

การประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์ในการออกแบบผังคลังสินค้า
เพื่อลดเวลาในการขนถ่ายวัสดุ

**SIMULATION-BASED APPLICATION IN WAREHOUSE LAYOUT DESIGN
FOR REDUCING MATERIAL HANDLING TIME**

ชยุตม์ บรรเท็งจิตร

อาจารย์, สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรมและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง 19 หมู่ 11 ตำบลหนองละลอก
อำเภอบ้านค่าย จังหวัดระยอง 21120, chayut.b@eat.kmutnb.ac.th

Chayut Bunterngchit

Lecturer, Division of Industrial and Logistics Engineering Technology, Faculty of Engineering
and Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Rayong Campus
19, Moo 11, Nong Lalok, Ban Khai, Rayong 21120, Thailand, chayut.b@eat.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคลังสินค้าของโรงงานผลิตบล็อกแก้ว ตั้งแต่กระบวนการจัดเก็บจนถึง
กระบวนการขนย้ายบล็อกแก้วออกจากคลังสินค้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนารูปแบบการจัดวาง
ผังคลังสินค้าอย่างมีระบบและเพื่อลดเวลาในการขนย้ายบล็อกแก้วออกจากคลังสินค้า ซึ่งปัจจุบันใช้
เวลา 0.7692 นาทีต่อการขนถ่ายบล็อกแก้ว 1 พาเลท ซึ่งมากกว่าค่าดัชนีชี้วัดที่โรงงานตั้งเอาไว้ที่
0.6 นาทีต่อพาเลท วิธีดำเนินการวิจัยเริ่มต้นโดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบเอบีซีมาช่วยในการจัดกลุ่ม
บล็อกแก้วตามปริมาณความต้องการขาย จากนั้นทำการจำลองสถานการณ์ของผังคลังสินค้า
แบบเต็มด้วยโปรแกรม Flexsim พบว่าใช้เวลา 0.75 นาทีต่อการขนย้ายบล็อกแก้ว 1 พาเลท
หลังจากนั้นจึงออกแบบการจัดวางผังคลังสินค้าแบบใหม่ด้วยระบบการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่ง
ตายตัวและการจัดวางผังสินค้าแบบเคลื่อนไหวเร็ววางไว้ใกล้ประตู แล้วจึงทำการจำลองสถานการณ์
ของคลังสินค้า จากการเปรียบเทียบการจำลองสถานการณ์ของคลังสินค้าแบบเก่ากับแบบใหม่
พบว่า หลังจากการปรับปรุงสามารถลดเวลาในการขนย้ายบล็อกแก้วจาก 0.75 นาทีต่อพาเลท
เหลือ 0.5455 นาทีต่อพาเลท หรือลดลง 0.2045 นาที คิดเป็นร้อยละ 27.27

คำสำคัญ: การวิเคราะห์แบบเอบีซี, การออกแบบผังคลังสินค้า, การจำลองสถานการณ์

ABSTRACT

This research studied a warehouse of glass blocks manufacturing factory from storing to moving out from the warehouse. It was aimed to develop a new warehouse layout alternative to reduce material handling time. By collecting the data from the factory, it was found that the handling time of glass blocks was 0.7692 minutes per pallet, which exceeded the key performance indicator (KPI) of the factory that was 0.6 minutes per pallet. Therefore, ABC analysis was applied to classify the type of each glass blocks according to the amount of sales. After that, the existing warehouse layout was simulated by using Flexsim simulation software. The simulation showed that the handling time of glass blocks was 0.75 minutes per pallet. Then, dedicated storage and faster movers closer to the door principle were applied to design an appropriate layout along with simulated the scenarios of the current and proposed layout. The simulation showed that if the proposed layout had been implemented, the material handling time would have reduced from 0.75 minutes to 0.5455 minutes per pallet or reduced by 0.2045 minutes (27.27% reduction).

KEYWORDS: ABC analysis, Warehouse layout design, Simulation

1. บทนำ

คลังสินค้า (Warehouse) มีบทบาทสำคัญกับการดำเนินธุรกิจอุตสาหกรรมทุก ๆ ประเภท เนื่องจากคลังสินค้านี้ทำหน้าที่ในการรับสินค้าและวัตถุดิบเข้ามาจัดเก็บ โดยผ่านกระบวนการตรวจนับ แยกแยะประเภท และจัดเป็นหมวดหมู่ ทำให้สะดวกต่อการตรวจสอบ ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายเพื่อสนับสนุนการผลิตและการกระจายสินค้า ดังนั้นจะต้องมีการจัดวางผังคลังสินค้าที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ เพื่อช่วยให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน เช่น การกำหนดระบบการจัดเก็บสินค้าแต่ละประเภท การจัดสรรพื้นที่ในการจัดเก็บ การกำหนดทิศทางการเคลื่อนย้ายสินค้า และการเข้าถึงสินค้าได้อย่างสะดวกรวดเร็ว

อย่างไรก็ตาม โรงงานอุตสาหกรรมบางแห่งยังไม่มี การจัดวางผังคลังสินค้าที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ ดังเช่น โรงงานกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นโรงงานอุตสาหกรรมผลิตบล็อกแก้ว ที่ผลิตและจำหน่ายบล็อกแก้วเพื่อส่งขายทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งบล็อกแก้วสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขนาดมาตรฐาน คือ 190x190x60, 190x190x80, 190x190x90 และ 190x190x100 ลูกบาศก์ มิลลิเมตร แต่ละขนาดมีจำนวนรูปแบบลวดลายไม่เท่ากัน โดยมีจำนวนรูปแบบลวดลายเท่ากับ 4, 30, 4 และ 7 รูปแบบตามลำดับ โดยการจัดเก็บบล็อกแก้วดังกล่าวจะจัดระบบการเก็บเพียงกว้าง ๆ โดยจัดพวกที่มีรูปแบบลวดลายและขนาดเดียวกันไว้ด้วยกันเท่านั้น โดยไม่ได้คำนึงถึงความถี่ของ

การนำเข้าออกจากคลังสินค้า ทำให้ใช้เวลามากในการค้นหาและเคลื่อนย้ายสินค้าออกจากคลังสินค้า ซึ่งจะส่งผลต่อต้นทุนในการดำเนินงานที่สูงขึ้นอีกด้วย จากการศึกษาเวลาที่ใช้ในการขนถ่ายบล็อกแก้วออกจากคลังสินค้าเป็นเวลา 1 เดือน พบว่า สามารถขนถ่ายบล็อกแก้วได้เฉลี่ย 78 พาเลทต่อชั่วโมง หรือคิดเป็น 0.7692 นาทีต่อพาเลท ซึ่งมากกว่าค่าดัชนีชี้วัด (Key Performance Indicator: KPI) ที่บริษัทกำหนดไว้ไม่เกิน 0.6 นาทีต่อพาเลท โดยบริษัทคำนวณจากเวลาในการส่งของถึงลูกค้า ซึ่งมีสถิติการส่งของช้า 5 ครั้งต่อปี คิดเป็นค่าปรับประมาณ 100,000 บาทต่อปี

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนารูปแบบการจัดวางผังคลังสินค้าอย่างมีระบบซึ่งจะส่งผลให้เวลาในการขนถ่ายบล็อกแก้วออกจากคลังสินค้าดังกล่าวลดลง

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์แบบเอบีซีซึ่งเป็นแนวคิดที่ให้ความสำคัญกับการจัดกลุ่มสินค้าเป็น 3 กลุ่ม เพื่อให้ง่ายต่อการบริหารจัดการตามกลุ่มของสินค้า การจัดกลุ่มมีหลายแบบตามนโยบายที่ต้องการใช้บริการสินค้า เช่น การจัดหมวดหมู่ตามมูลค่าของสินค้าคงคลังที่ถือครองรวมต่อปี ปริมาณการขายหรือส่วนแบ่งของกำไรสินค้านั้น การวิเคราะห์แบบเอบีซีโดยแบ่งตามปริมาณการขายเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย ดังเช่นงานวิจัยของกิงกาญจน์และนพปฎล [1] ที่ต้องการหาวิธีการสั่งซื้อที่เหมาะสมให้กับบริษัทและเพื่อลดต้นทุนด้านสินค้าคงคลัง โดยใช้การวิเคราะห์แบบเอบีซีควบคู่ไปกับการหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม ทำให้สามารถลดต้นทุนสินค้าคงคลังได้ร้อยละ 26.79 ยิ่งไปกว่านั้น การวิเคราะห์แบบเอบีซียังสามารถใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการสินค้าคงคลังดังกล่าวของอชิระ [2] และสุนันทา [3] ที่แบ่งกลุ่มตามสินค้าลำดับความสำคัญคือปริมาณการขายช่วยให้การตรวจนับความแม่นยำขึ้นร้อยละ 23 และร้อยละ 24.89 ตามลำดับ และลดเวลาในการเบิกจ่ายลงร้อยละ 23 และร้อยละ 54 ตามลำดับ

การวิเคราะห์แบบเอบีซีโดยแบ่งตามปริมาณการขายเป็นที่นิยมในต่างประเทศเช่นกัน ดังเช่นงานวิจัยของ Jaguar [4] Chu, Liang และ Liao [5] รวมไปถึง Millstein, Yang และ Li [6] ที่ใช้การวิเคราะห์แบบเอบีซีในการจัดวางตำแหน่งสินค้าให้มีความเหมาะสมกับขนาดของคลังสินค้า และง่ายต่อการเบิกจ่ายสินค้า อีกทั้งงานวิจัยของ Ng [7] Chen และคณะ [8] Yu [9] รวมไปถึง Li, Xianyi และ Xin [10] ที่ใช้การวิเคราะห์แบบเอบีซีในการจำแนก SKU ด้วยการใช้การวิเคราะห์แบบ Pareto รวมไปถึงนำไปประยุกต์ใช้กับการวางแผนทรัพยากรทางธุรกิจขององค์กรโดยรวม (Enterprise Resource Planning: ERP) และนำไปจำแนกผลกระทบหลักของการเปลี่ยนแปลงต้นทุน

การจัดวางผังคลังสินค้าเป็นการจัดการคลังสินค้าเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้พื้นที่ต่าง ๆ ภายในคลังสินค้า เช่น พื้นที่จัดเก็บ จุติรับ จุดส่งสินค้า และกระบวนการขนย้ายสินค้าภายใน

พื้นที่จัดเก็บนั้น ซึ่งจะต้องมีประสิทธิภาพและมีระยะทางรวมน้อยที่สุด และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานได้ เช่น ค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บ และกิจกรรมที่ไม่เกี่ยวข้องกับการขนย้ายสินค้าให้มากที่สุด เพื่อให้มีความยืดหยุ่นในการจัดเก็บและการกระจายสินค้าที่เหมาะสม ดังเช่นงานวิจัยของ Malmborg, Balachandran และ Kyle [11] ที่ทำการออกแบบการจำลองคลังสินค้า เพื่ออธิบายถึงผลกระทบด้านต้นทุนของรูปแบบคลังสินค้า แบบจำลองนี้ถูกนำมาใช้เพื่อประเมินผลการจัดวางคลังสินค้า เพื่อให้ได้รูปแบบคลังสินค้าที่มีปริมาณสินค้าคงคลังและค่าใช้จ่ายในการหยิบสินค้าทั้งหมดลดลง

การจัดวางสินค้าภายในคลังสินค้านั้นมีวิธีการที่นิยมใช้เรียกว่าการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่งตายตัว (Dedicated storage) ดังงานวิจัยของ Lee และ Elsayed [12] Fumi, Scarabotti และ Schiraldi [13] รวมไปถึง De Koster, Le-Duc และ Roodbergen [14] ที่ประยุกต์ใช้การจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่งตายตัวมาใช้ในการลดพื้นที่คลังสินค้า โดยจัดวางตามความถี่ในการเข้าออกของสินค้า สินค้าที่มีความถี่มากจะวางไว้ใกล้ประตู หรือสินค้าที่มีการเคลื่อนไหวเร็วไว้ใกล้ประตู (Faster movers closer to the door) ซึ่งจะส่งผลให้เวลาในการขนถ่ายวัสดุภายในคลังสินค้าลดลง

Flexsim เป็นโปรแกรมจำลองสถานการณ์ที่นิยมใช้กับคลังสินค้า ดังงานวิจัยของ Huihui, Xiaoxia และ Xiangguo [15] Klodawski และคณะ [16] Samattapapong [17] Zhu และคณะ [18] Parlewski, Dabrowska และ Marchado [19] รวมไปถึง Pan, Wu และ Chang [20] ได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม Flexsim ในการจำลองสถานการณ์ของคลังสินค้า เพื่อแก้ปัญหาการวางผังคลังสินค้า รวมไปถึงลำดับในการหยิบสินค้า หลังจากนั้นจึงประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางการจัดวางผังคลังสินค้ามาปรับปรุงผังคลังสินค้า เช่น การวางผังสินค้าแบบกำหนดตำแหน่งตายตัว หรือการวางผังคลังสินค้าแบบสุ่ม ควบคู่ไปกับการใช้โปรแกรมทางสถิติในการหารูปแบบการกระจายตัวของข้อมูล ซึ่งส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการขนถ่ายวัสดุลดลงภายหลังการปรับปรุง เนื่องจากมีระบบการจัดวางผังคลังสินค้าที่เป็นระบบมากขึ้น ส่งผลให้คลังสินค้านั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น

จากงานวิจัยที่กล่าวถึงข้างต้น ผู้วิจัยจึงประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบเอบีซีในการแบ่งประเภทของสินค้าในคลังสินค้า แล้วจึงใช้โปรแกรม Flexsim ในการจำลองสถานการณ์ของคลังสินค้าทั้งแบบก่อนและหลังปรับปรุง และใช้การจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่งตายตัว โดยสินค้าที่มีการเคลื่อนไหวเร็วหรือมีปริมาณความต้องการขายสูงวางไว้ใกล้ประตู เป็นเทคนิคในการปรับปรุงผังคลังสินค้าเพื่อให้เวลาในการขนถ่ายบล็อกแก้วเป็นไปตาม KPI ที่โรงงานได้กำหนดไว้

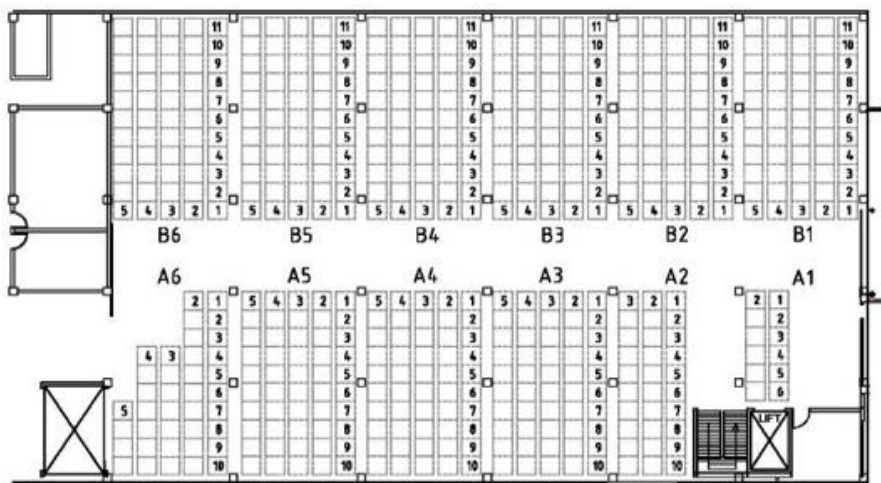
3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาสภาพทั่วไปของโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานกรณีศึกษาผลิตบล็อกแก้ว 4 ขนาดมาตรฐาน ซึ่งบรรจุภัณฑ์ของบล็อกแก้วแต่ละขนาด จะมีจำนวนบล็อกแก้วต่อกล่องไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยบล็อกแก้วทุกขนาดจะใช้พาเลทที่มีขนาดความกว้าง 1.20 เมตร และความยาว 1.20 เมตร คิดเป็นพื้นที่ที่ใช้ต่อหนึ่งหน่วยพาเลทเท่ากับ 1.44 ตารางเมตร ซึ่งจะใช้พื้นที่ภายในคลังสินค้า ในการจัดเก็บบล็อกแก้วทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณการบรรจุของบล็อกแก้วของแต่ละขนาดมาตรฐาน

ขนาดมาตรฐาน	กล่อง/พาเลท	ก้อน/กล่อง	ก้อน/พาเลท
190x190x60 มม. ³	65	8	520
190x190x80 มม. ³	65	6	390
190x190x90 มม. ³	60	6	360
190x190x100 มม. ³	48	6	288



รูปที่ 1 แผนผังพื้นที่ภายในคลังสินค้า (มาตราส่วน 1:400)

จากรูปที่ 1 คลังสินค้าตั้งอยู่ที่ชั้นที่หนึ่งของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ชั้น มีพื้นที่ทั้งหมด 1,400 ตารางเมตร ภายในพื้นที่คลังสินค้าสามารถจัดวางได้ทั้งหมด 560 ตั่ง (1 ตั่ง มีค่าเท่ากับ 1 พาเลท หรือคิดเป็น 1.44 ตารางเมตร) และจัดวางบล็อกแก้วได้ทั้งหมด 1,680 พาเลท (1 ตั่ง

สามารถวางบล็อกแก้วซ้อนทับกันสูงสุด 3 พาเลท) ซึ่งในส่วนของพื้นที่ตรงกลางจะเป็นพื้นที่สำหรับทางเดินและรถฟอร์คลิฟท์

3.2 จัดกลุ่มบล็อกแก้วโดยใช้การวิเคราะห์แบบเอบีซี

งานวิจัยนี้ใช้หลักการวิเคราะห์แบบเอบีซีในการจัดกลุ่มบล็อกแก้วตามปริมาณความต้องการของตลาด จากข้อมูลบล็อกแก้วของโรงงานกรณีศึกษา สามารถจัดกลุ่มบล็อกแก้วออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีปริมาณความต้องการของตลาดสูง (ร้อยละ 70-80) กลุ่มที่มีปริมาณความต้องการของตลาดปานกลาง (ร้อยละ 15-25) และกลุ่มที่มีปริมาณความต้องการของตลาดต่ำ (ร้อยละ 5-10) ซึ่งผลที่ได้จากการจัดกลุ่มบล็อกแก้วสามารถสรุปได้ดังนี้

