงที่กระทำบนของไหล (D) ด้วย Eulerian grid สำหรับแบบจำลอง DEM ที่พิจารณาแรงกระทำระหว่างอนุภาคสามารถสืบค้นได้จาก [21, 22] ในงานวิจัยนี้จำลอง CFD-DEM ด้วยโปรแกรม Ansys Fluent โดย Coupling กับโปรแกรม EDEM ทำงานแบบ Shared memory parallel (SMP) บนเครื่อง Workstation XEON E5-2665 จำนวน 16 Cores 32 Threads แรม 32 GB

2.3 ดัชนีการผสมกัน

Lacey mixing index (MI) [23] คือ ดัชนีการวัดทางสถิติของการผสมกันระหว่างตัวอย่างแต่ละกลุ่มด้วยการสมมติ Cell ที่มีปริมาตรเท่ากันให้ครอบคลุมทุกตำแหน่งที่อนุภาคกระจายตัวภายในเบด และนับจำนวนอนุภาคแต่ละกลุ่มที่เคลื่อนที่ผ่าน Cell เหล่านี้ จากนั้นคำนวณสัดส่วนของกลุ่มอนุภาคในแต่ละ Cell ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ในงานวิจัยนี้แบ่ง Cell ขนาดเท่ากันจำนวน 120 Cells ดังแสดงในรูปที่ 5

ในการหาค่า Mixing index ของเมล็ดข้าวสามกลุ่มคือ Top, Middle และ Bottom (รูปที่ 2) ในงานวิจัยนี้เลือกสังเกตอนุภาคกลุ่ม Bottom โดยมีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_m)^2 \quad (15)$$

โดย S^2 คือสัดส่วนค่าเบี่ยงเบนของอนุภาคกลุ่ม Bottom ในแต่ละ Cell, N คือจำนวนของ Cell ที่บรรจุอนุภาค, ϕ_i คือสัดส่วนของอนุภาคกลุ่ม Bottom ภายใน Cell i และ ϕ_m คือค่าเฉลี่ยของสัดส่วนของอนุภาค Bottom ภายใน Cell สามารถใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นคำนวณค่าความก้าวหน้าของการผสม คือ 1. ในสถานะเริ่มต้นที่ยังไม่เกิดผสมกัน S_0^2 และ 2. เมื่อสุ่มหรือ Random กลุ่มตัวอย่างที่ผสมกันแล้ว S_R^2 ได้ดังนี้

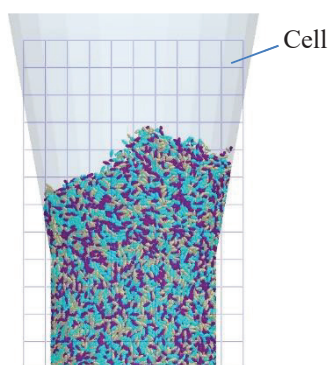
$$S_0^2 = \phi_m(1 - \phi_m) \quad (16)$$

$$S_R^2 = \phi_m(1 - \phi_m)/n \quad (17)$$

เมื่อ n คือค่าเฉลี่ยของจำนวนอนุภาคต่อ Cell เมื่อคำนวณสมการที่ (15)-(17) ดังนั้นสามารถหาค่าดัชนีการผสม (Mixing index, MI) จากสมการ

$$MI = \frac{S^2 - S_0^2}{S_R^2 - S_0^2} \quad (18)$$

โดยค่า MI จะมีค่าอยู่ในช่วง 0-1 ถ้าอนุภาคแต่ละกลุ่มผสมกันอย่างทั่วถึงจะมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งหมายถึงการเข้าสู่สภาพการผสมกันอย่างสมบูรณ์ โดยตัวอย่างทั้งหมดที่สุ่มออกมามีองค์ประกอบในสัดส่วนเดียวกับองค์ประกอบของส่วนผสมทั้งหมด