กลุ่ม A คือ กลุ่มที่มีปริมาณความต้องการของตลาดสูง ได้แก่ บล็อกแก้วที่มีขนาดมาตรฐาน 190x190x80 ลูกบาศก์มิลลิเมตร มีจำนวนรูปแบบลวดลาย 8 รูปแบบ คิดเป็นความต้องการของตลาดร้อยละ 72 ของความต้องการทั้งหมด

กลุ่ม B คือ กลุ่มที่มีปริมาณความต้องการของตลาดปานกลาง ได้แก่ บล็อกแก้วที่มีขนาดมาตรฐาน 190x190x80 และ 190x190x90 ลูกบาศก์มิลลิเมตร มีจำนวนรูปแบบลวดลาย 10 และ 2 รูปแบบ ตามลำดับ คิดเป็นความต้องการของตลาดร้อยละ 21 ของความต้องการทั้งหมด

กลุ่ม C คือ กลุ่มที่มีปริมาณความต้องการของตลาดต่ำ ได้แก่ บล็อกแก้วที่มีขนาดมาตรฐาน 190x190x60, 190x190x80, 190x190x90 และ 190x190x100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร มีจำนวนรูปแบบลวดลาย 4, 7, 2 และ 7 รูปแบบ ตามลำดับ คิดเป็นความต้องการของตลาดร้อยละ 7 ของความต้องการทั้งหมด

3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab

การเก็บรวบรวมข้อมูลเวลาในการขนย้ายบล็อกแก้วภายในคลังสินค้าของโรงงานกรณีศึกษา โดยใช้รถฟอร์คลิฟท์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ (1) เวลาในการขนย้ายบล็อกแก้วจากหน้าประตูทางเข้าถึงตำแหน่งวางบล็อกแก้ว (2) เวลาที่ใช้ในการวางบล็อกแก้ว และ(3) เวลาในการขนย้ายบล็อกแก้วจากตำแหน่งวางบล็อกแก้วถึงประตูทางออก หลังจากนั้นจึงทำการเก็บข้อมูลดังกล่าวของบล็อกแก้วทั้ง 3 กลุ่ม แล้วนำข้อมูลที่ไปวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อหารูปแบบการแจกแจงของข้อมูล ซึ่งจะนำมาใช้จำลองสถานการณ์ต่อไป โดยเริ่มต้นจากการใส่ข้อมูลลงใน Worksheet ของโปรแกรม แล้วเลือกเมนู Stat เลือก Quality Tools หลังจากนั้นเลือก Individual Distribution Identification และเลือกสดมภ์ (Column) ที่ต้องการจะวิเคราะห์ใส่ในช่อง Single Column แล้วกด OK จะได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 2 หลังจากนั้นให้เลือกข้อมูลการแจกแจงทางสถิติซึ่งพิจารณาจาก Goodness of Fit Test โดยเลือกค่า AD (Anderson-Darling

Test) ที่มีค่าต่ำ จากนั้นเลือกค่า P (P-Value) ที่มีค่าสูง หรือ LRT-P ที่มีค่าต่ำ หลังจากนั้นให้ดูค่า จาก ML Estimates of Distribution Parameters ของการแจกแจงที่เลือกไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2

Goodness of Fit Test			
Distribution	AD	P	LRT P
Normal	6.810	<0.005	
Box-Cox Transformation	2.095	<0.005	
Lognormal	2.466	<0.005	
3-Parameter Lognormal	1.709	*	0.000
Exponential	9.009	<0.003	
2-Parameter Exponential	2.349	<0.010	0.000
Weibull	4.548	<0.010	
3-Parameter Weibull	2.270	<0.005	0.000
Smallest Extreme Value	12.161	<0.010	
Largest Extreme Value	3.095	<0.010	
Gamma	3.319	<0.005	
3-Parameter Gamma	2.309	*	0.000
Logistic	3.409	<0.005	
Loglogistic	2.403	<0.005	
3-Parameter Loglogistic	1.825	*	0.000

ML Estimates of Distribution Parameters				
Distribution	Location	Shape	Scale	Threshold
Normal*	20.63492		15.64866	
Box-Cox Transformation*	0.06251		0.02506	
Lognormal*	2.87457		0.49884	
3-Parameter Lognormal	2.20523		0.84895	7.25890
Exponential			20.63492	
2-Parameter Exponential			12.83866	7.79621
Weibull		1.57265	23.26751	
3-Parameter Weibull		1.06119	13.25572	7.73896
Smallest Extreme Value	30.45144		27.00438	
Largest Extreme Value	15.54596		7.28143	
Gamma		3.43822	6.00163	
3-Parameter Gamma		1.37949	9.56295	7.44286
Logistic	18.18611		6.06135	
Loglogistic	2.82788		0.27417	
3-Parameter Loglogistic	2.12315		0.51889	7.66095

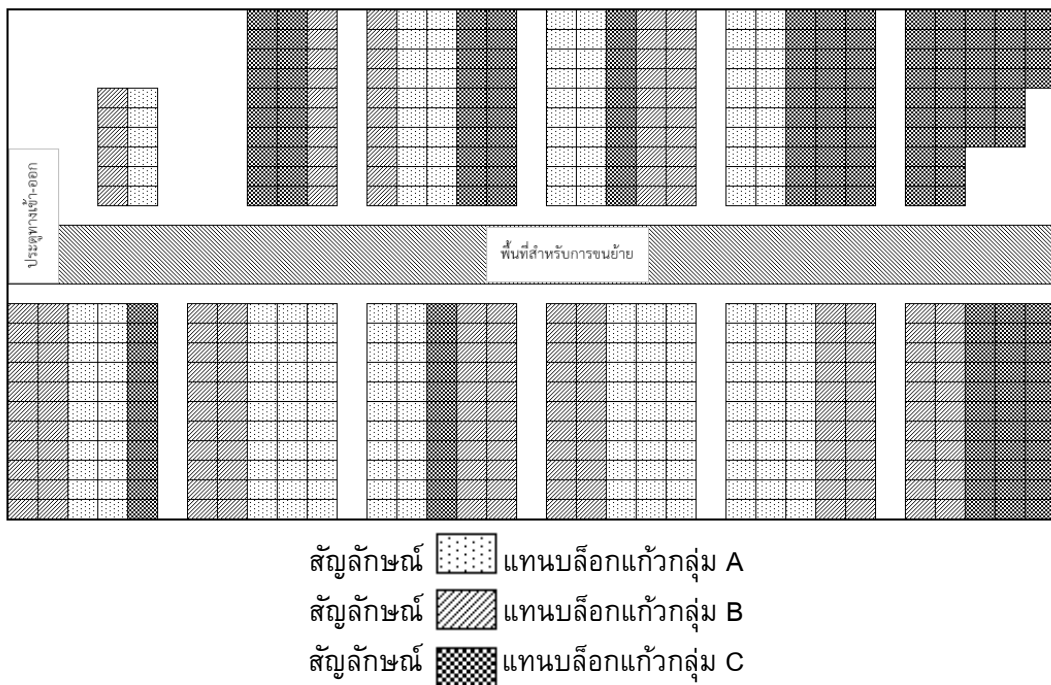
* Scale: Adjusted ML estimate

รูปที่ 2 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติด้วยโปรแกรม Minitab ของบล็อกรถแกวกลุ่ม A

จากรูปที่ 2 จะเห็นว่า การแจกแจงที่เลือกใช้คือการแจกแจงแบบ 3-Parameter Lognormal เพราะค่า LRT-P มีค่าเป็นศูนย์ และมีค่า AD ต่ำที่สุด ซึ่งการแจกแจงดังกล่าวมีค่า Location 2.20523 ค่า Scale 0.84859 และค่า Threshold 7.2589 ซึ่งจะนำไปใช้ในการจำลองสถานการณ์ต่อไป

3.4 การออกแบบการวางผังสินค้าแบบเก่า

หลังจากนั้นจึงทำการออกแบบการจัดวางผังคลังสินค้าแบบเก่า ซึ่งใช้ระบบการจัดเก็บบล็อกแก้วตามสถานการณ์จริงของคลังสินค้า ดังแสดงในรูปที่ 3

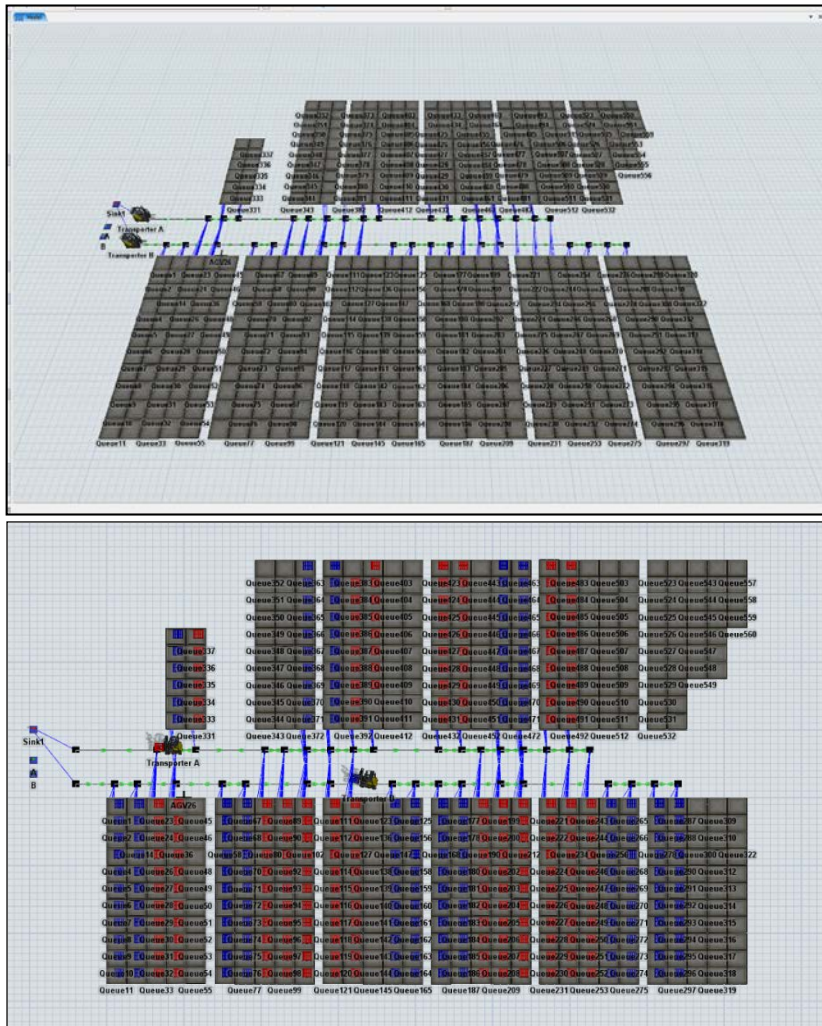


รูปที่ 3 การออกแบบการวางผังสินค้าแบบเก่า

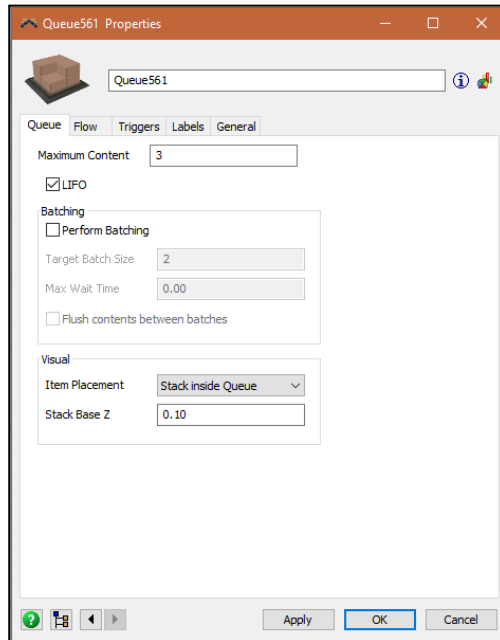
3.5 การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Flexsim

ขั้นตอนต่อมาคือการจำลองสถานการณ์ของคลังสินค้าแบบเก่า โดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ Flexsim ซึ่งในขั้นตอนนี้จะจำลองสถานการณ์ของคลังสินค้าแบบเก่า และนำผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้มาตรวจสอบความถูกต้องกับสถานการณ์จริง เนื่องจากการจำลองสถานการณ์ดังกล่าวจะต้องมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 5 ผลการจำลองสถานการณ์ของคลังสินค้าแบบเก่าด้วยโปรแกรม Flexsim แสดงดังรูป

ที่ 4 ซึ่งจะใช้ Resources ของโปรแกรมเพียง Source, Queue, Transporter และ Sink เท่านั้น หลังจากนั้นจะทำการใส่ค่า Inter-Arrival Time ของ Source แบบ 3-Parameter Lognormal และกำหนดให้ใช้ input เป็น pallet โดยจะนำการแจกแจงและค่าที่ได้จากรูปที่ 2 มาใส่ แล้วจึงทำการใส่ค่า Maximum Content ของ Queue เท่ากับ 3 แสดงการซ้อนกันของพาเลทสูงสุด 3 ชั้น และเป็นแบบ LIFO (Last-in First-out) ในทุก Queue ดังแสดงในรูปที่ 5 หลังจากนั้นจึงเพิ่มรถฟอร์คลิฟท์และกำหนดเส้นทางการวิ่ง สุดท้ายจึงทำการลากเส้นเชื่อมระหว่าง Source-Queue-Sink โดยมีรถฟอร์คลิฟท์เป็น Transporter แล้วจึงทำการจำลองสถานการณ์เป็นเวลา 1 เดือน หรือ 2,592,000 วินาทีในโปรแกรม Flexsim ซึ่งรถฟอร์คลิฟท์สามารถขนถ่ายบล็อกแก้วได้ 56,160 พาเลทต่อเดือน คิดเป็น 80 พาเลทต่อชั่วโมง หรือคิดเป็น 0.75 นาทีต่อพาเลท



รูปที่ 4 ผลการจำลองสถานการณ์ของคลังสินค้าแบบเก่าด้วยโปรแกรม Flexsim



รูปที่ 5 การตั้งค่าของ Queue

3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์ (Verification and Validation of the Simulation)

ในการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องก่อนนำไปใช้งานจริง เพื่อให้มั่นใจว่าแบบจำลองดังกล่าวนั้นมีความถูกต้องและได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยการเปรียบเทียบแบบจำลองกับสถานการณ์ปัจจุบัน คือ การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลของแบบจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมการจำลองสถานการณ์ Flexsim กับค่าที่ได้จากการสังเกตการณ์และเก็บบันทึกตามจริง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มีการเปรียบเทียบจำนวนบล็อกแก้วที่ขนย้ายออกจากคลังสินค้าในเวลา 60 นาที โดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนไว้ที่ร้อยละ 5 โดยจำนวนการขนถ่ายบล็อกแก้วจากการเก็บข้อมูลในสถานที่จริงเท่ากับ 78 พาเลท และจำนวนการขนถ่ายบล็อกแก้วจากโปรแกรมจำลองสถานการณ์เท่ากับ 80 พาเลท หลังจากนั้นจะนำค่าทั้งสองมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาร้อยละความคลาดเคลื่อนดังสมการที่ 1

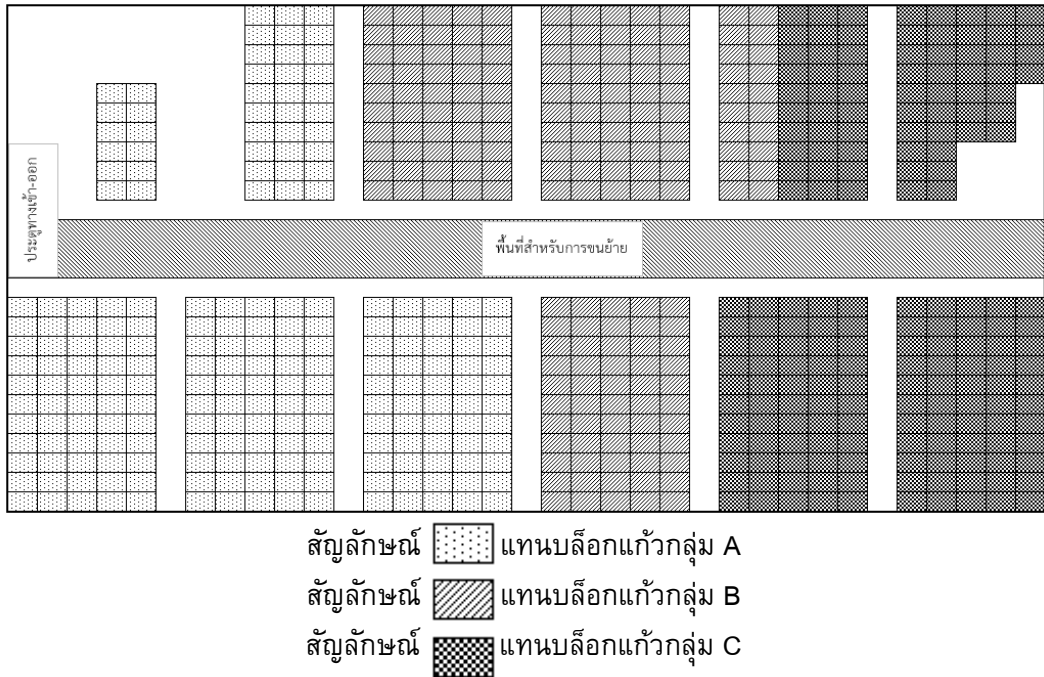
$$\% \text{Difference} = \frac{|E - S|}{E} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ E คือจำนวนบล็อกแก้วที่ขนถ่ายได้จากสถานการณ์จริง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 78 พาเลทต่อ ชั่วโมง และ S คือจำนวนบล็อกแก้วที่ขนถ่ายได้จากการจำลองสถานการณ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 80 พาเลทต่อชั่วโมง เมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ 1 จะได้ว่าร้อยละความแตกต่างเท่ากับร้อยละ 2.56

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า แบบจำลองสถานการณ์มีรูปแบบใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง และสามารถ นำแบบจำลองสถานการณ์มาใช้ในการจำลองแทนสถานการณ์จริงได้ เนื่องจากมีค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้น้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนด