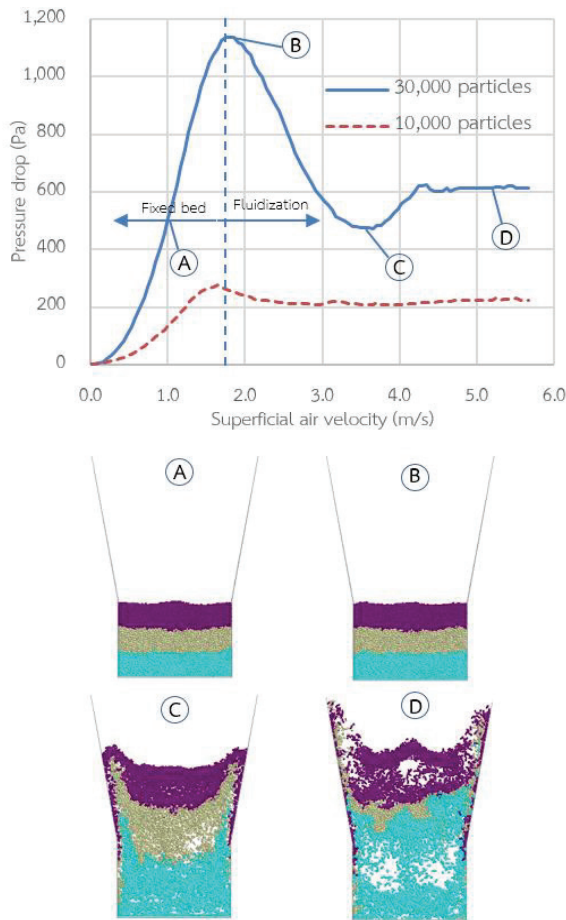
รูปที่ 5 ช่อง Cell สำหรับการคำนวณ Mixing index

3. วิจัยผล

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดเบดฟลูอิไดซ์เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการออกแบบระบบและการเลือก

ขนาดแหล่งกำเนิดลม (Blower) เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้วัสดุภายในเบดมีสถานะเบดนิ่งหรือหลุดลอดออกไปจากเบด การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันโดยการจำลองสถานะการทำงานทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากความพรุนของวัสดุในเบดฟลูอิไดซ์มีค่าไม่คงที่และไม่แน่นอน สมการที่นิยมใช้คำนวณค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันคือสมการของ Ergun [24] ซึ่งเป็นสมการแบบกึ่งเอมพิริคัลและต้องใช้พารามิเตอร์ในการคำนวณหลายตัว

ในงานวิจัยนี้จำลองการเกิดฟลูอิไดเซชันที่มีจำนวนอนุภาคในเบดเท่ากับ 30,000 และ 10,000 เริ่มจากการบรรจุเม็ดสีข้างลงในเบดแล้วปล่อยอากาศให้ไหลเข้าทางด้านล่างของเบด โดยเพิ่มความเร็วอากาศจาก $0-5.5 \text{ m s}^{-1}$ ภายในระยะเวลา 2 s ทำได้โดยกำหนดความเร็วอากาศเข้าเบดด้วยคำสั่ง User defined function (UDF) แล้ววัดความดันแบบเฉลี่ยพื้นที่ตลอดหน้าตัดขวางในบริเวณเหนือแผ่นกระจายอากาศเล็กน้อย (P1) กับบริเวณใกล้ทางออกเบด (P2) จากนั้นคำนวณค่าความดันตกคร่อม (Pressure drop) ด้วยการหาผลต่าง P1-P2 ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วอากาศ และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมและความเร็วของอากาศที่เข้าสู่เบดดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 อิทธิพลของความเร็วอากาศที่มีต่อความดันคร่อมเบดและการเคลื่อนที่ของอนุภาค ในตำแหน่ง A, B, C และ D

รูปที่ 6 แสดงปรากฏการณ์ฟลูอิดิเซชัน ผลการจำลองพบว่าขณะที่อากาศยังมีความเร็วต่ำเมล็ดข้าวจะไม่ขยับตัวดังรูปที่ 6(A) ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่าเบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศ ความดันคร่อมเบดยังมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ สถานะนี้ความเร็วในการไหลตามผิว (Superficial velocity) จะมีค่าน้อยกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเซชัน ถ้าเพิ่มความเร็วของอากาศให้มากขึ้นจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง เมล็ดข้าวจะเริ่มขยับตัวและจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เรียกว่า ฟลูอิดิเซชันต่ำสุด (Minimum fluidizing velocity, U_{mf}) ดังรูปที่ 6(B) ที่จุดนี้ความดันจะมีค่าสูงสุด และค่า $U_{mf} = 1.65 \text{ m s}^{-1}$ เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศต่อไปจนมีค่าสูงกว่า U_{mf}

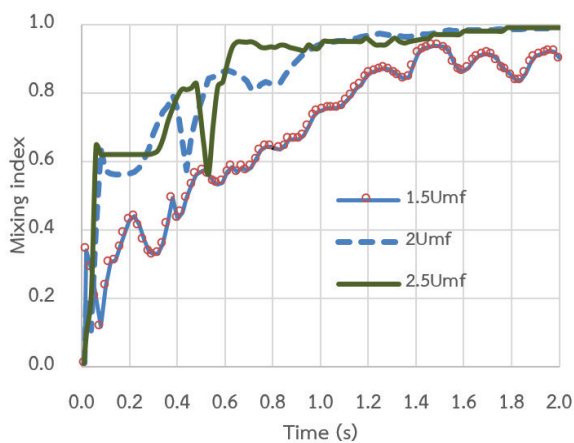
ความดันคร่อมเบดจะลดลงดังรูปที่ 6(C) น้ำหนักของเมล็ดข้าวถูกรองรับโดยกระแสของไหล เมล็ดข้าวจะเปลี่ยนพฤติกรรมเคลื่อนที่จนมีลักษณะคล้ายกับของไหล โดยพฤติกรรมนี้เกิดจากสมดุลของแรงจากอากาศที่กระทำต่อเมล็ดข้าว อากาศส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเมล็ดข้าว อีกส่วนหนึ่งจะรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟองอากาศเกิดขึ้น ฟองอากาศเหล่านี้จะแตกตัวขึ้นมายังผิวหน้าของเบดและแตกตัวในเวลาต่อมา

ขณะที่ฟองอากาศลอยขึ้นจะทำให้เมล็ดข้าวไหลจากส่วนหลังคาของฟองอากาศลงมายังส่วนล่าง โดยบางส่วนของอนุภาคของแข็งจะลอยติดตามฟองอากาศไปด้วย ลักษณะดังกล่าวทำให้ภายในเบดจะมีการเคลื่อนที่อย่างสุ่มเรียกว่า เบดวุ่นวาย (Aggregative bed) ดังรูปที่ 6(D) นอกจากนี้ รูปที่ 6 พบว่าเบดที่มีจำนวนอนุภาคต่างกัน 20,000 เมล็ด มีค่า Pressure drop เพิ่มขึ้นถึง 4.1 เท่า เนื่องจากความหนาแน่นและความสูงเบดเริ่มต้นไม่เท่ากันทำให้อากาศเคลื่อนที่ทะลุผ่านกองวัสดุได้ยากขึ้น ทำให้ Pressure drop เพิ่มขึ้น

รูปที่ 7 แสดงค่า Mixing index ที่ความเร็วอากาศค่าต่าง ๆ พบว่าอัตราการผสมกันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของอากาศสูงขึ้นจาก $1.5U_{mf}$ ถึง $2.5U_{mf}$ เมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นทำให้เมล็ดข้าวลอยตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะกลุ่ม Bottom ที่ลอยขึ้นมาพบกับกลุ่ม Middle และ Top ทำให้เกิดการหมุนเวียนเมล็ดข้าวได้ดีขึ้น จากกราฟพบว่า ค่า Mixing index ที่ความเร็ว $2U_{mf}$ และ $2.5U_{mf}$ มีค่าใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับ รูปที่ 8 ค่า Solid fraction ของเมล็ดข้าวที่ $2U_{mf}$ และ $2.5U_{mf}$ มีค่าใกล้เคียงกันตั้งแต่ 1 s แรกของการผสมกัน ดังนั้นสามารถใช้ความเร็ว $2U_{mf}$ เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการฟลูอิดิเซชันเพื่อการประหยัดพลังงานและลดขนาดของพัดลมที่ใช้ในการเป่าวัสดุ

รูปที่ 7 พบว่าค่า Mixing index เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วง 0-0.6 s เนื่องจากเป็นช่วงเริ่มต้นที่วัสดุลอยตัว วัสดุในแต่ละชั้นยังคงเกาะกลุ่มกันและมีบางส่วนที่ลอยตัวทะลุผ่านไปผสมกับตัวอย่างกลุ่มที่อยู่ติดกัน

(สังเกตจาก รูปที่ 6C) เนื่องจากกลุ่ม Middle กั้นระหว่างกลางทำให้วัสดุกลุ่ม Bottom และ Top ยังไม่เกิดการผสมกัน ในช่วง 0.4-0.6 s กราฟที่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน หลังจากผ่านไป 1 s วัสดุผสมกันมากขึ้น สำหรับความเร็ว $2U_{mf}$ และ $2.5U_{mf}$ ค่า Mixing index มีค่าเข้าใกล้ 1 ในช่วง 2 s และเข้าสู่สภาวะการผสมกันอย่างสมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไป



รูปที่ 7 อิทธิพลของความเร็วอากาศที่มีต่อค่า Mixing index สำหรับการเกิดฟลูอิดไรซ์เซชันในช่วง 2 s