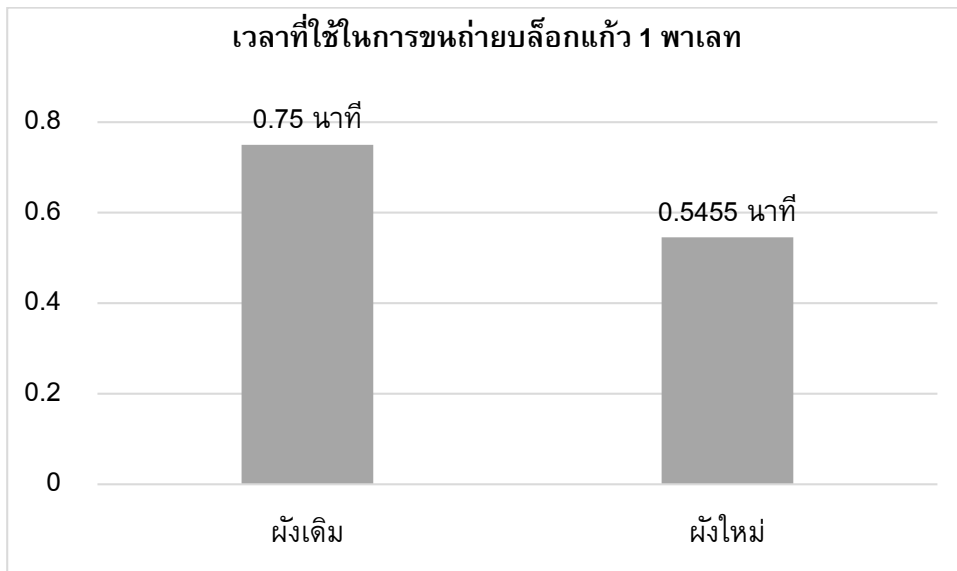
4. ผลการดำเนินงานวิจัย

การออกแบบการจัดวางผังคลังสินค้าแบบใหม่ จะใช้ระบบการจัดเก็บแบบกำหนดตำแหน่งตายตัว ซึ่งจะกำหนดตำแหน่งการจัดเก็บบล็อกแก้วตามปริมาณความต้องการขายหรือตามความถี่ในการเข้าออก กลุ่มที่มีปริมาณความต้องการของตลาดสูงหรือมีความถี่ในการเข้าออกสูงจะอยู่ใกล้ประตูทางเข้าออกของกลุ่มที่มีปริมาณความต้องการของตลาดปานกลางหรือมีความถี่ในการเข้าออกปานกลางจะอยู่ถัดมา และกลุ่มที่มีปริมาณความต้องการของตลาดต่ำหรือมีความถี่ในการเข้าออกต่ำจะอยู่ด้านในสุดของคลังสินค้า ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การออกแบบการจัดวางผังคลังสินค้าแบบใหม่

หลังจากนั้นทำการจำลองสถานการณ์การขนถ่ายบล็อกรถบรรทุกของคลังสินค้าแบบใหม่นี้ โดยใช้ เวลาในการจำลองสถานการณ์ทั้งสิ้น 1 เดือน พบว่าสามารถขนถ่ายบล็อกรถบรรทุกได้ 79,200 พาเลท คิด เป็น 110 พาเลทต่อชั่วโมง หรือคิดเป็น 0.5455 นาทีต่อพาเลท ซึ่งลดลงจากฝั่งคลังสินค้าแบบเดิม 0.2045 นาทีต่อพาเลท เมื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ 1 จะได้ว่าร้อยละความแตกต่างเท่ากับ 27.27 เวลาที่ใช้ในการขนถ่ายบล็อกรถบรรทุก 1 พาเลทก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการขนถ่ายบล็อกรถบรรทุก 1 พาเลท

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการจำลองสถานการณ์ พบว่าเวลาที่ใช้ในการขนถ่ายบล็อกรถบรรทุกลดลงจาก 0.75 นาทีต่อพาเลทเหลือ 0.5455 นาทีต่อพาเลท หรือลดลง 0.2045 นาที คิดเป็นร้อยละ 27.27 ซึ่งเวลาดังกล่าวอยู่ใน KPI ที่โรงงานได้กำหนดไว้ ถ้าโรงงานนางานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้จริง จะสามารถลดเวลาในการขนถ่ายบล็อกรถบรรทุกออกจากคลังสินค้า ซึ่งจะส่งผลให้ระดับความพึงพอใจของลูกค้าสูงขึ้น จากการขนส่งสินค้าไปยังลูกค้าไปตรงเวลา นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนที่เกิดขึ้นจากค่าปรับในการส่งของช้า และยังสามารถลดค่าน้ำมันของรถฟอร์คลิฟท์ได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษาที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูล และสละเวลาในการให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยเป็นอย่างสูงในนางานวิจัยนี้

References

- [1] Kingkarn Phalika and Noppadol Suwannasap. Inventory management by applying the theory of ABC classification analysis, EOQ model techniques and Silver-Method: a case study of XYZ. Phranakhon Rajabhat Research Journal (Humanities and Social Sciences) 2016;11:102-14. (In Thai)
- [2] Achira Metharutchatakul. Increasing efficiency of warehouse management: a case study of automotive part company [master thesis]. Chonburi: Burapha University; 2014. (In Thai)
- [3] Sunantha Siricharoenwat. The increasing of warehouse management efficiency: a case study of Phumthai Comsys co., ltd. [dissertation]. Bangkok: University of the Thai Chamber of Commerce; 2012. (In Thai).
- [4] Jaguar P. Optimizing warehouse management [master thesis]. Christchurch: Lincoln University; 2015.
- [5] Chu CW, Liang GS, Liao CT. Controlling inventory by combining ABC analysis and fuzzy classification. Computers & Industrial Engineering 2008;55:841-51.
- [6] Millstein MA, Yang L, Li H. Optimizing ABC inventory grouping decisions. International Journal of Production Economics 2014;148:71-80.
- [7] Ng WL. A simple classifier for multiple criteria ABC analysis. European Journal of Operational Research 2007;177:344-53.
- [8] Chen Y, Li KW, Kilgour DM, Hipel KW. A case-based distance model for multiple criteria ABC analysis. Computers & Operations Research 2008;35:776-96.
- [9] Yu MC. Multi-criteria ABC analysis using artificial-intelligence-based classification techniques. Expert Systems with Applications 2011;38:3416-21.
- [10] Li F, Xlanyi G, Xin M. On reasons of uncontrollable construction cost based on the ABC analysis method and the complete decomposition model. Systems Engineering Procedia 2012;4:359-65.
- [11] Malmborg CJ, Balachandran S, Kyle DM. A model based evaluation of a commonly used rule of thumb for warehouse layout. Applied Mathematical Modelling 1986;10:133-8.
- [12] Lee MK, Elsayed EA. Optimization of warehouse storage capacity under a dedicated storage policy. International Journal of Production Research 2005;43:1785-805
- [13] Fumi A, Scarabotti L, Schiraldi MM. Minimizing warehouse space with a dedicated storage policy. International Journal of Engineering Business Management 2013;5:1-8.

- [14] De Koster R, Le-Duc T, Roodbergen KJ. Design and control of warehouse order picking: a literature review. *European Journal of Operational Research* 2007;182:481-501.
- [15] Huihui S, Xiaoxia M, Xiangguo M. Simulation and optimization of warehouse operation based on Flexsim. *Journal of Applied Science and Engineering Innovation* 2016;3:125-8.
- [16] Klodowski M, Jacyna M, Lewczuk K, Wasiak M. The issues of selection warehouse process strategies. *Procedia Engineering* 2017;187:451-7.
- [17] Samattapong N. An efficiency improvement in warehouse operation using simulation analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2017;273:1-6.
- [18] Zhu X, Zhang R, Chu F, He Z, Li J. A Flexsim-based optimization for the operation process of cold-chain logistics distribution centre. *Journal of Applied Research and Technology* 2014;12:270-8.
- [19] Pawlewski P, Dabrowska PH, Marchado MEFHS. Warehouse process optimization based on simulation experiments - case study. *Proceedings of the 24th International Conference on Production Research*; 2017 July 30 - Aug 3; Poznan, Poland.
- [20] Pan JCH, Wu MH, Chang WL. A travel time estimation model for a high-level picker-to-part system with class-based storage policies. *European Journal of Operational Research* 2014;237:1054-66.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ชยุตม์ บรรเท็งจิตร, M.Eng. (Engineering Management) University of Wollongong, Australia วศ.บ. (วิศวกรรมอุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรมและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง
E-mail: chayut.b@eat.kmutnb.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: Industrial Robotics and Automation, Mathematical Modelling Optimization and Simulation, Economic Decision Analysis

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ
แบบตัวยู ประเภทที่ 1

A MATHEMATICAL MODEL FOR SOLVING THE U-SHAPED ASSEMBLY
LINE BALANCING PROBLEM OF TYPE 1

พูนธนะ ศรีสระคู¹ และ กฤต จันทรสมัย²

¹อาจารย์, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

439 ถ.จระ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.บุรีรัมย์ 31000, poontana.teay@gmail.com

²อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.

มหาสารคาม 44150, krit@msu.ac.th

Poontana SreSracoo¹ and Krit Chantarasamai²

¹Lecturer, Faculty of Industrial Technology, Buriram Rajabhat University

439 Jira Rd, Nai Mueang District, Amphoe Mueang Buri Ram, BuriRam 31000, Thailand,

poontana.teay@gmail.com

²Lecturer, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Khamriang District,

Kantarawichai City, Mahasarakham 44150, Thailand, krit@msu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ที่ใช้แก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู ประเภทที่ 1 (UALBP-1) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขของรอบเวลาการผลิตและลำดับงานก่อน-หลัง โดยใช้ชุดปัญหาของ Armin Scholl (1993) จำนวน 13 ชุดปัญหา ที่มีงานตั้งแต่ 7-53 งาน แต่ละชุดปัญหามีรอบเวลาการผลิตที่แตกต่างกัน ทำการจัดสมดุลสายการประกอบด้วยโปรแกรม Lingo V.11.0 พบว่า สามารถแก้ปัญหาและจัดสมดุลสายการประกอบได้จำนวนสถานีงานที่น้อยกว่าเมื่อเทียบผลลัพธ์จากชุดปัญหา Armin Scholl จำนวน 7 ปัญหา คิดเป็นร้อยละ 9 ได้จำนวนสถานีงานเท่ากัน 74 ปัญหา คิดเป็นร้อยละ 84 และไม่สามารถประมวลผลได้จำนวน 6 ปัญหา คิดเป็นร้อยละ 7

คำสำคัญ: ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ABSTRACT

This paper presents a mathematical model for solving the U-shaped assembly line balancing problem of type 1. The objectives of this study were to minimize the number of workstations, the cycle time of production and the precedence of tasks. The data set used in this study obtained from Armin Scholl (1993), totally 13 problems with 7-53 tasks, each with different cycle time. The Lingo V.11.0 was used to find the optimal solution. It was found that this program could solve problems and provided less number of workstations for 7 problems, approximately 9%, compared to the results from Armin Scholl. Seventy-four problems, about 84%, had equal number of workstations and six problems, approximately 7%, could not be solved.

KEYWORDS: U-shaped assembly line balancing problem, Mathematical Model

1. บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันอุตสาหกรรมไทยนั้นเริ่มขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว และอุตสาหกรรมในประเทศมีการแข่งขันสูงขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของธุรกิจระหว่างประเทศ ทำให้เกิดอุตสาหกรรมขึ้นมากมาย รวมถึงมีการเปิดประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน (Asian Economic Community; AEC) เพื่อที่จะตอบสนองความต้องการของลูกค้าให้ได้มากขึ้น ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมประสบกับปัญหาและความเสี่ยงต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้น ค่าแรงแรงงานขั้นต่ำ และภาวะเศรษฐกิจที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นโรงงานที่มีการบริหารจัดการที่ดีจึงได้เปรียบทางการค้ามากกว่า ซึ่งในโรงงานอุตสาหกรรมนั้น กระบวนการผลิตในสายงานการประกอบผลิตภัณฑ์ถือเป็นกิจกรรมหลักขององค์กรที่ทำให้เกิดมูลค่า จึงทำให้โรงงานอุตสาหกรรมพยายามพัฒนาสายการประกอบให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อที่จะลดต้นทุนการผลิตลง โดยรูปแบบการจัดสายการประกอบที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมรูปแบบหนึ่งคือการจัดสายการประกอบแบบตัวยู (U-Shaped Assembly Line Balancing Problem; UALBP) ซึ่งปัจจุบันมีผู้วิจัยหลายท่านนำเสนอวิธีการในการจัดสมดุลสายงานการประกอบแบบตัวยู (U-Shaped) หลากหลายวิธีการ เช่น [1] ใช้วิธีการ Branch and Bound (B&B) มาใช้สำหรับแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู ซึ่งเรียกวิธีการนี้ว่า ULINO (U-line optimizer) เพื่อลดจำนวนสถานีงาน หรือ รอบเวลาผลิต หรือ เพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งผลการเปรียบเทียบกับชุดปัญหาการทดสอบ พบว่า วิธี ULINO ให้คำตอบที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู [2] ได้ประยุกต์วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) เพื่อนำมาแก้ปัญหาการสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู ประเภทที่ 1 (UALBP-1) และทำการเปรียบเทียบกับค่า

คำตอบที่ดีที่สุดของงานวิจัยที่ผ่านมา ผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นว่า วิธีการ GA สามารถหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด หรือคำตอบที่ใกล้เคียงได้ในรอบแรกๆของการทดลอง [3] ได้นำเสนอวิธีเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest route formulation) ในการแก้ปัญหาการสมดุลงานแบบตัวยู ซึ่งวิธีการดังกล่าว เป็นวิธีการใหม่ที่สามารถนำไปพัฒนาต่อได้ [4] ได้นำเสนอวิธีระบบมดแม็กมิน (Max-Min Ant Colony) ร่วมกับวิธีโลคอลเสิร์ช (Local Search) ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุสายการประกอบแบบเส้นตรงและตัวยู โดยในการแก้ปัญหาการจัดสมดุสายการประกอบแบบตัวยู ได้ทำการทดลองในชุดปัญหาตัวอย่างขนาดกลางที่มี 21-45 งาน และชุดปัญหาตัวอย่างบางส่วนที่เป็นปัญหาขนาดใหญ่มี 75-297 งาน จากการวิจัยสรุปผลได้ว่าวิธีระบบมดแม็กมิน ที่พัฒนาขึ้นเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีฮิวริสติก และวิธี Maximum Ranked Positional Weight heuristic (Max. RPW) [5] และ [6] เสนอการจัดสมดุสายการประกอบแบบตัวยู ด้วยวิธีการอบอุ่น (Simulated Annealing; SA) กับปัญหาขนาดใหญ่ พบว่า วิธี SA สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมในช่วงเวลา 0.5 ชั่วโมงถึง 1.5 ชั่วโมง [7] นำเสนอวิธี Maximum Task Time, วิธี Minimum Task Time, วิธี Maximum Ranked Positional Weight (RPWmax) และ วิธี Greedy Randomized ในการจัดสมดุสายการประกอบแบบตัวยูของโรงงานเย็บผ้า ในการผลิตเสื้อยืดโมเดล 53287 เพื่อหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด และประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งผลการจัดสมดุสายการประกอบ พบว่า วิธี Maximum Task Time และ วิธี Greedy Randomized ให้คำตอบที่ดีที่สุดโดยสามารถลดจำนวนสถานีงานจาก 17 สถานีงานเหลือ 11 สถานีงาน และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพสายการประกอบได้จาก 55.48% เป็น 85.75% และ [8] ที่นำเสนอการจัดสมดุสายงานการประกอบแบบตัวยู ด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm; GA) ร่วมกับระบบมดแม็กมิน (Max-Min Ant System; MMAS) พบว่า สามารถลดค่าความแปรปรวนของภาระงานในทุกปัญหา เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Line; COMSOAL

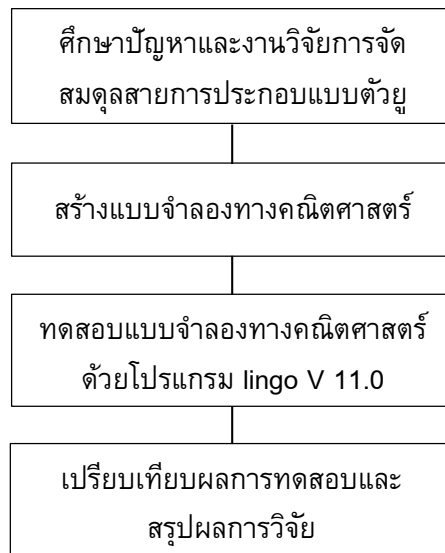
จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าการแก้ปัญหาการจัดสมดุสายการประกอบแบบตัวยู ประเภทที่ 1 (UALBP-1) มีผู้วิจัยได้นำหลักการหลากหลายวิธีมาใช้งานการจัดสมดุสายการประกอบ เช่น วิธีการ Branch and Bound (B&B), วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA), วิธีเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest route formulation), วิธีระบบมดแม็กมิน (Max-Min Ant Colony) วิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm; GA) เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีการที่กล่าวมาจะมีขั้นตอนในการหาคำตอบที่แตกต่างและซับซ้อนต่างกันออกไป แต่มีวิธีการจัดสมดุสายการประกอบวิธีการหนึ่งคือ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Modeling) เป็นเทคนิคที่มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวาง สำหรับบริหารงานทางด้านต่างๆ เช่น การวิเคราะห์เชิงปริมาณ และการวิจัยเชิงปฏิบัติการ เนื่องจากผู้บริหารและผู้เชี่ยวชาญส่วนใหญ่ไม่มีความชำนาญด้าน Optimization หรือ

Simulation จึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดที่จะใช้เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ
ได้

ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาเพื่อแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู ประเภทที่ 1 (U-Shape Assembly Line Balancing Problem Type 1: UALBP-1) กรณีทราบค่ารอบเวลาการผลิต (C) และลำดับงานก่อน-หลัง เพื่อหาจำนวนสถานีงาน (M) น้อยที่สุด โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และประมวลผลแบบจำลองด้วยโปรแกรม Lingo V 11.0 เพื่อวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการวางแผนการดำเนินงานการวิจัยในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายงานการประกอบแบบตัวยู เพื่อให้ได้จำนวนสถานีน้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดของรอบการผลิต (Cycle time) และการลำดับงานก่อนหลัง (Precedence Diagram) สามารถกำหนดขั้นตอนในการดำเนินงานได้ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วิธีการดำเนินวิจัย

2.1 ศึกษาปัญหาและงานวิจัยการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู ประเภทที่ 1

ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยูประเภทที่ 1 (UALBP-1) กรณีทราบค่ารอบเวลาการผลิต (C) และลำดับงานก่อน-หลัง เพื่อหาจำนวนสถานีงาน (M) ที่น้อยที่สุด โดยจะเริ่มศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศและงานวิจัยต่างประเทศ

เพื่อที่จะกำหนดขอบเขตของการวิจัย วัตถุประสงค์ และเงื่อนไขที่ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบ

2.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อทำการศึกษารูปแบบของการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวคูณ ประเภทที่ 1 แล้วผู้วิจัย จะทำการสร้างสมการวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไขของปัญหาขึ้น โดยวัตถุประสงค์ของปัญหาคือ เพื่อหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขของงานทั้งหมดถูกกำหนดให้กับสถานีงาน แต่ละงานจะได้ถูกจัดอยู่ในสถานีงานเพียงสถานีงานเดียว โดยทำการตรวจสอบให้แน่ใจว่าการทำงานของสถานีใด ๆ ต้องไม่เกินรอบเวลาการผลิต และเงื่อนไขของงานก่อน-หลัง จะไม่ขัดแย้งต่อโครงข่ายเดิมและโครงข่ายเสมือน

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวคูณ ประเภทที่ 1 กำหนดตัวแปรได้ดังนี้

C คือ รอบเวลาในการผลิต

N คือ จำนวนงาน

M_{max} คือ จำนวนสถานีงานที่เราจำเป็นต้องทราบ โดยที่ j สถานีงานจะถูกเลือกตั้งแต่ $j = 1, 2, \dots, M_{max}$

T_i คือ เวลาการทำงานของแต่ละงาน $i = 1, 2, \dots, N$

P คือ เป็นชุดของคู่สังของงานที่แสดงความสัมพันธ์ของงานก่อนหน้า

X_{ij} เท่ากับ 1 คืองาน i จะถูกกำหนดให้อยู่ในสถานีงาน j โดยเป็นงานไปข้างหน้า
เท่ากับ 0 คือกรณีอื่นๆ

Y_{ij} เท่ากับ 1 คืองาน i จะถูกกำหนดให้อยู่ในสถานีงาน j โดยเป็นงานย้อนกลับ
เท่ากับ 0 คือกรณีอื่นๆ

Z_j เท่ากับ 1 คือถ้าสถานี j ถูกใช้งานแล้ว i คือ งานที่ได้ถูกกำหนดให้ทำงานในสถานี j
เท่ากับ 0 คือกรณีอื่นๆ

สมการวัตถุประสงค์:

$$\text{Minimize } \sum_{j=1}^{m_{max}} Z_j \quad (1)$$

ภายใต้เงื่อนไข :

$$\sum_{j=1}^{m_{max}} (x_{ij} + y_{ij}) = 1 \text{ for } i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{m_{max}} t_i(x_{ij} + y_{ij}) \leq Cz_j \text{ for } j = 1, \dots, [m_{max}] \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{max}} (m_{max} - j + 1)(x_{rj} - x_{ri}) \geq 0 \text{ for all } (r, s) \in P \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{max}} (m_{max} - j + 1)(y_{rj} - y_{ri}) \geq 0 \text{ for all } (r, s) \in P \quad (5)$$

$$x_{ij}, y_{ij}, z_j \in [1, 0] \text{ for all } i, j$$

สมการ (1) เป็นสมการวัตถุประสงค์ เพื่อหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด สมการ (2) จะแสดงว่างานทั้งหมดถูกกำหนดให้กับสถานีงาน และแต่ละงานจะได้ถูกจัดอยู่ในสถานีงานเพียงสถานีงานเดียว สมการ (3) จะเป็นการตรวจสอบให้แน่ใจว่าการทำงานของสถานีใด ๆ ต้องไม่เกินรอบเวลาการผลิต สมการ (4) และ (5) ตรวจสอบให้แน่ใจว่าเงื่อนไขของงานก่อน-หลัง จะไม่ขัดแย้งต่อโครงข่ายเดิมและโครงข่ายเสมือน

2.3 ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว ผู้วิจัยจะทำการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัว ยู่ ประเภทที่ 1 ด้วยโปรแกรม Lingo V 11.0 ดังรูปที่ 2 โดยใช้ข้อมูลชุดปัญหา [9] จาก www.assembly-line-balancing.de จำนวน 13 ชุดปัญหา ที่มีงานตั้งแต่ 7-53 งาน ดังตารางที่ 1 มาทำการทดสอบ จากนั้นผู้วิจัยจะนำผลการจัดสมดุลสายการประกอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจัดสมดุลสายการประกอบของชุดปัญหา เพื่อดูจำนวนสถานีงาน ของการจัดสมดุลสายการประกอบว่ามีจำนวนสถานีงาน ที่แตกต่างกับชุดปัญหามากน้อยเพียงใด

ตารางที่ 1 ชุดปัญหาของ Armin Scholl

ชุดปัญหา	จำนวนงาน	เวลางานน้อยที่สุด	เวลางานมากที่สุด	เวลางานรวม
Mertens	7	1	6	29
Bowman	8	3	17	75
Jaeschke	9	1	6	37
Jackson	11	1	7	46
Mansoor	11	2	45	185

ตารางที่ 1 ชุดปัญหาของ Armin Scholl (ต่อ)

ชุดปัญหา	จำนวนงาน	เวลาดำเนินงานน้อยที่สุด	เวลาดำเนินงานมากที่สุด	เวลารวม
Mitchell	21	1	13	105
Heskiaoff	28	1	108	1024
Buxey	29	1	25	324
Sawyer	30	1	25	324
Luzt1	32	100	1400	14140
Gunther	35	1	40	483
Kilbridge	45	3	55	557
Hahn	53	40	1775	14026

จากตารางที่ 1 แสดงถึงขนาดปัญหาทั้ง 13 ชุดปัญหาที่มีจำนวนงานตั้งแต่ 7 - 53 งาน ที่แสดงจำนวนงาน เวลาสูงสุดของงาน เวลาต่ำสุดของงาน และเวลารวมของงานที่แตกต่างกัน โดยจะใช้เป็นข้อมูลในการทดสอบและเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับชุดปัญหา

```

MODEL :
SETS:
    TASK/@file('case study.txt')/:T;
    PRED(TASK,TASK)/@file('case study.txt')/;
    STATION/1..20/;
    TXS(TASK,STATION):X;
    TYS(TASK,STATION):Y;
    TZS(STATION):Z;
ENDSETS
DATA:
    T = @file('case study.txt');
    CYCTIME = @file('case study.txt');
    MMAX=20;
ENDDATA
MIN=@SUM(STATION(J):Z(J));
@FOR(TASK(I):@SUM(STATION(J):(X(I,J)+Y(I,J)))=1);
@FOR(STATION(J):@SUM(TXS(I,J):T(I)*X(I,J))+
    @SUM(TYS(I,J):T(I)*Y(I,J))<=CYCTIME*Z(J));
@FOR(PRED(r,s):@SUM(STATION(J):(MMAX-J+1)*(X(r,J)-X(s,J)))>=0);
@FOR(PRED(r,s):@SUM(STATION(J):(MMAX-J+1)*(Y(s,J)-Y(r,J)))>=0);
@FOR(TXS:@BIN(X));
@FOR(TYS:@BIN(Y));
@FOR(TZS:@BIN(Z));
END
    
```

รูปที่ 2 การจัดสมดุลสายการประกอบด้วยโปรแกรม Lingo

3. ผลการวิจัย

เมื่อนำข้อมูลชุดปัญหาของ Armin Scholl มาจำนวน 13 ชุดปัญหา ที่มีจำนวนงาน เวลาของการทำงาน และรอบเวลาการผลิตที่แตกต่างกัน มาจัดสมดุสลายการประกอบด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรม Lingo V 11.0 เพื่อหาจำนวนสถานีงานที่น้อยที่สุด ซึ่งผลการจัดสมดุสลายการประกอบแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการจัดสมดุสลายการประกอบแบบตัวยุุ ประเภทที่ 1

ชุดปัญหา	รอบเวลาการผลิต	จำนวนสถานีงาน		เวลาในการประมวลผล (ชั่วโมง:นาที:วินาที)	ผลการเปรียบเทียบ (%)
		ชุดปัญหา	โปรแกรม Lingo		
Mertens	6	6	6	0:00:01	0.00%
	7	5	5	0:00:00	0.00%
	8	5	5	0:00:00	0.00%
	10	3	3	0:00:00	0.00%
	15	2	2	0:00:00	0.00%
	18	2	2	0:00:00	0.00%
Bowman	20	4	4	0:00:01	0.00%
Jaeschke	6	8	8	0:00:01	0.00%
	7	7	7	0:00:00	0.00%
	8	6	6	0:02:13	0.00%
	10	4	4	0:00:00	0.00%
	18	3	3	0:00:00	0.00%
Jackson	7	7	7	0:00:00	0.00%
	9	6	6	0:00:00	0.00%
	1	5	5	0:00:00	0.00%
	13	4	4	0:00:01	0.00%
	14	4	4	0:00:00	0.00%
	21	3	3	0:00:01	0.00%

ตารางที่ 2 ผลการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู ประเภทที่ 1 (ต่อ)

ชุดปัญหา	รอบเวลา การผลิต	จำนวนสถานีงาน		เวลาในการ ประมวลผล (ชั่วโมง:นาที:วินาที)	ผลการ เปรียบเทียบ (%)
Mansoor	48	4	4	0:00:00	0.00%
	62	3	3	0:00:00	0.00%
	94	2	2	0:00:00	0.00%
Mitchell	14	8	8	0:00:01	0.00%
	15	8	7	0:25:47	-12.50%
	21	5	5	0:00:01	0.00%
	26	5	5	0:00:00	0.00%
	35	3	3	0:00:00	0.00%
	39	3	3	0:00:01	0.00%
Heskiaoff	138	8	8	0:00:01	0.00%
	205	5	5	0:00:08	0.00%
	216	5	5	0:00:00	0.00%
	256	4	4	0:00:00	0.00%
	324	4	4	0:00:00	0.00%
	342	3	3	0:00:01	0.00%
Buxey	27	13	*	*	*
	30	11	11	0:36:59	0.00%
	33	10	*	*	*
	36	9	*	*	*
	41	8	8	0:00:04	0.00%
	47	7	7	0:00:18	0.00%
	54	6	6	0:00:21	0.00%

ตารางที่ 2 ผลการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู ประเภทที่ 1 (ต่อ)

ชุดปัญหา	รอบเวลา การผลิต	จำนวนสถานีงาน		เวลาในการ ประมวลผล (ชั่วโมง:นาที:วินาที)	ผลการ เปรียบเทียบ (%)
Sawyer	25	14	13	0:00:34	-7.14%
	27	13	12	0:00:14	-7.69%
	30	11	11	0:02:18	0.00%
	33	10	10	0:00:10	0.00%
	36	9	9	1:57:20	0.00%
	41	8	8	0:00:03	0.00%
	47	7	7	0:00:05	0.00%
	54	6	6	0:04:05	0.00%
	75	5	5	0:00:01	0.00%
Luzt1	1414	11	11	0:00:02	0.00%
	1572	10	10	0:10:09	0.00%
	1768	9	*	*	*
	2020	8	*	*	*
	2357	7	7	0:00:02	0.00%
	2828	6	*	*	*
Gunther	41	12	11	0:00:20	-8.30%
	44	12	12	1:01:52	0.00%
	49	10	10	0:13:17	0.00%
	54	9	9	0:00:06	0.00%
	61	8	8	0:03:14	0.00%
	69	7	7	0:08:42	0.00%
	81	6	6	0:00:12	0.00%

ตารางที่ 2 ผลการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู ประเภทที่ 1 (ต่อ)

ชุดปัญหา	รอบเวลา การผลิต	จำนวนสถานีงาน		เวลาในการ ประมวลผล (ชั่วโมง:นาที:วินาที)	ผลการ เปรียบเทียบ (%)
Kilbridge	56	10	10	0:00:01	0.00%
	57	10	10	0:00:01	0.00%
	62	9	9	0:00:02	0.00%
	69	8	8	0:00:39	0.00%
	79	7	7	0:00:05	0.00%
	92	6	6	0:00:14	0.00%
	110	6	6	0:00:02	0.00%
	111	5	5	0:00:14	0.00%
	138	4	4	0:00:03	0.00%
	184	3	3	0:00:01	0.00%
Hahn	2004	8	7	0:00:36	-12.50%
	2338	7	6	0:00:03	-14.30%
	2806	5	5	0:00:04	0.00%
	3507	5	4	0:00:05	-20.00%
	4676	3	3	0:00:03	0.00%

หมายเหตุ: เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนแบบจำลองกับชุดปัญหาคิดจาก

$$\frac{(\text{จำนวนสถานีงานจาก Lingo}) - (\text{จำนวนสถานีงานจากชุดปัญหา})}{(\text{จำนวนสถานีงานจากชุดปัญหา})} \times 100$$

* คือ ไม่สามารถประมวลผลได้

- คือ เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจำนวนสถานีงานของแบบจำลองที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปัญหา

จากตารางที่ 2 แสดงผลการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู ประเภทที่ 1 ที่นำมาทำการทดสอบทั้งหมด 13 ชุดปัญหา ซึ่งแต่ละปัญหามีรอบเวลาการผลิตที่แตกต่างกัน พบว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบโดยประมวลผลด้วยโปรแกรม Lingo V.11.0 สามารถจัดสมดุลสายการประกอบได้จำนวนสถานีงานที่น้อยกว่าปัญหาอยู่ 7 ปัญหา ได้จำนวน

สถานงานเท่ากับปัญหาจำนวน 70 ปัญหาและปัญหาที่ไม่สามารถประมวลผลได้จำนวน 6 ปัญหา และเมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจัดสมดุลสายการประกอบ พบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์สามารถจัดสมดุลสายการประกอบได้จำนวนสถานงานที่น้อยที่สุดเทียบเท่ากับวิธีการเมตาฮิวริสติก [4] ในปัญหาชุดเดียวกัน แต่เมื่อนำแบบจำลองคณิตศาสตร์ประมวลผลด้วยโปรแกรม Lingo V.11.0 พบว่า ไม่สามารถจัดสมดุลสายการประกอบในปัญหาที่มีจำนวนงานมากกว่า 53 งานได้ ซึ่งใช้เวลาในการประมวลผลนานสำหรับปัญหาที่มีงานก่อนหน้าจำนวนมากและความสัมพันธ์ของงานในโครงข่ายงานที่ซับซ้อน

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ที่ใช้แก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบแบบตัวยู ประเภทที่ 1 (UALBP-1) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนสถานงานที่น้อยที่สุด ภายใต้เงื่อนไขของรอบเวลาการผลิตและลำดับงานก่อน-หลัง โดยใช้ชุดปัญหาของ Armin Scholl จำนวน 13 ชุดปัญหา จาก www.assembly-line-balancing.de ที่มีงานตั้งแต่ 7-53 งาน แต่ละชุดปัญหามีรอบเวลาการผลิตที่แตกต่างกัน มาทำการจัดสมดุลสายการประกอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในโปรแกรม Lingo V.11.0 ซึ่งผลการจัดสมดุลสายการประกอบ พบว่า สามารถแก้ปัญหาและจัดสมดุลสายการประกอบได้จำนวนสถานงานที่น้อยกว่าเมื่อเทียบผลลัพธ์จากชุดปัญหา Armin Scholl จำนวน 7 ปัญหา คิดเป็นร้อยละ 9 ได้จำนวนสถานงานเท่ากับ 74 ปัญหา คิดเป็นร้อยละ 84 และไม่สามารถประมวลผลได้จำนวน 6 ปัญหา คิดเป็นร้อยละ 7 และเมื่อทำการวิเคราะห์ข้อจำกัดของโปรแกรม พบว่า ไม่สามารถจัดสมดุลสายการประกอบในปัญหาที่มีจำนวนงานมากกว่า 53 งานได้ และใช้เวลาในการประมวลผลนานสำหรับปัญหาที่มีงานก่อนหน้าจำนวนมากและความสัมพันธ์ของงานในโครงข่ายงานที่ซับซ้อน จากปัญหาดังกล่าวอาจต้องพัฒนาวิธีฮิวริสติก (Heuristics) หรือ เมตาฮิวริสติก (Metaheuristic) ร่วมกับการเขียนโปรแกรมเข้ามาช่วยในการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีจำนวนงานมากกว่า 53 งาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้ใช้โปรแกรม Lingo V.11 ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

References

- [1] Scholl A, Klein R. ULINO: optimally balancing U-Shaped JIT assembly lines. International of Production Research 1999;37:721-36.