จากการแบ่งเมล็ดข้าวออกเป็นสามกลุ่มเท่า ๆ กัน ดังนั้นค่า Solid fraction ของแต่ละกลุ่มจะมีค่าเท่ากับ 0.33 ซึ่งถ้าตัวอย่างทั้งสามกลุ่มผสมกันอย่างทั่วถึง (Well mixed) หากกลุ่มหีบตัวอย่างในเบดมา 100 เมล็ด จะต้องนับเมล็ดข้าวแต่ละกลุ่มได้จำนวน 33 เมล็ด ในงานวิจัยนี้ เลือกสังเกตอนุภาคกลุ่ม Bottom โดยแสดงสัดส่วนของเมล็ดข้าวที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 8

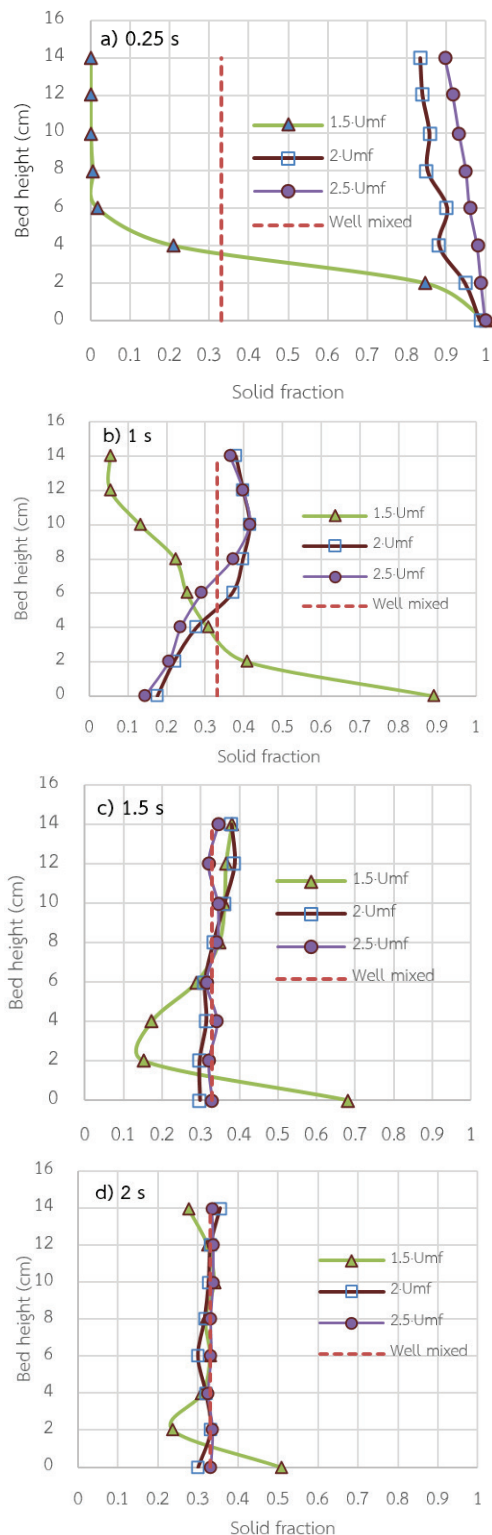
จากรูปที่ 8 เวลาการเกิดฟลูอิดไรซ์ 0.25 s พบว่าความเร็ว $1.5U_{mf}$ เมล็ดข้าวกลุ่ม Bottom อยู่ด้านล่างเบดในช่วงความสูงประมาณ 0-6 cm โดยมีค่า Solid fraction กระจ่ายตัว 0-1 ส่วนความเร็ว $2U_{mf}$ และ $2.5U_{mf}$ มีค่า Solid fraction ของอนุภาคกลุ่ม Bottom ประมาณ 0.8-1 โดยปรากฏในความสูงเบด 0-14 cm

เนื่องจากช่วงเวลาเริ่มต้นเมล็ดข้าวยังเกาะกลุ่มกัน ซึ่งยังไม่ได้คลุกเคล้ากับเมล็ดข้าวต่างกลุ่มทำให้ค่า