- [2] Martinez U, William S. Duff. Heuristic approached to solve the U-shaped line balancing problem augmented by genetic algorithms. Proceedings of the 2004 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium; 2004 April 16; Charlottesville, United Stated. 2004. p.287-93.
- [3] Gokcen H. A shortest route formulation of simple U-type assembly line balancing problem. Applied Mathematical Modelling 2005;29:373-80.
- [4] Nuchsa Kriengkarakot. Metaheuristic Approach for assembly line balancing problem. [Thesis]. Ubonratchatani, Ubonratchatani University; 2550. (In Thai)
- [5] Jayaswal S, Agarwal P. Balancing U-shaped assembly lines with resource dependent task times: A Simulated Annealing approach. Journal of Manufacturing Systems 2014;33:522-34.
- [6] Miltenburg G.J, Wijngaard J. The U-line line balancing problem. Management Sciences 1994;40:1378-88.
- [7] Kriengkarakot N, Kriengkarakot P. Heuristics comparison for u-shaped assembly line balancing in the apparel factory. KKU Engineering Journal 2014;41:155-62.
- [8] Amonpong Sa-nguansin and Jakrawarn Kunadilok. Heuristic method for workload variance reduction in U-shaped assembly line balancing. Thai Journal of Operations Reseach 2557;2:11-21. (In Thai)
- [9] Scholl A. Data of Assembly Line Balancing Problems. [Internet]. 1993 [cited 2017 December 21];16-28. Available from: <http://www.assembly-line-balancing.de/>

ประวัติผู้เขียนบทความ



พูนธนะ ศรีสระคู อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ
อุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราช
ภัฏบุรีรัมย์ ที่อยู่ 439 ถนนจระ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์
รหัสไปรษณีย์ 31000 เบอร์โทรศัพท์ 086-2285472

E-Mail. poontana.teay@gmail.com



กฤต จันทรสมัย อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทร
วิชัย จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44150 เบอร์โทรศัพท์ 089-
7116906 E-mail. Krit@msu.ac.th

ผลของการเตรียมหัวเชื้อด้วยสภาวะที่เป็นกรดต่อการรอดชีวิตของ
Lactobacillus casei ในสภาวะกรดและในน้ำผลไม้จำลอง
EFFECT OF ACIDIC ADAPTATION ON VIABILITY OF LACTOBACILLUS
CASEI IN ACIDIC CONDITION AND MODEL FRUIT JUICE

ปรมาภรณ์ เกิดทรัพย์¹ และ วรากร เกิดทรัพย์²

¹อาจารย์, คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
63 หมู่ 7 ต.องครักษ์ อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120, paramapornk@g.swu.ac.th

²อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 1761 ถ.พัฒนาการ สวนหลวง
กรุงเทพฯ 10250, warakorn.ker@kbu.ac.th

Paramaporn Kerdsup¹ and Warakorn Kerdsup²

¹Lecturer, Faculty of Agricultural Product Innovation and Technology, Srinakharinwirot
University 63 Moo 7 Ongkharak Nakhonnayok 26120, Thailand, paramapornk@g.swu.ac.th

²Lecturer, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University 1761 Pattanakarn Rd.
Suanluang Bangkok 10250, Thailand, warakorn.ker@kbu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมหัวเชื้อโพรไบโอติกส์ด้วยกรดอินทรีย์และอนินทรีย์ และติดตามความสามารถในการรอดชีวิตของโพรไบโอติกส์ในสภาวะกรดในกระเพาะอาหารและในน้ำผลไม้จำลอง จากการศึกษพบว่า ในสภาวะการเตรียมหัวเชื้อที่มีค่า pH เท่ากัน การใช้กรดไฮโดรคลอริกซึ่งเป็นกรดอนินทรีย์ในการเตรียมหัวเชื้อทำให้ *Lactobacillus casei* สามารถทนต่อสภาวะที่มีกรดซिटริกเป็นส่วนประกอบและสภาวะน้ำผลไม้จำลองได้ดีขึ้น แต่ในสภาวะที่มีกรดมาลิกเป็นส่วนประกอบหลักกลับพบว่าการเตรียมหัวเชื้อด้วยกรดอินทรีย์จะทำให้ *L. casei* สามารถทนความเป็นกรดได้มากกว่า ส่วนการทดสอบการทนกรดในสภาวะกระเพาะอาหารจำลองพบว่าการเตรียมเซลล์โพรไบโอติกส์ด้วยกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ให้ผลไม่แตกต่างกัน จากการตรวจสอบปริมาณน้ำตาลและกรดที่ถูกใช้ไปในสารละลายที่ใช้ในการเตรียมเซลล์พบว่า ในสารละลายสำหรับเตรียมเซลล์ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นส่วนประกอบจะพบการใช้น้ำตาลของเชื้อที่ต่ำกว่าในสารละลายสำหรับเตรียมเซลล์ที่ใช้กรดอินทรีย์เป็นส่วนประกอบอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการแสดงออกของเซลล์ที่ต่างกัน และกลไกการตอบสนองต่อกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ที่ต่างกันของเซลล์

คำสำคัญ: โพรไบโอติกส์ น้ำผลไม้จำลอง

ABSTRACT

This research aims to study the adaptation of probiotic bacteria with organic and inorganic acid to monitor the survival of probiotics in acidic conditions, the condition found in stomach and in simulated fruit juice. According to the studies, it has been found that, adaption of the cell with hydrochloric acid, and inorganic acid, promoted the acid resistance of *Lactobacillus casei* in citric acid solution and in simulated fruit juice. In the condition that malic acid was the main acid component, the cell adaptation with organic acid causes more acid tolerance of the cell. However, preparation of the cell with organic and inorganic acid showed the same acid tolerance of the *Lactobacillus* in simulated stomach condition. The sugar content in the adapted solution was determined and found that in hydrochloric acid adjusted solution, sugar utilization of the cells was significantly lower than in the organic acid adjusted solution. This indicates the cell adaption process and the response mechanism of the cell to organic and inorganic acid were not the same.

KEYWORDS: probiotics, model fruit juice

1. บทนำ

โพรไบโอติกส์ หมายถึงจุลินทรีย์ที่มีชีวิตที่มีความสามารถในการทนกรดในกระเพาะอาหาร และผ่านเข้าสู่ลำไส้เล็กได้ และช่วยปรับสมดุลในระบบลำไส้ของผู้บริโภค [1] สายพันธุ์ของจุลินทรีย์ที่ถือว่าเป็นโพรไบโอติกส์ที่ดีโดยทั่วไป ได้แก่ *Lactobacilli* และ *Bifidobacteria* [2] โพรไบโอติกส์แบบที่เรียเป็นแบคทีเรียที่ก่อประโยชน์ให้กับเจ้าบ้านเมื่อรับประทานเข้าไปในปริมาณที่มากเพียงพอ [3] ส่วนใหญ่แล้วโพรไบโอติกส์แบบที่เรียจะถูกประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์นมโดยใช้ในรูปของหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับการหมักหรือเพียงแค่เติมลงไปในการผลิตผลิตภัณฑ์ก็ได้

เดิมนั้นเชื้อโพรไบโอติกส์มักจะถูกเติมหรือใช้เป็นส่วนประกอบของหัวเชื้อในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์นมหมัก เช่น โยเกิร์ต เนยแข็ง รวมทั้ง เนย [4] ซึ่งผู้บริโภคที่แพ้นมหรือมีอาการ lactose intolerant ไม่สามารถรับประทานผลิตภัณฑ์จากนมได้เนื่องจากอาการดังกล่าวเกิดจากการขาดเอนไซม์ย่อยแลคโตส และยังไม่มีการค้นพบวิธีการรักษาที่ได้ผลแน่นอน การดูแลผู้ที่มีอาการดังกล่าวจึงต้องอาศัยการควบคุมอาหารเป็นหลัก [5] ต่อมาจึงได้มีการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเสริมโพรไบโอติกส์มากขึ้นโดยใช้วัตถุดิบหลักอื่นๆ นอกเหนือจากนมในการผลิตโพรไบโอติกส์ บางสายพันธุ์

ในทางอุตสาหกรรม *Lactobacillus casei* ได้ถูกนำมาใช้เป็นโพรไบโอติกส์อย่างแพร่หลาย โดยใช้เติมลงในอาหารหลากหลายชนิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์จากนม อย่างไรก็ตามก็ยังมี

ผู้บริโภคส่วนหนึ่งที่มีอาการแพ้นมวัวและไม่สามารถรับประทานนมได้ โดยเฉพาะในประเทศไทยซึ่งประชากรบางส่วนไม่ดื่มนม โดยวัยกลางคนและผู้สูงอายุของไทยไม่ดื่มนมถึงร้อยละ 77.7 ในจำนวนนี้มีผู้ที่ดื่มนมเป็นประจำมีต่ำกว่าร้อยละ 10 และประชากรไทยส่วนใหญ่บริโภคนมต่ำกว่าระดับมาตรฐานที่แนะนำ [6] น้ำผลไม้จึงเป็นทางเลือกหนึ่งของผู้ผลิตส่วนใหญ่หันมาให้ความสนใจเนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถรับประทานได้ทุกเพศทุกวัย อย่างไรก็ตามปัญหาหลักของการใช้น้ำผลไม้ไม่ใช่ว่าเป็นผลิตภัณฑ์หลักในการเสริมโปรไบโอติกส์คือความเป็นกรดที่สูงในน้ำผลไม้ ทำให้เซลล์โปรไบโอติกส์ที่มีชีวิตตายลงอย่างรวดเร็วระหว่างการเก็บรักษา จึงมีผู้วิจัยศึกษาความสามารถในการทนกรดและการเตรียมเซลล์โปรไบโอติกส์รูปแบบต่างๆ เพื่อให้จุลินทรีย์ที่มีประโยชน์นี้สามารถอยู่รอดในผลิตภัณฑ์ได้นานขึ้น

จุลินทรีย์ในกลุ่ม *Lactobacillus* มีความสามารถในการทนกรดได้มากกว่าจุลินทรีย์สายพันธุ์อื่นๆ โดยส่วนใหญ่ เนื่องจากมีกลไกธรรมชาติที่หลากหลายซึ่งสามารถป้องกันตัวเองจากการถูกทำลายจากกรด ได้แก่ กลไกในการรักษาสมดุลของ pH ระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ ซึ่งการเคลื่อนย้ายโปรตอนโดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์ ATPase หรือ H^+ -ATPase นั้นเป็นกลไกสำคัญอย่างหนึ่งที่จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการหมักหลายๆ ชนิดใช้ในการควบคุม pH ภายในเซลล์ด้วย [7-8] โดยสมบัติเอนไซม์ดังกล่าวนี้ที่พบใน *L. casei* และ *L. plantarum* จะทำงานได้ดีที่สุดที่ pH ประมาณ 5.0-5.5 ซึ่งต่ำกว่า pH ที่เหมาะสำหรับการทำงานของ H^+ -ATPase ที่พบในแบคทีเรียอื่นๆ โดยพบว่าใน pH ที่เหมาะสมในการทำงานของ H^+ -ATPase ใน *E. coli* และ *L. lactis* subsp. *lactis* อยู่ที่ 6.0 และ 7.0 ตามลำดับ [9-10] ซึ่งความสามารถในการทำงานของ H^+ -ATPase นี้จะส่งผลต่อการขนส่งโปรตอนออกจากไซโตพลาสซึมโดยรวม สำหรับ pH ที่ต่ำที่สุดที่ H^+ -ATPase ยังทำงานได้ใน *L. casei* และ *L. plantarum* ตรวจพบที่ pH 4.0 [11] ซึ่งแตกต่างจากสายพันธุ์แบคทีเรียที่มีความสามารถในการทนกรดต่ำ เช่น *Actinomyces viscosus* ที่พบการขับ pH ออกจากเซลล์ได้ต่ำสุดอยู่ที่ 6.0 [12] กลไกอย่างที่สองที่ทำให้เซลล์ของ *Lactobacillus* ทนต่อกรดได้ดีคือ Glutamate decarboxylation เป็นกระบวนการเปลี่ยนกรดอะมิโนกลูตาเมต (glutamate) ให้เป็น γ -aminobutyric acid (GABA) โดยการทำงานของเอนไซม์ glutamate decarboxylase (GAD) ซึ่งในกระบวนการจะมีการใช้โปรตอน (H^+) ร่วมด้วย เอนไซม์ GAD สามารถพบได้ทั่วไปในเซลล์ยูคาริโอตและโปรคาริโอต แต่จะมีหน้าที่แตกต่างกันไปในแต่ละชนิดของเซลล์ที่พบ สำหรับในจุลินทรีย์ GAD จะทำหน้าที่สำคัญในการต้านทานสภาวะที่เป็นกรดภายนอกเซลล์ โดยการเปลี่ยนกลูตาเมตซึ่งมีความเป็นกรดให้กลายเป็น GABA ที่มีความเป็นกรดต่ำกว่าจะเป็นการลดความเป็นกรดในระบบอีกทางหนึ่งนอกเหนือจากการดึงโปรตอนมาใช้ในปฏิกิริยา [13-14] ส่วนกลไกอย่างที่สองได้แก่ Arginine Deiminase Pathway (ADI) เป็นกระบวนการที่พบบ่อยในจุลินทรีย์ *Lactobacillus* โดยจะเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการแตกของโมเลกุล arginine

ได้เป็นแอมโมเนีย (NH_3) และสารประกอบอื่นๆ โดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์ 3 ชนิด ได้แก่ arginine deiminase, ornithine transcarbamoylase และ carbamate kinase โดยมีลำดับขั้นของการเกิดปฏิกิริยา 3 ขั้นตอน ตามลำดับของเอนไซม์ทั้งสาม โดย arginine 1 โมเลกุลจะทำให้เกิดแอมโมเนีย 2 โมเลกุล ซึ่งแอมโมเนียมีฤทธิ์เป็นด่าง จึงทำให้กลไกนี้เป็นกลไกสำคัญอันหนึ่งที่จะช่วยในการต้านทานต่อสภาวะกรดของจุลินทรีย์ได้ [15] จากงานวิจัยหลายๆ งานจะพบกระบวนการ ADI ใน *Lactobacillus* หลายสายพันธุ์ เช่น *L. sanfranciscensis*, *L. brevis* AM1, AM8, 10A, *L. hilgradii* 51B และ *L. fructivoran* [16] และกลไกสุดท้ายที่สำคัญและพบมากใน *Lactobacillus* ทุกสายพันธุ์ ได้แก่ การปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ เนื่องจากเยื่อหุ้มเซลล์แบคทีเรียเป็นส่วนสำคัญในการอยู่รอดของจุลินทรีย์ในสภาวะแวดล้อมต่างๆ โดยเฉพาะสภาวะที่ทำให้เซลล์เกิดความเครียด เช่น อุณหภูมิ แรงดันออสโมติก หรือค่า pH ที่ไม่เหมาะสม การที่จุลินทรีย์ต้องอยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมจะพบการเปลี่ยนแปลงการสังเคราะห์โปรตีนบางชนิดที่ส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของกรดไขมันในเยื่อหุ้มเซลล์ด้วย [17] กลไกการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวประกอบด้วย การเปลี่ยนอัตราส่วนไขมันอิ่มตัว ความยาวของสายคาร์บอน ตำแหน่งของกิ่งก้าน cis-trans isomerisation และการปรับเปลี่ยนกรดไขมันไม่อิ่มตัวไปเป็นกรดไขมันที่มีไซโคลโพรเพนเป็นส่วนประกอบในโมเลกุล (cyclopropane fatty acid) โดยการทำงานของเอนไซม์ cyclopropane fatty acid (CFA) synthase [18] แม้ว่าจะยังไม่มีคำอธิบายที่ชัดเจนเกี่ยวกับการทำงานหรือลักษณะทางเคมีกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปของเยื่อหุ้มเซลล์ที่ประกอบด้วย CFA ปริมาณสูง แต่มีรายงานวิจัยหลายงานยืนยันเป็นที่แน่ชัดว่าการสร้าง CFA เพิ่มขึ้นมีส่วนเกี่ยวข้องในการช่วยให้จุลินทรีย์หลายชนิดรอดชีวิตในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้ดีขึ้น เช่น *Escherichia coli* [19] *Salmonella* [20] และแบคทีเรียกลุ่ม *Lactobacillus* เป็นต้น จากรายงานของ Zavaglia และคณะในปี 2000 [21] พบว่าการเพิ่มขึ้นของ CFA ช่วยให้เยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์มีเสถียรภาพที่ดีขึ้นในด้านการเป็นเยื่อเลือกผ่าน แต่ยังไม่สามารถอธิบายกลไกได้แน่ชัด อย่างไรก็ตาม CFA เป็นสารประกอบที่มีความเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีมากกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งพบว่า CFA สามารถต้านทานต่อ ozonolysis และ oxidation ที่ไม่รุนแรงมากได้ดี จึงคาดว่าคุณสมบัติทางเคมี ของ CFA น่าจะเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยเสริมการรอดชีวิตมากกว่าสมบัติทางกายภาพ [18]

จากกลไกต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการทนกรดของจุลินทรีย์ในกลุ่ม *Lactobacillus* ได้มีการศึกษาเพิ่มเติมจำนวนมากถึงยีนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการต่างๆ และพบว่ามียีนที่หลากหลายที่เกี่ยวข้อง ซึ่งยีนส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องนั้นจะไม่ทำงานหากจุลินทรีย์อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม หรือในสภาวะที่ไม่มีความเป็นกรดสูงเกินไป อย่างไรก็ตามเมื่อจุลินทรีย์เริ่มอยู่ในภาวะที่เป็นกรด มันจะเริ่มปรับตัวและเริ่มเตรียมพร้อมในการต้านทานสภาวะดังกล่าว ในปี 1999 Rowbury และ Goodson [22] ได้ศึกษาโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับค่าความเป็นกรดของเชื้อ *E. coli* และพบว่าโปรตีนดังกล่าวจะทำงานโดยการตรวจวัด pH ภายนอกเซลล์ มิใช่ภายในเซลล์ ทำให้

จุลินทรีย์ที่มีระบบดังกล่าวสามารถตอบสนองต่อสภาวะที่เป็นกรดได้รวดเร็ว ส่งผลให้สามารถทนกรดได้ดีขึ้นด้วย ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะกระตุ้นจุลินทรีย์ให้มีความพร้อมในการทนกรดมากขึ้นด้วยการปรับ pH ภายนอกเซลล์ ต่อมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับเซลล์ที่อยู่ในสภาวะกรด ทั้งในด้านการสังเคราะห์โปรตีนและกรดไขมันที่เปลี่ยนแปลงไป และพบว่าโปรตีนที่สังเคราะห์ขึ้นโดย *Lactobacillus* ที่เจริญในสภาวะที่เป็นกรดจะมีความแตกต่างจากการเจริญที่สภาวะปกติเป็นอย่างมาก โดยโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเอนไซม์ H^+ -ATPase และเอนไซม์ในระบบเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตจะเปลี่ยนแปลงไป [23-24] นอกจากนี้ยังพบการเปลี่ยนแปลงที่เยื่อหุ้มเซลล์โดยใน *L. casei* จะพบกรดไขมันไม่อิ่มตัวเพิ่มขึ้นและมีความยาวเฉลี่ยของสายคาร์บอนหลักมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบการเพิ่มขึ้นของ CFA อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพาะเลี้ยงที่ pH 3.5 ซึ่งหากทำให้เกิดการกลายพันธุ์ในลักษณะที่เพิ่มความสามารถในการสังเคราะห์ CFA จะทำให้เซลล์ทนกรดได้ดีขึ้นอีกด้วย [25] ในปี 2012 Zhang และคณะ [26] ได้ทดลองเตรียมเชื้อ *L. casei* ในสภาวะที่เป็นกรดที่ช่วงเวลาต่างๆ เปรียบเทียบกับสายพันธุ์ที่เตรียมด้วย pH ที่เหมาะสมกับเชื้อ (pH 6) และพบว่าเชื้อที่ผ่านการเตรียมในสภาวะกรดในช่วงเวลาสั้นๆ แล้วนำไปเติมลงในอาหารอื่นที่มีค่า pH ต่ำๆ จะมีความสามารถในการรอดชีวิตได้ดีกว่าเชื้อที่ไม่ผ่านการเตรียมในสภาวะกรดถึง 318 เท่า