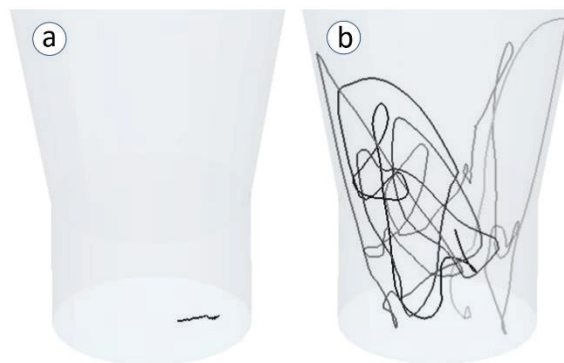
Solid fraction มีค่าสูง เมื่อการผสมกันของวัสดุดำเนินต่อไปจนถึงเวลา 1.5 s ดังแสดงใน รูปที่ 8(c) ที่ความเร็ว $2.5 U_{mf}$ มีค่า Solid fraction เข้าใกล้ 0.33 (Well mixed) มากที่สุดโดยในช่วงความสูงเบด (12 cm) มีค่าเกือบเท่ากับ 0.33 จนกระทั่งการผสมกันผ่านไปถึงเวลา 2 s ที่ความเร็ว $2 U_{mf}$ และ $2.5 U_{mf}$ วัสดุลอยตัวเป็นอิสระและเกิดการคลุกเคล้ากันอย่างทั่วถึง ค่า Solid fraction มีค่าใกล้เคียงกับ 0.33 ในทุกช่วงความสูงเบด แต่ที่ความเร็ว $1.5 U_{mf}$ ในช่วงล่างของเบด 0-4 cm วัสดุยังผสมกันได้ไม่ทั่วถึง สังเกตจากเส้นกราฟมีความเบี่ยงเบนจากเส้น Well mixed มากกว่าเส้นกราฟความเร็วอื่น ๆ

รูปที่ 9 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของข้าวเมล็ดเดียวกันในช่วง 0-9 s ที่เงื่อนไขความเร็วอากาศต่างกัน พบว่าที่ความเร็ว $1.5 U_{mf}$ เมล็ดข้าว มีการเคลื่อนที่เป็นระยะทางสั้น ๆ อยู่ในชั้น Bottom แตกต่างจากที่ความเร็ว $3U_{mf}$ เมล็ดข้าวเคลื่อนที่หมุนเวียนทั่วทั้งห้องฟลูอิดไรซ์เบด

รูปที่ 9(a) ทำให้ทราบว่า ถ้าใช้ความเร็วของอากาศต่ำอาจทำให้เมล็ดข้าวติดอยู่โซนล่างของเบดและเกิดความร้อนสะสมจนทำให้เมล็ดข้าวเกิดการแตกร้าวจาก Thermal stress [25] นอกจากนี้ในกรณีการเคลือบผิววัสดุด้วยเทคนิคฟลูอิดไรซ์เบดชนิดฉีดพ่นสารเคลือบจากด้านบน (Top spray fluidized bed coating) จะทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่หมุนเวียนไปสัมผัสกับสารเคลือบและได้รับสารเคลือบที่ไม่ทั่วถึงจนเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการเคลือบมีค่าต่ำ [6]



รูปที่ 8 แสดง Solid volume fraction ของอนุภาคกลุ่ม Bottom ที่เวลาต่าง ๆ ณ ความเร็วอากาศ $1.5 U_{mf}$, $2 U_{mf}$ และ $2.5 U_{mf}$



รูปที่ 9 เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคหนึ่งอันในกลุ่ม Bottom ในระยะเวลา 9 s ที่ความเร็วอากาศ a) $1.5 U_{mf}$ และ b) $3 U_{mf}$

สอดคล้องกับงานวิจัยการผลิตข้าวสารเคลือบขมิ้นชั้นด้วยเทคนิคฟลูอิดไรเซชันชนิดฉีดพ่นจากด้านบน [26] ที่ใช้ความเร็วลมในการเป่าข้าวให้ข้าวในเบด 3 kg ลอยที่ความเร็วประมาณ 3.6 m s^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้คิดเป็น $2.18 U_{mf}$ หากใช้ความเร็วต่ำกว่านี้อาจทำให้การหมุนเวียนข้าวในห้วงอบไม่ดีนัก แต่ถ้าใช้ความเร็วสูงเกินไปอาจเกิดปัญหาการพาเมล็ดข้าวและสารเคลือบหลุดออกจากห้องอบแห้งและเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน แต่จากผลการจำลองในงานวิจัยนี้พบว่า ความเร็ว $2U_{mf}$ เพียงพอกับการผสมคลุกเคล้าเมล็ดข้าวอย่างทั่วถึง ซึ่งสามารถนำไปเป็นข้อมูลที่เหมาะสมในการทดลองต่อไป

4. สรุป

แบบจำลอง DEM-CFD ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำนายลักษณะการเกิดฟลูอิดไรเซชันของเมล็ดข้าวรูปทรงรีจำนวน 30,000 เมล็ด ประกอบด้วยทรงกลม 150,000 อัน เมล็ดข้าวในเบดเกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน โดยแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างของไหลกับอนุภาค และอนุภาคกับอนุภาค ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไรเซชันมีค่าเท่ากับ $U_{mf} = 1.65 \text{ m s}^{-1}$ และความดันตกคร่อมเบดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนอนุภาคในเบด ความเร็วของอากาศที่สูงขึ้น

ทำให้อัตราการผสมกันของอนุภาคสูงขึ้น หลังจาก 2 s ของการเกิดฟลูอิดไซ์เซชันอนุภาคมีการผสมกันได้ดี (Well mixed) ความเร็วอากาศ $2U_{mf}$ เป็นค่าที่เหมาะสมในการเกิดฟลูอิดไซ์เซชันเพื่อให้เกิดการคลุกเคล้ากันอย่างทั่วถึง

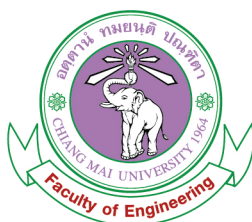
5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน และภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและ โลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยและ อุปกรณ์การทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Tsuji, Y., Tanaka, T. and Kawaguchi, T. Numerical Simulation of Two-Dimensional Fluidized Beds Using the Discrete Element Method (Comparison Between the Two and Three Dimensional models). Powder Technology, 1998; 96: 129-138.
- [2] Ma, H. and Zhao, Y. CFD-DEM Simulation of Fluidization of Rod-Like Particles in a Fluidized Bed. Powder Technology, 2017; 314: 355-366.
- [3] Takeuchi, S., Shan Wang, X. and Rhodes, M. J. Discrete Element Study of Particle Circulation in A 3-D Spouted Bed. Chemical Engineering Science, 2005; 60: 1267-1276.
- [4] Owen, P.J. and Cleary, P.W. Prediction of Screw Conveyor Performance Using the Discrete Element Method (DEM). Powder Technology, 2009; 193: 274-288.
- [5] Yu, H., Cheng, W., Wang, H., Peng, H. and Xie, Y. Formation Mechanisms of a Dust-Removal Air Curtain in a Fully-Mechanized Excavation Face and an Analysis of Its Dust-Removal Performances Based on CFD and DEM. Advanced Powder Technology, 2017; 28(11): 2830-2847.
- [6] ปรีดา ปรากฏมาก. การพัฒนาเครื่องเคลือบเมล็ดข้าวสารด้วยกระบวนการฟลูอิดไซ์เบด. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29, นครราชสีมา, ประเทศไทย, 2558.
- [7] Zhou, L., Zhang, L., Bai, L., Shi, W., Li, W., Wang, C. and Agarwal, R. Experimental Study and Transient CFD/DEM Simulation in a Fluidized Bed Based on Different Drag Models. RSC advances, 2017; 7: 12764-12774.
- [8] Deen, N.G., Annaland, M.V.S., Van der Hoef, M.A. and Kuipers, J.A.M. Review of Discrete Particle Modeling of Fluidized Beds. Chemical Engineering Science, 2007; 62: 28-44.
- [9] Fang, M., Luo, K., Yang, S., Zhang, K. and Fan, J. Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method Investigation of Solid Mixing Characteristics in an Internally Circulating Fluidized Bed. Industrial and Engineering Chemistry research, 2013; 52: 7556-7568.
- [10] Scherer, V., Mönnigmann, M., Berner, M.O. and Sudbrock, F. Coupled DEM-CFD Simulation of Drying Wood Chips in a Rotary Drum-Baffle Design and Model Reduction. Fuel, 2016; 184: 896-904.
- [11] Oke, O., Wachem, B.V. and Mazzeia, L. Lateral Solid Mixing in Gas-Fluidized Beds: CFD and DEM Studies. Chemical Engineering Research and Design, 2016; 114: 148-161.
- [12] Böhlring, P., Khinast, J.G., Jajcevic, D., Davies, C., Carmody, A., Doshi, P., Ende, M.T. and Sarkar, A. CFD-DEM Modeling of an Industrial-Scale Wurster Coater. Journal of Pharmaceutical Sciences, 2018.
- [13] Fries, L., Antonyuk, A., Heinrich, S., Dopfer, D. and Palzer, S. Collision Dynamics in Fluidised Bed Granulators: A DEM-CFD Study. Chemical Engineering Science, 2013; 86: 108-123.
- [14] Song, C., Liu, D., Ma, J. and Chen, X. CFD-DEM Simulation of Flow Pattern and Particle Velocity in a Fluidized Bed with Wet Particles. Powder Technology, 2017; 314: 346-354.
- [15] สถาพร วังฉาย. การศึกษาประสิทธิภาพของกระพ้อลำเลียงชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางด้วยวิธี DEM. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31, นครนายก, ประเทศไทย, 2560.