แบคทีเรียในกลุ่ม *Lactobacillus* นี้ จะพบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของกรดไขมันไม่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว รวมถึงปริมาณ CFA ในเยื่อหุ้มเซลล์ เมื่อเซลล์อยู่ในสภาวะที่เป็นกรด โดยใน *L. coryniformis* Si3 จะพบ CFA ชนิด 18:1 Δ 9cis เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพาะเลี้ยงที่ pH 4.5 [27] และใน *L. casei* จะพบกรดไขมันไม่อิ่มตัวเพิ่มขึ้นและมีความยาวเฉลี่ยของสายคาร์บอนหลักมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบการเพิ่มขึ้นของ CFA อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพาะเลี้ยงที่ pH 3.5 ซึ่งหากทำให้เกิดการกลายพันธุ์ในลักษณะที่เพิ่มความสามารถในการสังเคราะห์ CFA จะทำให้เซลล์ทนกรดได้ดีขึ้นอีกด้วย [25] อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อขัดแย้งจากการศึกษาของ Broadbent และคณะในปี 2010 [28] ที่ได้ทำการศึกษาใน *L. casei* ATCC334 ที่ pH 4.5 กลับพบการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันไม่อิ่มตัวแทน ในงานวิจัยหลายๆ งานได้ศึกษายีนที่เกี่ยวข้องกับ CFA ใน *Lactobacillus* และพบว่า ยีน CFA ซึ่งเป็นยีนที่ควบคุมการสังเคราะห์เอนไซม์ cyclopropane fatty acid synthase จะถูกกระตุ้นได้ด้วยค่า pH ต่ำๆ จากการศึกษาใน *L. rhamnosus* อธิบายการทำงานของยีนดังกล่าวว่าไม่พบการแสดงออกเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ในระบบสูงกว่า 5.0 [29] นอกจากการทำงานของยีนที่เกี่ยวข้องแล้วสภาพแวดล้อมอื่นๆ ที่จุลินทรีย์อาศัยอยู่ยังมีส่วนในการสังเคราะห์ CFA เมื่อเซลล์อยู่ในสภาวะที่เป็นกรด จากการศึกษาใน *L. helveticus* ที่เลี้ยงในอาหารที่มีกรด oleic และ linoleic อยู่มากจะมีผลให้การสังเคราะห์ CFA สูงขึ้นเมื่อเชื้ออยู่ในสภาวะกรด [30] และใน *L. sanfranciscensis* จะสังเคราะห์ CFA ผ่านกระบวนการที่มีออกซิเจนได้ดี ในขณะที่ *L. helveticus* จะใช้กระบวนการที่ไม่

มีออกซิเจนได้ดีกว่า ส่งผลให้ทั้ง 2 สายพันธุ์นี้มีความสามารถในการทนกรดได้ต่างกันเมื่อปริมาณออกซิเจนในระบบต่างกัน [31]

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่า แบคทีเรียในกลุ่ม *Lactobacillus* สามารถป้องกันตัวเองจากสภาวะภายนอกที่เป็นกรดได้ด้วยกลไกที่หลากหลาย และการเตรียมเชื้อในสภาวะที่เป็นกรดก่อนนำมาใช้งาน จะทำให้เชื้อมีความสามารถในการทนกรดได้มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามก็ดียังมีความแตกต่างของการใช้กรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ต่อการกระตุ้นความสามารถในการทนกรดนี้ เนื่องจากความสามารถในการผ่านเข้าสู่เซลล์ของกรดแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ในกรณีของกรดแลคติกซึ่งเป็นกรดอินทรีย์อย่างอ่อน จะสามารถผ่านเข้าสู่เซลล์ได้ง่ายในลักษณะที่เป็น protonated form [7] สำหรับกรดซिटริกจูลินทรีย์ในกลุ่ม *Lactobacillus* สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารจำพวก acetoin และ diacetyl ได้ [32] และกรดมาลิกจะเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการ malolactic fermentation [33] กรดอินทรีย์เหล่านี้จะมีผลกระทบต่อเซลล์น้อยกว่ากรดอนินทรีย์ งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาความแตกต่างระหว่างการใช้กรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ในการเตรียมหัวเชื้อ ต่อความสามารถในการรอดชีวิตของแบคทีเรีย *Lactobacillus casei* ในสภาวะกรดชนิดต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลสำคัญในการนำจุลินทรีย์โพรไบโอติกส์ไปใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มโพรไบโอติกส์ที่ทำจากน้ำผลไม้ ซึ่งจะมีค่า pH ค่อนข้างต่ำโดยธรรมชาติ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 จุลินทรีย์และการเพาะเลี้ยง

คณะผู้วิจัยเลือกใช้เชื้อจุลินทรีย์ในตระกูล *Lactobacilli* 1 สายพันธุ์ ได้แก่ *Lactobacillus casei* LC1 ที่ได้รับการรับรองว่ามีความสามารถเป็นโพรไบโอติกส์ จากบริษัทตัวแทนจำหน่ายในประเทศไทย อาหารเลี้ยงเชื้อ MRS ซึ่งเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อสำหรับสายพันธุ์ *Lactobacilli* [34] เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ตลอดการทดลอง การเพาะเลี้ยงหัวเชื้อจุลินทรีย์ใช้ *L. casei* ที่เป็นผงแห้ง (freeze-dry) ปริมาณ 0.05 กรัม เติมนลงในอาหาร MRS broth ปริมาตร 30 mL นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นถ่ายเชื้อ 1 mL ลงอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS broth ขวดใหม่ปริมาตร 30 mL นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C ต่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อนำไปใช้เป็นหัวเชื้อในการทดลองขั้นต่อไป

2.2 การเตรียมหัวเชื้อด้วย pH ต่ำ

นำหัวเชื้อ *L. casei* ที่ผ่านการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปริมาตร 10 mL มาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 4 °C จากนั้นล้างเซลล์ด้วย phosphate buffer 2 ครั้ง และนำมากระจายตัวอีกครั้งใน MRS broth ปริมาตร 10 mL แล้วจึงเติมนลงใน MRS broth ปริมาตร 100 mL ที่ปรับ pH ให้เป็น 3.5, 4.5 และ 5.5 โดยใช้กรดซिटริก หรือกรดมาลิก หรือกรด

ไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ผ่านการฆ่าเชื้อโดยการกรองด้วยเมมเบรน ขนาด 0.2 μm (ไม่ฆ่าเชื้อด้วยความร้อนเพราะจะทำให้กรดซिटริกเปลี่ยนรูปและสลายตัว) จากนั้นนำไปต้มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อต้มครบตามเวลาแล้วจะทำการล้างเซลล์ด้วย phosphate buffer 2 ครั้ง และนำเซลล์ของ *L. casei* มากระจายตัวอีกครั้งใน phosphate buffer pH 6.5 แล้วจึงนำเซลล์ที่ได้ไปตรวจสอบความสามารถของเชื้อในการทนกรดรูปแบบต่างๆ

2.3 การเตรียมหัวเชื้อด้วย pH ต่ำต่อการรอดชีวิตของ *L. casei* ในสภาวะกรด

นำเชื้อ *L. casei* ที่ผ่านการเตรียมที่สภาวะ pH ต่ำรูปแบบต่างๆ ปริมาตร 3 mL มาเติมลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS broth ปริมาตร 30 mL ที่ปรับ pH ให้เป็น 3.5, 4.5 และ 5.5 โดยใช้กรดซिटริกหรือกรดมาลิก และผ่านการฆ่าเชื้อโดยการกรองด้วยเมมเบรน ขนาด 0.2 μm นำไปต้มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 2 วัน เก็บตัวอย่างมาตรวจวัดการรอดชีวิตของเชื้อทุกวัน โดยทำการ spread plate ลงบน MRS agar แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 48 – 72 ชั่วโมง

2.4 การเตรียมหัวเชื้อด้วย pH ต่ำต่อการรอดชีวิตของ *L. casei* ในสภาวะน้ำผลไม้จำลอง

เตรียมน้ำผลไม้จำลองโดยผสมซูโครส 2% กลูโคส 1% และฟรุกโตส 1% ด้วยน้ำกลั่น และปรับ pH เป็น 3.5 ด้วยกรดซिटริก จากนั้นฆ่าเชื้อโดยการกรองด้วยเมมเบรนขนาด 0.2 μm แล้วนำเชื้อ *L. casei* ที่ผ่านการเตรียมที่สภาวะ pH ต่ำรูปแบบต่างๆ มาเติมลงในน้ำผลไม้จำลอง ศึกษาการรอดชีวิตของเชื้อ *L. casei* ในน้ำผลไม้จำลองที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C โดยตรวจวัดการรอดชีวิตของเชื้อทุก 1 สัปดาห์ เป็นเวลา 2 สัปดาห์ โดยทำการ spread plate ลงบน MRS agar แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 48 – 72 ชั่วโมง และทำการวัดปริมาณกรดทั้งหมด รวมถึงปริมาณน้ำตาลแต่ละชนิดที่เหลืออยู่ในน้ำผลไม้จำลอง

2.5 การศึกษาผลของ pH ที่ใช้เตรียมหัวเชื้อต่อการรอดชีวิตของ *Lactobacillus casei* ในระบบทางเดินอาหารจำลอง

นำเชื้อ *L. casei* ที่ผ่านการเตรียมที่สภาวะ pH ต่ำ ซึ่งให้ผลการรอดชีวิตในสภาวะกรดดีที่สุด ปริมาตร 3 mL เติมลงในสารละลายเปปโติน ปริมาตร 30 mL ที่ปรับ pH เป็น 2.0 ด้วยกรด HCl และผ่านการฆ่าเชื้อโดยการกรองด้วยเมมเบรน ขนาด 0.2 μm นำตัวอย่างไปต้มที่อุณหภูมิ 37 °C เก็บตัวอย่างและวัดการรอดชีวิตของเชื้อทุกชั่วโมงเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

2.6 การวิเคราะห์ทางเคมี

วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล (ซูโครส, กลูโคส, ฟรุกโตส) โดยใช้ HPLC นำตัวอย่างประมาณ 1 mL ใช้หลอดฉีดยาดูดขึ้นมาจนหมด นำมาฉีดลงใน vial โดยผ่านหัวกรอง ปิดฝาแล้วนำเข้าเครื่อง HPLC โดยใช้ column carbohydrate ปริมาณตัวอย่างที่ใช้เท่ากับ 0.5 μ L ใช้ mobile phase เป็น สารผสม อัตราส่วนระหว่าง น้ำ : Acetonitrile เป็น 25 : 75 มีอัตราการไหล 1.4 mL/min ใช้เวลาในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 10 นาที

ตรวจวิเคราะห์ปริมาณกรดซิตริกและกรดแลคติกด้วยเครื่อง HPLC โดยใช้คอลัมน์ C-18 มีกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 M เป็น mobile phase ปริมาตรตัวอย่าง 10 μ L ใช้อัตราเร็วในการชะ 1 mL/min ระยะเวลาการวิเคราะห์ 30 นาที ใช้ detector ชนิด DAD ที่ความยาวคลื่น 210 nm และตรวจวัดปริมาณกรดทั้งหมดด้วยวิธีการไตเตรท โดยบีบตัวอย่างมา 2 mL ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ หยด 1% ฟีนอล์ฟทาลีน 2 – 3 หยด ไทเทรตกับ 0.01 N NaOH จนถึงจุดยุติแล้วนำมาคำนวณหาปริมาณกรดด้วยสมการ

$$\% \text{Acidity} = \frac{\text{ความเข้มข้น (Normal) ของ NaOH} \times \text{ปริมาตรของ NaOH ที่ใช้ (mL)} \times \text{น้ำหนักสมมูลของกรด}}{\text{ปริมาตรของตัวอย่าง (mL)} \times 10} \quad (1)$$

3. ผลและการวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ผลของการเตรียมหัวเชื้อด้วย pH ต่ำต่อการรอดชีวิตของ *L. casei* ในสภาวะกรด

ในการเตรียมหัวเชื้อด้วยสภาวะกรด (pH ต่ำ) ใช้กรด 3 ชนิด ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก (เป็นตัวแทนของกรดอินทรีย์ที่นิยมใช้ในการปรับสภาวะเลียนแบบระบบทางเดินอาหารจำลอง) กรดซิตริก และกรดมาลิก (เป็นตัวแทนของกรดอินทรีย์ที่พบมากในน้ำผลไม้) โดยใช้ระดับความเข้มข้นของกรดทั้ง 3 ชนิด ที่ 3 ระดับ คือที่ pH 3.5, 4.5, และ 5.5 ซึ่งค่า pH ที่ 4.5 เป็นค่าที่นิยมใช้ในสารละลายสำหรับเตรียมเซลล์เพื่อให้ทนต่อสภาวะที่เป็นกรด เนื่องจากเป็นสภาวะที่ไม่รุนแรงเกินไป และสามารถกระตุ้นให้จุลินทรีย์โพรไบโอติกส์ปรับตัวได้ อีกทั้งยังไม่ทำให้สูญเสียเซลล์จุลินทรีย์โพรไบโอติกส์ที่มีชีวิตไป เนื่องจากที่ pH 4.5 ไม่ทำให้ pH ภายในเซลล์ของ *Lactobacillus* ลดต่ำลงมากเกินไป ซึ่งหาก pH ภายในเซลล์ยังอยู่ในช่วง 4.6 – 4.8 จะทำให้ *Lactobacillus* บางสายพันธุ์ชะลอการเจริญ และทำให้ยีนที่เกี่ยวข้องกับการทนกรดของเซลล์ถูกกระตุ้นให้ทำงาน แต่เป็นสภาวะที่ไม่ทำให้เซลล์ตาย [35] ในการทดลองนี้คาดหวังผลในการพัฒนาหัวเชื้อโพรไบโอติกส์ด้วยสภาวะที่เป็นกรด เพื่อให้จุลินทรีย์เกิดการปรับตัวและทนสภาวะกรดในน้ำผลไม้ได้มากขึ้น และเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้เสริมโพรไบโอติกส์ได้ต่อไป

จากการทดลองเตรียมเซลล์โพรไบโอติกส์สายพันธุ์ *Lactobacillus casei* ในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS broth ที่ปรับ pH ด้วยกรดทั้ง 3 ชนิดข้างต้น พบว่าการใช้กรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ใน

การเตรียมเซลล์โพรไบโอติกส์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะส่งผลต่อการทนกรดในสภาวะต่างๆ ไม่เหมือนกัน โดยการเตรียมเซลล์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกทำให้ *L. casei* สามารถทนสภาวะกรดซिटริกได้ดีที่สุดเมื่อทำการทดลองเป็นเวลา 2 วัน ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยมีจำนวนเซลล์ลดลงเพียงประมาณ 1.5 logCFU/mL ในขณะที่การเตรียมเซลล์ด้วยกรดซिटริกและกรดมาลิกจะพบจำนวน *L. casei* ที่รอดชีวิตลดลงในช่วง 2 – 5 logCFU/mL แต่การเตรียมเซลล์ด้วยกรดมาลิก จะทำให้เชื้อทนต่อสภาวะเคี้ยวในกรดมาลิกได้ดีกว่าการเตรียมเซลล์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (ตารางที่ 2) โดยเมื่อทำการทดลองเป็นเวลา 2 วัน จำนวนเซลล์ที่มีชีวิตของ *L. casei* ที่ผ่านการเตรียมด้วยกรดมาลิกที่ pH 4.5 จะลดลงเพียงประมาณ 2 logCFU/mL แต่เซลล์ที่ผ่านการเตรียมด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ pH 4.5 มีจำนวนเซลล์ที่รอดชีวิตลดลงถึงประมาณ 5 logCFU/mL ทั้งนี้หากพิจารณาจากค่า pH ที่เท่ากัน กรดไฮโดรคลอริกที่เป็นกรดแก่จะแตกตัวได้ 100% ในขณะที่กรดอินทรีย์ทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ กรดซिटริกและกรดมาลิกจะแตกตัวได้แตกต่างกันตามค่า pKa ของกรดแต่ละชนิด ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่ค่า pH ที่เท่ากันโดยใช้กรดที่แตกตัวกัน 3 ชนิดนี้ปรับค่า จะทำให้ในสารละลายมีปริมาณโมเลกุลของกรดในสารละลายแตกต่างกัน

ตารางที่ 1 การรอดชีวิตของ *L. casei* ในสภาวะกรดซिटริก pH 3.5 เมื่อเตรียมเชื้อด้วยกรดไฮโดรคลอริก กรดมาลิก และกรดซिटริกที่ pH ต่าง ๆ

สภาวะการเตรียมเซลล์	จำนวนเซลล์ที่รอดชีวิต (logCFU/mL)		
	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2
ไม่ผ่านการเตรียมเซลล์	7.17 ± 0.05	ND	ND
HCl (pH 5.5)	7.26 ± 0.03	6.60 ± 0.15	6.52 ± 0.07
HCl (pH 4.5)	7.08 ± 0.25	6.78 ± 0.20	6.67 ± 0.20
HCl (pH 3.5)	7.31 ± 0.37	6.78 ± 0.31	6.46 ± 0.11
Malic acid (pH 5.5)	7.44 ± 0.07	6.00 ± 0.30	4.40 ± 0.46
Malic acid (pH 4.5)	7.48 ± 0.40	4.48 ± 0.24	2.52 ± 0.77
Malic acid (pH 3.5)	7.59 ± 0.29	3.13 ± 0.13	ND
Citric acid (pH 5.5)	7.47 ± 0.05	6.22 ± 0.11	5.94 ± 0.26
Citric acid (pH 4.5)	7.52 ± 0.04	6.03 ± 0.03	4.91 ± 0.13
Citric acid (pH 3.5)	7.45 ± 0.07	3.23 ± 0.23	ND

ตารางที่ 2 การรอดชีวิตของ *L. casei* ในสภาวะกรดมาลิก pH 3.5 เมื่อเตรียมเชื้อด้วยกรดไฮโดรคลอริก กรดมาลิก และกรดซิตริกที่ pH ต่าง ๆ