- [16] Prakotmak, P. CFD-DEM Simulation of Minimum Fluidization Velocity for Gas-Solid Medium. Journal of the Thai Society of Agricultural Engineering, 2019; 25(1): 19-27.
- [17] Norouzi, H.R., Zarghami, R., Sotudeh-Gharebagh, R. and Mostoufi, N. Coupled CFD-DEM Modeling Formulation Implementation and Application to Multiphase Flows. John Wiley & Sons, 2016.
- [18] Mindlin, R.D., Deresiewicz, H. 1953. Elastic spheres in contact under varying oblique forces. Trans, ASME. Ser. E. J. Appl. Mech, 2016; 20: 327-344.
- [19] Ebrahimi, M. Crapper, M. CFD-DEM Simulation of Turbulence Modulation in Horizontal Pneumatic Conveying. Particuology, 2017; 31: 15-24.
- [20] ANSYS. ANSYS Fluent Theory Guide, 2013; 15317: 47
- [21] Hobbs, A. Simulation of an Aggregate Dryer Using Coupled CFD and DEM Methods. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2009; 23(2): 199-207.
- [22] Wahyudi, H., Chu, K. and Yu, A. 3D Particle-Scale Modeling of Gas-Solids Flow and Heat Transfer in Fluidized Beds with an Immersed Tube. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016; 97: 521-537.
- [23] Lacey, P. Developments in Theory of Particulate Mixing. Journal of Applied Chemistry, 1954; 4: 257.
- [24] Ergun, S. Fluid Flow Through Packed Columns. Chemical Engineering Progress, 1952; 48(2): 89-94.
- [25] ปรีดา ปรากฏมาก. แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนและมวลในการอบแห้งข้าวกล้องเมล็ดเดียว. วิศวกรรมลาดกระบัง, 2559; 33(2): 42-48.
- [26] ปรีดา ปรากฏมาก. การพัฒนาเครื่องเคลือบเมล็ดข้าวสารด้วยกระบวนการฟลูอิดไคซ์เบด. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2559; 26(3): 385-394.



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Engineering Journal Chiang Mai University

The aim of this journal is to provide a forum for reporting progress on original basic or applied research including review articles in all branches of engineering and related fields.

Engineering Journal CMU is sponsored by the Faculty of Engineering, Chiang Mai University. Papers are selected for publication through a peer review (double blinded) process. Submitted articles are judged on the technical originality, quality of exposition and significance of the results. To assist in speeding up the review and publication process, author are requested to follow the Journal's style and format. Author should refer to current issues as a guide. Electronic template of manuscript may be downloaded from < <http://researchs.eng.cmu.ac.th> >. Details of style and format are in the Note for Contributors section of this issue. Submit your manuscript via online submission system <<http://ejournal.eng.cmu.ac.th>> The published could be loaded from <http://researchs.eng.cmu.ac.th>

Online Submission of Papers Normal Process:

Authors are requested to submit 2 original manuscripts to the editor of Engineering Journal CMU, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200. Submission of a paper implies that it has not been published elsewhere in the same form. A final revised version of your accepted manuscript should be submitted on a floppy diskette as well as hard copy. The content of the diskette must correspond exactly to the hard copy version of the paper. On-line process, (available on April 1, 2019) Authors could submit the manuscript online through <<http://ejournal.eng.cmu.ac.th>>

Advisory Board

Asst. Prof. Dr. Nat Vorayos
Assoc. Prof. Dr. Phrut Sakulchangsattajai

Editor

Prof. Dr. Tanongkiat Kiatsirirot : tanong@dome.eng.cmu.ac.th

Editorial Board

Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Thailand :

Prof. Dr. Nakorn Tippayawong	Assoc. Prof. Dr. Nivit Charoenchai
Assoc. Prof. Dr. Khajornsak Sopajaree	Assoc. Prof. Dr. Thongchai Fongsamootr
Assoc. Prof. Dr. Sermsak Uatrongjit	Assoc. Prof. Dr. Amarin Boontun
Assoc. Prof. Dr. Sansanee Auephanwiriyaikul	Assoc. Prof. Dr. Chayanon Hansapinyo
Prof. Dr. S. Seraphin, National Science and Technology Development Agency, Thailand	
Prof. Dr. Sirivatch Shimpalee, University of South Carolina, USA	
Assoc. Prof. Dr. Jaturapatr Varith, Maejo University, Thailand	
Assoc. Prof. Dr. Nattaporn Chaiyai, Maejo University, Thailand	
Assoc. Prof. Dr. Somkiat Jaturonglumlert, Maejo University, Thailand	
Dr. Atipong Nuntaphan, Electricity Generating Authority of Thailand	
Assoc. Prof. Dr. N. Maruyama, Mie University, Japan	
Prof. Dr. C.C Wang, National Chiao Tung University, Taiwan	
Prof. Dr. Junfeng Wang, Jiangsu University, PR.China	
Assoc. Prof. Dr. Nguyen Huy Bich, Nonglam University, Vietnam	

Address

Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200 Tel.0-5394-4176-7 Fax.0-5321-7287
Website : www.eng.cmu.ac.th

The Engineering Journal Chiang Mai University (ISSN 0857-2178) has published 3 issues annually in January, May and September since 1994 in Thai.

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงต้นทุนในการลดจุดดำในอุตสาหกรรมฉีดพลาสติกโดยใช้แนวทางซิกซ์ซิกม่า.....	121-130
(Cost Efficiency Analysis for Black Dot Defect in Plastic Injection Process by Six Sigma Approach)	
ศุภโชค เสี่ยงทองแบน และ จิรพัฒน์ เภาประเสริฐวงศ์	
ผลกระทบของอัตราส่วนไอออนประจุบวกที่มีต่อการแลกเปลี่ยนไอออนของการฉีดน้ำเกลือที่มีความเค็มต่ำในแหล่งกักเก็บหินทราย.....	131-146
(The Effects of Cation Ratios on Ion Exchange Mechanism of Low Salinity Waterflooding in Sandstone Reservoirs)	
ชนะพล เจริญนาวารกุล และ พัลลัน ศรีสุริยชัย	
พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสลายยาฆ่าแมลงด้วยเทคนิคน้ำที่กระตุ้นด้วยพลาสมา.....	147-156
(Appropriate Parameters for Breakdown of Pesticide by Plasma Activated Water Technique)	
สุชาดา พันธุ์สถิตยวงศ์ และ คมกฤต เล็กสกุล	
การพัฒนาเครื่องขึ้นรูปสากูไส้หมูกึ่งอัตโนมัติ.....	157-166
(Development of the Semi-Automatic Forming of Sago with Pork Filling Balls Machine)	
สุนัน ปานสาคร จตุรงค์ ลังกาพันธุ์ เจริญพร สมบัติหอม และ อภิสิทธิ์ มากเมือง	
การหาปริมาณการสั่งผลิตที่เหมาะสมภายใต้การล้าสมัยอย่างฉับพลันและการเกิดเครื่องจักรขัดข้อง โดยพิจารณาเวลาในการซ่อม.....	167-178
(Production Lot Sizing Problem With Sudden Obsolescence And Machine Breakdowns Considering Repair Time)	
พรชนันท์ ขุวิมนต์ และ สุวรรณรัตน์ นิยะโมสถ	
พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการสร้างน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมาในการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย <i>E. coli</i> ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	179-189
(Appropriate Parameters of Plasma Activated Water for Growth Inhibition of <i>E. coli</i> by Box-Behnken design)	
เสกสรรค์ จันธิมา ชนม์เจริญ แสงวรัตน์ วีระวรรณ บุญญวรรณ สายสมร ลำยอง จตุรงค์ คำหล้า และ นครินทร์ สุวรรณราช	
An Optimal Neural Network Controller for a PV Charging System using the MOGA/BPA.....	190-200
Rati Wongsathan	
การพัฒนาแบบสำหรับเลือกตำแหน่งและตรวจสอบคุณภาพของอิเล็กโทรดสำหรับวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้ากล้ามเนื้อ.....	201-213
(Development of Automatic Electrode Position Selection and Electrode Integrity Determination System for Electromyography Signal Measurement)	
วิฑิต แซ่ลิ่ม พรชัย พงศ์ภัทธานนท์ และ กิตติคุณ ทองพูล	
การปรับปรุงกระบวนการก่อสร้างในงานติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จของโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียว (ส่วนเหนือ).....	214-226
(Improvement for Segmental Box Girder for Installation Process of Mass Rapid Transit, The Green Line Project (Northern Zone))	
ประพจน์ รัตตมณี และ ดนัย วันทนาก	
การจำลองลักษณะของฟลูอิดเบดโดยใช้วิธีวิเคราะห์อนุภาคไม่ต่อเนื่องร่วมกับการคำนวณพลศาสตร์ของไหล.....	227-238
(Simulation of a Fluidized Bed Characteristics using DEM-CFD Coupling)	
ปรีดา ปรากฏมาก และ สถาพร วัจฉาย	