สภาวะการเตรียมเซลล์	จำนวนเซลล์ที่รอดชีวิต (logCFU/mL)		
	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 2
ไม่ผ่านการเตรียมเซลล์	7.22 ± 0.11	3.35 ± 0.13	ND
HCl (pH 5.5)	7.49 ± 0.05	5.00 ± 0.25	ND
HCl (pH 4.5)	7.11 ± 0.17	3.08 ± 0.07	2.40 ± 0.90
HCl (pH 3.5)	7.30 ± 0.13	2.55 ± 0.11	ND
Malic acid (pH 5.5)	7.14 ± 0.23	6.89 ± 0.48	ND
Malic acid (pH 4.5)	6.97 ± 0.22	6.25 ± 0.19	5.68 ± 0.46
Malic acid (pH 3.5)	7.59 ± 0.29	3.13 ± 0.13	ND
Citric acid (pH 5.5)	7.53 ± 0.05	ND	ND
Citric acid (pH 4.5)	7.52 ± 0.04	2.15 ± 0.25	2.63 ± 0.13
Citric acid (pH 3.5)	7.53 ± 0.07	3.23 ± 0.23	ND

กลไกต่าง ๆ ที่เซลล์ใช้ในการป้องกันตนเองจากสภาวะหนึ่ง ๆ อาจส่งผลดีเมื่อเซลล์จุลินทรีย์ต้องเจอกับสภาวะเครียด เช่น สภาวะกรด แต่ในสภาวะเครียดแบบเดียวกัน (ในที่นี้คือสภาวะกรด) หากองค์ประกอบของสิ่งกระตุ้นความเครียดที่พบในระบบมีความแตกต่างกัน เช่น ในกรณีนี้คือสภาวะกรดที่เกิดจากกรดซิตริกและกรดมาลิก จำทำให้ผลที่ได้มีความแตกต่างกันได้ เนื่องจากกรดแต่ละชนิดสามารถชักนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของยีนได้ในระดับที่ต่างกัน [36] ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณประจุและขนาดโมเลกุลเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้กรดอินทรีย์แต่ละชนิดผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าสู่ภายในเซลล์จุลินทรีย์ได้ไม่เหมือนกัน ลักษณะโมเลกุลของกรดอินทรีย์ที่ยังไม่แตกตัวจะสามารถผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าสู่ภายในเซลล์ได้ง่ายและไปเกิดการแตกตัวภายในเซลล์ ในขณะที่กรดอินทรีย์ซึ่งในที่นี้ได้แก่กรดไฮโดรคลอริกจะแตกตัวได้ทั้งหมด แม้ว่าเซลล์แบคทีเรียจะมีกระบวนการป้องกันการแพร่ของ H^+ ที่มากเกินไปเข้าสู่เซลล์ แต่ด้วยลักษณะโมเลกุลที่สามารถผ่านเข้าสู่เซลล์ได้อย่างรวดเร็วจึงทำให้กรดไฮโดรคลอริกสามารถกระตุ้นให้เกิดการตอบสนองของเซลล์ต่อปริมาณ H^+ ภายในเซลล์ที่สูงขึ้นได้รวดเร็วกว่า [37] โดยการตอบสนองระดับยีนที่สำคัญของเซลล์แบคทีเรียต่อสภาวะที่เป็นกรดคือการปรับลดอัตราการผ่านเข้าออกของสารระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ ซึ่งก็คือการลด membrane fluidity ของเซลล์ลง กระบวนการสำคัญที่พบคือการปรับอัตราส่วนการสร้างกรดไขมันอิ่มตัวให้สูงขึ้นและลดปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่โครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ลง

โดยกรดแต่ละชนิดจะกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้ไม่เท่ากัน ส่วนหนึ่งขึ้นกับค่า pKa ของกรดนั้นๆ และโดยส่วนมากกรดที่กระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่เยื่อหุ้มเซลล์ได้มากเมื่อนำมาใช้เตรียมเซลล์จะทำให้จุลินทรีย์รอดชีวิตในสภาวะกรดได้ดีขึ้น แต่หลักการดังกล่าวยังไม่สามารถใช้อธิบายการทำงานของกรดบางชนิด เช่น กรดเบนโซอิก ที่มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อสูงแม้ว่าจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกรดไขมันที่เยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ได้ดีก็ตาม ดังนั้นเมื่อใช้กรดต่างชนิดกันในการเตรียมเซลล์จึงให้ผลที่แตกต่างกันไป [38] ทั้งนี้ผลที่ได้ขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์ ชนิดของกรด และค่า pH ที่ใช้ในการเตรียมเซลล์ [39]

3.2 ผลของการเตรียมหัวเชื้อด้วย pH ต่ำต่อการรอดชีวิตของ *L. casei* ในสภาวะน้ำผลไม้จำลอง

น้ำผลไม้จำลองที่ใช้ในงานวิจัยทำการปรับ pH ด้วยกรดซิตริก ซึ่งเป็นกรดอ่อนที่พบทั่วไปในน้ำผลไม้ และทำการฆ่าเชื้อด้วยการกรองด้วยเมมเบรนขนาด 0.2 μm ซึ่งเป็นการไม่ผ่านความร้อน ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของกรดซิตริกไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพ ผลการศึกษาการรอดชีวิตของ *L. casei* ที่ผ่านการเตรียมเซลล์ด้วยสภาวะกรดแบบต่างๆ ในน้ำผลไม้จำลองแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าการเตรียมเซลล์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ pH 3.5, 4.5 และ 5.5 ทำให้ *L. casei* รอดชีวิตในน้ำผลไม้จำลองได้ดีที่สุดในทุกค่า pH ที่ใช้ในการเตรียมเซลล์ โดยมีจำนวนเซลล์ที่รอดชีวิตลดลงเพียงประมาณ 1.5 logCFU/mL ในเวลา 14 วันของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C และการเตรียมเซลล์ด้วยกรดซิตริกที่ pH 3.5 ให้ผลในการรอดชีวิตดีเป็นลำดับถัดมา โดยมีเซลล์ที่รอดชีวิตลดลงประมาณ 2 logCFU/mL ในเวลา 14 วัน ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการทดลองในตารางที่ 1 ซึ่งใช้ MRS broth เป็นสารละลายกรดในการทดสอบการรอดชีวิต

ตารางที่ 3 การรอดชีวิตของ *L. casei* ในสภาวะน้ำผลไม้จำลองที่ pH 3.5 เก็บรักษาที่ 4°C เป็นเวลา 14 วัน

สภาวะการเตรียมเซลล์	จำนวนเซลล์ที่รอดชีวิต (logCFU/mL)		
	วันที่ 0	วันที่ 7	วันที่ 14
ไม่ผ่านการเตรียมเซลล์	7.21 ± 0.06	ND	ND
HCl (pH 5.5)	7.03 ± 0.53	5.82 ± 0.20	5.52 ± 0.24
HCl (pH 4.5)	7.01 ± 0.47	6.23 ± 0.24	5.58 ± 0.14
HCl (pH 3.5)	7.18 ± 0.03	6.03 ± 0.11	5.50 ± 0.18

ตารางที่ 3 การรอดชีวิตของ *L. casei* ในสภาวะน้ำผลไม้จำลองที่ pH 3.5 เก็บรักษาที่ 4 °C เป็นเวลา 14 วัน (ต่อ)

สภาวะการเตรียม เซลล์	จำนวนเซลล์ที่รอดชีวิต (logCFU/mL)		
	วันที่ 0	วันที่ 7	วันที่ 14
Malic acid (pH 5.5)	7.52 ± 0.22	3.17 ± 0.19	1.34 ± 0.26
Malic acid (pH 4.5)	7.02 ± 0.28	3.20 ± 0.20	3.01 ± 0.77
Malic acid (pH 3.5)	7.59 ± 0.29	3.13 ± 0.13	2.20 ± 0.17
Citric acid (pH 5.5)	7.03 ± 0.43	5.80 ± 0.09	3.74 ± 0.12
Citric acid (pH 4.5)	7.47 ± 0.67	5.95 ± 0.24	4.95 ± 0.06
Citric acid (pH 3.5)	7.22 ± 0.33	5.66 ± 0.40	5.14 ± 0.17

การใช้น้ำผลไม้จำลองให้ข้อสังเกตของความแตกต่างระหว่างการผลการทดลองเทียบกับการใช้ MRS broth โดยการใช้น้ำผลไม้จำลองเป็นระบบที่มีเพียงน้ำตาลและกรด ไม่มีองค์ประกอบที่เป็นกรดอะมิโน ซึ่งแม้การทดลองในน้ำผลไม้จำลองจะให้ผลเช่นเดียวกับการทดลองในสารละลาย MRS broth แต่การเตรียมเซลล์ด้วยกรดอินทรีย์ คือ กรดซิตริกและกรดมาลิกโดยใช้ pH ที่ต่ำกว่าในการเตรียมเซลล์ส่งผลให้การรอดชีวิตดีกว่า ซึ่งสวนทางกับการทดสอบใน MRS broth ที่การเตรียมเซลล์ที่ pH สูงกว่าให้ผลการรอดชีวิตที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามจำนวนจุลินทรีย์ที่รอดชีวิตในน้ำผลไม้ในวันที่ 14 จะมีจำนวนต่ำกว่าการรอดชีวิตในการทดสอบด้วย MRS broth จึงเป็นข้อสังเกตอย่างหนึ่งว่า เมื่อทำการเตรียมเซลล์ด้วย MRS broth ในสภาวะกรดเป็นสภาวะที่มีกรดอะมิโนจำนวนมากอยู่ในระบบ ซึ่ง *L. casei* จะปรับตัวโดยใช้ทั้งกลไกที่มีและไม่มีกรดอะมิโนเข้าร่วมในกลไก แต่เมื่อนำมาทดสอบการรอดชีวิตในสภาวะที่ไม่มีกรดอะมิโน เช่น ในน้ำผลไม้ ทำให้กลไกที่ใช้กรดอะมิโนเข้าร่วมไม่สามารถใช้งานได้ คงเหลือแต่บางกลไกที่ไม่จำเป็นต้องใช้กรดอะมิโนเข้าร่วมยังสามารถทำหน้าที่ลดสภาวะเครียดในเซลล์ และยังคงทำให้เซลล์รอดชีวิตได้ระดับหนึ่ง

กลไกหลักที่มีกรดอะมิโนเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งจุลินทรีย์ในกลุ่ม *Lactobacillus* ทั่วไปใช้ในการลดสภาวะเครียดจากกรดในสิ่งแวดล้อม ได้แก่ Glutamate Decarboxylation system (GDS) และ Arginine Deiminase pathway (ADP) ซึ่งใช้กรดอะมิโนกลูตาเมต (glutamate) และอาร์จินีน (arginine) ร่วมในระบบตามลำดับ โดยระบบ ADP จะสามารถลดความเป็นกรดในไซโตพลาสซึมได้มากกว่าเนื่องจากการสร้างแอมโมเนียซึ่งเป็นต่างออกมา ส่วนกลไกที่ไม่เกี่ยวข้องกับการใช้กรดอะมิโนได้แก่ การทำงานของเอนไซม์ H⁺-ATPase ซึ่งทำหน้าที่ขนส่งโปรตอนออกนอกเซลล์ และกลไกการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียที่ทำให้เกิดการสร้าง cyclopropane

fatty acid ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ถูกทำลายยากด้วยกรดได้ยากขึ้น [40] ดังนั้นจากผลการทดลองในตารางที่ 2 (น้ำผลไม้จำลอง) จึงพบการรอดชีวิตโดยรวมที่ต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 1 (acidify MRS broth) อาจเนื่องมาจากระดับปริมาณกรดอะมิโนที่แตกต่างกันในสภาวะที่ใช้สภาวะที่ซ้ทดสอบ ในส่วนของปริมาณกรดในน้ำผลไม้หลังจากเติมโพรไบโอติกส์และเก็บรักษาไว้เป็นเวลา 14 วัน ไม่พบการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดซิทริกในน้ำผลไม้ (ตารางที่ 4) แสดงให้เห็นถึงสภาวะความเป็นกรดที่ไม่เปลี่ยนแปลงในตัวอย่างน้ำผลไม้จำลองตลอดระยะเวลาการทดลอง ส่วนปริมาณกรดแลคติกในน้ำผลไม้จำลองตรวจไม่พบตลอดระยะเวลา 14 วันของการทดลองในทุกสภาวะที่ทดสอบ (ไม่แสดงผลการทดลอง) สำหรับการตรวจวัดปริมาณน้ำตาลในน้ำผลไม้จำลองเป็นที่น่าสนใจว่าไม่เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลที่แน่นอนในน้ำผลไม้จำลองทั้งในระบบที่เติม *L. casei* ที่ผ่านการเตรียมเซลล์และไม่ผ่านการเตรียมเซลล์ (ไม่แสดงผลการทดลอง) จึงเป็นไปได้ว่ากลไกการใช้น้ำตาลของเซลล์เน้นเพื่อการสร้างพลังงานเพื่อสร้างโปรตีนและกรดไขมันที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันตัวจากสภาวะกรด ดังนั้นเมื่อไม่มีกรดอะมิโนในระบบซึ่งทำให้ขาดสารตั้งต้นในการสังเคราะห์โปรตีนการใช้น้ำตาลจึงช้าลงด้วย

ตารางที่ 4 ปริมาณกรดซิทริกในน้ำผลไม้เมื่อมีการเติมจุลินทรีย์โพรไบโอติกส์ที่ผ่านการเตรียมที่สภาวะต่าง ๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 14 วัน

สภาวะการเตรียมเซลล์	วันที่	ปริมาณกรดซิทริกในน้ำผลไม้ (g/L)
ไม่ผ่านการเตรียมเซลล์	0	0.68 ± 0.12
	7	0.71 ± 0.09
	14	0.79 ± 0.10
เตรียมเชื้อด้วยกรดซิทริก pH 3.5	0	0.74 ± 0.05
	7	0.71 ± 0.02
	14	0.75 ± 0.15
เตรียมเชื้อด้วยกรดไฮโดรคลอริก pH 4.5	0	0.74 ± 0.09
	7	0.82 ± 0.06
	14	0.85 ± 0.10

3.3 การศึกษาผลของ pH ที่ใช้เตรียมหัวเชื้อต่อการรอดชีวิตของ *L. casei* ในระบบทางเดินอาหารจำลอง

ในการศึกษาผลของ pH ที่ใช้ในการเตรียมหัวเชื้อต่อการรอดชีวิตของจุลินทรีย์โพรไบโอติกส์ในระบบทางเดินอาหารจำลอง ผู้วิจัยเลือกสภาวะการเตรียมเซลล์ที่ใช้กรดไฮโดรคลอริกที่ pH 4.5 และกรดซิตริกที่ pH 3.5 ซึ่งให้การรอดชีวิตของเซลล์ในน้ำผลไม้ดีที่สุดที่สุดมาใช้ในการเตรียมเซลล์ และศึกษาการรอดชีวิตของ *L. casei* ในสภาวะระบบทางเดินอาหารจำลองที่ pH 2.0 (ปรับโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก) บ่มตัวอย่างที่ 37 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้ผลดังตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าเมื่อทดสอบในสภาวะระบบทางเดินอาหารจำลองที่ pH 2.0 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง การรอดชีวิตของจุลินทรีย์ที่ผ่านการเตรียมเซลล์ด้วยกรดจะสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์ที่ไม่ผ่านการเตรียม อย่างไรก็ตามไม่มีความแตกต่างกันระหว่างการเตรียมเซลล์ด้วยกรดซิตริกและกรดไฮโดรคลอริก โดยการรอดชีวิตของเซลล์จะลดลงประมาณ 3 logCFU/mL เมื่ออยู่ในระบบทางเดินอาหารจำลองที่ pH 2.0 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เป็นที่ทราบกันดีว่าการเตรียมเซลล์ด้วยกรดจะช่วยเพิ่มความสามารถในการทนกรดของ *Lactobacillus* และมีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาผลของการเตรียมเซลล์ *Lactobacillus* ด้วยกรดต่อการรอดชีวิตในสภาวะระบบทางเดินอาหารจำลอง ซึ่งพบว่าการเตรียมเซลล์ด้วยกรดที่ pH ต่างกันส่งผลอย่างมากต่อการรอดชีวิตในระบบทางเดินอาหารจำลอง เนื่องจากการอัตราการสร้างกรดไขมันอิ่มตัวและ cyclopropane fatty acid ที่ไม่เท่ากันในสภาวะการเตรียมเซลล์ที่ pH ต่างกัน ดังนั้นสภาวะการเตรียมเซลล์ที่เหมาะสมกับ *Lactobacillus* สายพันธุ์หนึ่งอาจไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมสำหรับสายพันธุ์อื่นๆ [28]

ตารางที่ 5 การรอดชีวิตของ *L. casei* ในสภาวะทางเดินอาหารจำลองที่ pH 2.0

สภาวะการเตรียมเซลล์	เวลา (ชั่วโมง)	จำนวนเซลล์ที่รอดชีวิต (logCFU/mL)
ไม่ผ่านการเตรียมเซลล์	0	7.23 ± 0.12
	1	3.23 ± 0.16
	2	ND
	3	ND
กรดไฮโดรคลอริก (pH 4.5)	0	7.25 ± 0.22
	1	5.82 ± 0.02
	2	5.18 ± 0.11
	3	4.14 ± 0.12

ตารางที่ 5 การรอดชีวิตของ *L. casei* ในสภาวะทางเดินอาหารจำลองที่ pH 2.0 (ต่อ)

สภาวะการเตรียมเซลล์	เวลา (ชั่วโมง)	จำนวนเซลล์ที่รอดชีวิต (logCFU/mL)
กรดซิตริก (pH 3.5)	0	7.23 ± 0.01
	1	5.81 ± 0.03
	2	5.17 ± 0.05
	3	4.09 ± 0.04

การศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการเตรียมเซลล์ที่สภาวะ pH ประมาณ 3.5 – 4.5 จะทำให้เซลล์รอดชีวิตในสภาวะกรดที่ pH ในช่วง 2.0 – 3.0 ได้ดีที่สุด โดยการทดลองลงใน *Lactobacillus plantarum* NCIMB 8826 พบว่าเชื้อจะรอดชีวิตในน้ำแครนเบอร์รี่ (pH 2.7) ได้ดีที่สุดเมื่อเตรียมเซลล์ด้วย MRS broth pH 3.0 [41] และการศึกษาใน *Lactobacillus brevis* และ *Lactobacillus reuteri* พบว่าการเตรียมเซลล์ที่ pH 4.0 ทำให้แบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดนี้รอดชีวิตได้ดีขึ้นมากที่สุด ในสภาวะทางเดินอาหารจำลอง (pH 2.5) โดยรอดชีวิตได้มากกว่าเซลล์ที่ไม่ผ่านการเตรียมประมาณ 2.5 logCFU/mL [42] โดยทุกๆ การทดลองจะพบการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิ่มตัวและ cyclopropane fatty acid ที่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ทั้งสิ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของเยื่อหุ้มเซลล์ลักษณะดังกล่าวจะเป็นการลด cell membrane fluidity และ cell membrane permeability เพื่อลดการแพร่ของกรดเข้าสู่ภายในเซลล์ ในการทดลองนี้จึงมีความเป็นไปได้ว่าเมื่อเตรียมเซลล์ *Lactobacillus casei* ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ pH 4.5 และกรดซิตริกที่ pH 3.5 เซลล์จะมีอัตราการสร้างกรดไขมันอิ่มตัวและ cyclopropane fatty acid ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ทนต่อสภาวะกรดในทางเดินอาหารจำลองที่ pH 2.0 ได้ใกล้เคียงกัน

3.4 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในสารละลายที่ใช้ในการเตรียมเซลล์

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในตัวอย่างสารละลายที่ใช้ในการเตรียมเซลล์โดยศึกษาเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลกลูโคสใน MRS broth ที่ปรับ pH เป็น 3.5 ด้วยกรดซิตริก กรดมาลิก และกรดไฮโดรคลอริก เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการใช้น้ำตาลหรือลักษณะเมทาบอลิซึมของแหล่งคาร์บอน เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดของ *L. casei* ได้ผลดังตารางที่ 6 โดยในสารละลายสำหรับเตรียมเซลล์ที่ปรับ pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริกจะพบการใช้น้ำตาลต่ำกว่าในสารละลายที่ปรับ pH ด้วยกรดซิตริกและกรดมาลิกอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 6 ปริมาณน้ำตาลที่ถูกใช้ไปในสารละลายกรดที่ใช้ในการเตรียมเซลล์ *L. casei* เมื่อบ่มเซลล์ใน MRS broth เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

สภาวะการเตรียมเซลล์	ปริมาณน้ำตาลที่ใช้ไป (g/L)
กรดไฮโดรคลอริก (pH 3.5)	2.92 ± 1.34
กรดซัลฟูริก (pH 3.5)	12.02 ± 2.50
กรดมาลิก (pH 3.5)	12.57 ± 0.30

จากการวิเคราะห์การแสดงออกของยีนที่แตกต่างกันในเชื้อ *Lactobacillus plantarum* ในสภาวะเครียดจากกรดแลคติกพบว่ามีการแสดงออกของยีน 2 กลุ่มที่เพิ่มขึ้น ได้แก่ ยีนที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง surface protein และยีนที่เกี่ยวข้องในวิถีกระบวนการหมัก (fermentation pathway) ซึ่งวิถีการหมักนี้เกี่ยวข้องกับการใช้กลูโคสและเปลี่ยนเป็นไพรูเวท (pyruvate) ทั้งนี้กรดอินทรีย์แต่ละชนิดจะกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ได้มากน้อยต่างกัน เนื่องจากรูปแบบที่เป็นพิษต่อเซลล์เป็นรูปแบบของกรดที่ไม่แตกตัว (undissociated form) ซึ่งสามารถซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียได้ง่าย ดังนั้นความสามารถในการแตกตัวที่ pH ต่างๆ และความเข้มข้นของกรดอินทรีย์แต่ละชนิดจึงส่งผลกระทบต่อการทำงานของยีนกลุ่มต่างๆ ของแบคทีเรียไม่เท่ากันด้วย [43] นอกจากนี้จากการทดลองของ Koponen และคณะ [24] แสดงให้เห็นชัดเจนว่าในสภาวะที่เป็นกรด *Lactobacillus rhamnosus* GG จะมีการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับระบบ glycolysis และ phosphorylation เพื่อการเร่งใช้กลูโคสเมื่อมีกรดแลคติกซึ่งเป็นกรดอินทรีย์อยู่ในระบบ และในงานวิจัยของ Chen และคณะ [44] แสดงให้เห็นว่าการเตรียมเซลล์ *Lactobacillus Kefiranofaciens* ด้วยกรดไฮโดรคลอริกซึ่งไม่ใช่กรดอินทรีย์สามารถกระตุ้นการใช้คาร์โบไฮเดรตในเซลล์ได้เช่นกัน จะเห็นได้ว่าการกระตุ้นการใช้คาร์โบไฮเดรตเป็นกลไกสำคัญกลไกหนึ่งในการปรับตัวในสภาวะกรดของเซลล์ อย่างไรก็ตามแม้ว่ายีนที่เกี่ยวข้องกับการใช้คาร์โบไฮเดรตจะถูกกระตุ้น แต่วิถีการใช้คาร์โบไฮเดรตหลังจากได้เป็นไพรูเวทแล้วมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างการเตรียมเซลล์ด้วยกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ โดยการใช้กรดแลคติกซึ่งเป็นกรดอินทรีย์จะพบการปรับวิถีเมทาบอลิซึมในการใช้ไพรูเวทให้เปลี่ยนไปเป็นกรดไขมันเพื่อใช้ในปรับโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [45] ในขณะที่การใช้กรดไฮโดรคลอริกในการเตรียมเซลล์จะพบวิถีการปรับตัวที่เกี่ยวข้องกับ pH homeostasis มากขึ้น แต่พบวิถีที่เกี่ยวข้องกับการปรับโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์น้อยกว่า [44, 46] อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ผ่านมาใช้ *Lactobacillus* คนละสายพันธุ์ และวิธีการทดลองที่แตกต่างกัน การเทียบเคียงอัตราการใช้น้ำตาลที่แตกต่างกันของระบบที่เตรียมเซลล์ด้วยกรดต่างชนิดกันจึงเป็นไปได้ยาก

จากการทดลองนี้จะเห็นว่าเมื่อเตรียมเซลล์ด้วยกรดอินทรีย์จะพบการใช้น้ำตาลกลูโคสที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ อาจเป็นผลมาจากกรดอินทรีย์ที่อยู่ในรูปแบบที่ไม่แตกตัวสามารถแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของ *L. casei* ได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับ H^+ จากกรดไฮโดรคลอริก เนื่องจากเซลล์ของ *Lactobacillus* มีกลไกป้องกันการผ่านเข้าออกของ H^+ ที่มากเกินไปอยู่แล้วตามธรรมชาติ เมื่อกรดอินทรีย์สามารถแพร่เข้าสู่เซลล์ได้เร็วกว่าทำให้เซลล์เริ่มการปรับตัวเร็วกว่าและเร่งการใช้กลูโคสเพื่อปรับโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ จะเห็นได้ว่าการแสดงออกของเซลล์เมื่ออยู่ในสภาวะกรดของแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกันและเป็นเรื่องที่จะเอียงด่อน จึงควรมีการศึกษาทางด้านชีวโมเลกุลหรือการศึกษาระดับยีนของแต่ละสายพันธุ์เพิ่มเติมต่อไป

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของการเตรียมเซลล์ด้วยกรดอินทรีย์และกรดอินทรีย์พบว่า การเตรียมเซลล์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มความสามารถในการทนต่อกรดซिटริกและความสามารถในการรอดชีวิตในระบบน้ำผลไม้จำลองของ *L. casei* ได้ดีที่สุด เมื่อพิจารณาถึงการทดลองที่ผ่านมาซึ่งระบุถึงกลไกการปรับตัวที่ต่างกันเมื่อจุลินทรีย์ *Lactobacillus* อยู่ในสภาวะเครียดจากกรดอินทรีย์และกรดอินทรีย์ โดยในสภาวะกรดอินทรีย์เซลล์จะปรับตัวโดยเน้นการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ ในขณะที่ในสภาวะกรดอินทรีย์เซลล์จะเน้นระบบ pH homeostasis ภายในเซลล์ ทั้งนี้จากการทดลองนำเซลล์ที่ผ่านการเตรียมด้วยกรดอินทรีย์หรือกรดอินทรีย์มาทดสอบการทนกรดในรูปแบบต่างๆ จึงสรุปได้ว่า การกระตุ้นเซลล์ของ *L. casei* ไปในทิศทางที่เน้นการเพิ่มการทำงานของระบบ pH homeostasis ส่งผลดีต่อการทนกรดมากกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากต้องการนำเซลล์ไปใช้ประโยชน์ต่อในระบบที่ขาดกรดอะมิโน เช่น ในน้ำผลไม้ เป็นต้น

จากการศึกษาความสามารถในการทนกรดในระบบทางเดินอาหารจำลองที่ pH 2.0 พบว่าการเตรียมเซลล์ *L. casei* ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ pH 4.5 ให้ผลใกล้เคียงกับการเตรียมเซลล์ด้วยกรดซิทริกที่ pH 3.5 แสดงให้เห็นว่าการใช้กรดแต่ละชนิดในการเตรียมเซลล์จะให้ผลแตกต่างกันไปหาใช้ที่ pH ต่างกัน ดังนั้นการเตรียมเซลล์ด้วยกรดต่างชนิดกันจึงต้องมีการศึกษาถึงค่า pH ที่เหมาะสมควบคู่กันไปด้วยเสมอ

References

- [1] Charalampopoulos D, Wang R, Pandiella SS, Webb C. Application of cereal and cereal components in functional foods: a review. *International Journal of Food Microbiology* 2002;79:131-41.

- [2] Gibson GR, Roberfroid MB. Dietary modulation of the colonic microflora: Introducing the concept of prebiotics. *Journal of Nutrition* 1995;25:1401-12.
- [3] Fuller R. Probiotics in man and animals. *Journal of Applied Bacteriology* 1989;66:365-78.
- [4] Saarela M, Mogensen G, Fondén R, Mättö J, Mattila-Sandholm T. Probiotic bacteria: safety, functional and technological properties. *Journal of Biotechnology* 2000;84:197-215.
- [5] Schaafsma G. Lactose and lactose derivatives as bioactive ingredients in human nutrition. *International Dairy Journal* 2008;18:458-65.
- [6] Warapone Satheannoppakao, Wichai Aekplakorn, Ratchada Kasemsup, Hathaichanok Pakcharein. Report of the food consumption survey of Thai people. BKK, Thailand: Thai Health Survey Office; 2011. (In Thai)
- [7] Hutkins RW, Nannen NL. pH homeostasis in lactic acid bacteria. *Journal of Dairy Science* 1993;76: 2354-65.
- [8] Konings WN, Lolkema JS, Bolhuis H, Van Veen HW, Poolman B, Driessen AJM. The role of transport processes in survival of lactic acid bacteria. *Antonie van Leeuwenhoek* 1997;71:117-28.
- [9] Nannen NL, Hutkins RW. Proton-translocating adenosine triphosphatase activity in lactic acid bacterial. *Journal of Dairy Science* 1991;74(3):747-51.
- [10] Senior AE, Wise JG. The proton-ATPase of bacteria and mitochondria. *The Journal of Membrane Biology* 1983;73:105-24.
- [11] Hong SI, Kim YJ, Pyum YR. Acid tolerance of *Lactobacillus plantarum* from Kimchi. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol* 1998;32:142-8.
- [12] Bender GR, Marquis RE. Membrane ATPases and Acid Tolerance of *Actinomyces viscosus* and *Lactobacillus casei*. *Applied and Environmental Microbiology* 1987;53(9):2124-8.
- [13] Cotter PD, Gahan CGM, Hill C. A glutamate decarboxylase system protects *Listeria monocytogenes* in gastric fluid. *Molecular Microbiology* 2001;40(2):465-75.
- [14] Huang J, Mei L, Sheng Q, Shanqing Y, Lin D. Purification and characterization of glutamate decarboxylase of *Lactobacillus brevis* CGMCC 1306 isolated from fresh milk. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 2007;15(2):157-61.

- [15] Rollan G, Lorca GL, De Valdez F. Arginine catabolism and acid tolerance response in *Lactobacillus reuteri* isolated from sourdough. *Food Microbiology* 2003;20:313-9.
- [16] De Angelis M, Mariotti L, Rossi J, Servili M, Fox PF, Rollán G, Gobbetti M. Arginine catabolism by sourdough lactic acid bacteria: purification and characterization of the arginine deiminase pathway enzymes from *Lactobacillus sanfranciscensis* CB1. *Applied and Environmental Microbiology* 2002;68(12):6193-201.
- [17] Wouters JA, Frenkiel H, De Vos WM, Kuipers OP, Abee T. Cold shock proteins of *Lactobacillus lactis* MG1363 are involved in cryoprotection and in the production of cold-induced proteins. *Applied and Environmental Microbiology* 2001;67:5171-8.
- [18] Grogan DW, Cronan JE. Cyclopropane ring formation in membrane lipids of bacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 1997;61:429-41.
- [19] Flahaut S, Tierny Y, Watier D, Hornez JP, Jeanfils J. Impact of thermal variations on biochemical and physiological traits in *Pectinatus* sp. *International Journal of Food Microbiology* 2000;55:53-61.
- [20] Shabala L, Roos T. Cyclopropane fatty acids improve *Escherichia coli* survival in acidified minimal media by reducing membrane permeability to H⁺ and enhanced ability to extrude H⁺. *Research in Microbiology* 2008;159:458-61.
- [21] Zavaglia GA, Disalvo AE, De Antoni LG. Fatty acid composition and freeze-thaw resistance in *Lactobacilli*. *Journal of Dairy Research* 2000;67:241-7.
- [22] Rowbury RJ, Goodson M. An extracellular acid stress-sensing protein needed for acid tolerance induction in *Escherichia coli*. *FEMS Microbiology Letters* 1999;174:49-55.
- [23] De Angelis M, Gobbetti M. Environmental stress responses in *Lactobacillus*: a review. *Proteomics* 2004;4:106-22.
- [24] Koponen J, Laakso K, Koskenniemi K, Kankainen M, Savijoki K, Nyman TA, et al. Effect of acid stress on protein expression and phosphorylation in *Lactobacillus rhamnosus* GG. *Journal of Proteomics* 2012;75:1357-74.
- [25] Wu C, Zhang J, Wang M, Du G, Chen J. *Lactobacillus casei* combats acid stress by maintaining cell membrane functionality. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 2012;39:1030-9.
- [26] Zhang J, Wu C, Du G, Chen J. Enhanced acid tolerance in *Lactobacillus casei* adaptive evolution and compared stress response during acid stress. *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 2012;17:283-9.

- [27] Schoug A, Fischer J, Hermann JH, Schnürer J, Håkansson S. Impact of fermentation pH and Temperature on freeze-drying survival and membrane lipid composition of *Lactobacillus coryniformis* Si3. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 2008;35:175-81.
- [28] Broadbent JR, Larsen RL, Deibel V, Steele JL. Physiological and transcriptional response of *Lactobacillus casei* ATCC334 to acid stress. *Journal of Bacteriology* 2010;192(9):2445-58.
- [29] Wallenius J, Unksulainen T, Salonen K, Rautio J, Eerikäinen T. The effect of temperature and pH gradients on *Lactobacillus rhamnosus* gene expression of stress related genes. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 2011;34:1169-76.
- [30] Gurezoni ME, Lanciotti R, Cocconcelli PS. Alteration in cellular fatty acid composition as a response to salt, acid, oxidative and thermal stresses in *Lactobacillus helveticus*. *Microbiology* 2001;147: 2255-64.
- [31] Montanari C, Sado KSL, Serrazanetti DI, Etoa FX, Guerzoni ME. Synthesis of cyclopropane fatty acid in *Lactobacillus helveticus* and *Lactobacillus sanfranciscensis* and their cellular fatty acids changes following short term acid and cold stresses. *Food Microbiology* 2010;27:493-502.
- [32] Drinan DF, Robin S, Cogan, TM. Citric acid metabolism in hetero-and homofermentative acid bacteria. *Applied and Environmental Microbiology* 1976;31(4):481-6.
- [33] Davis CR, Wibowo DJ, Lee TH, Fleet GH. Growth and metabolic of lactic acid bacteria during and after malolactic fermentation of wines at different pH. *Applied and Environmental Microbiology* 1986;51(3):539-45
- [34] Holzapfel WH, Schillinger U. Introduction to prebiotic and probiotics. *Food Research International* 2002; 35:109-16.
- [35] McDonald LC, Fleming HP, Hassan HM. Acid tolerance of *Leuconostoc mesenteroides* and *Lactobacillus plantarum*. *Applied and Environmental Microbiology* 1990;56(7):2120-4.
- [36] Foster JW. When proton attack: microbial strategies of acid adaptation. *Current Opinion in Microbiology* 1999;2:170-4.
- [37] Lambert RJ, Stratford M. Weak-acid preservatives: modelling microbial inhibition and response. *Journal of Applied Microbiology* 1999;86:157-64.

- [38] Arvizu-medrano SM, Escartín, EF. Effect of acid shock with hydrochloric, citric, and lactic acids on the survival and growth of Salmonella Typhi and Salmonella Typhinurium in acidified media. *Journal of Food Protection* 2005;68(10): 2047-53.
- [39] Diakogiannis I, Berberi A, Siapi E, Arkoudi-Vafea A, Giannopoulou L, Mastromicolis SK. Growth and membrane fluidity of food-borne pathogen *Listeria monocytogenes* in the presence of weak acid preservatives and hydrochloric acid. *Frontiers in Microbiology* 2013;4:1-6.
- [40] Paramaporn Kerdsup. Acid Stress Responses of Probiotic *Lactobacillus*. Srinakarinwirot University (Journal of Science and Tecnology) 2016;8(16):70-86 (In Thai)
- [41] Srisukchayakul P, Charalampopoulos D, Karatzas KA. Study on the effect of citric acid adaptation toward the subsequent survival of *Lactobacillus plantarum* NCIMB 8826 in low pH fruit juices during refrigerated storage. *Food Research International* 2018;111:98-204.
- [42] Saarela M, Rantala M, Hallamaa K, Nohynek L, Virdajärvi I, Mättö J. Stationary-phase acid and heat treatments for improvement of the viability of probiotic lactobacilli and bifidobacteria. *Journal of Applied Microbiology* 2004;96:1205-14.
- [43] Pieterse B, Leer RJ, Schuren FHJ, Mariët J, Van Der Werf J. Unravelling the multiple effects of lactic acid stress on *Lactobacillus plantarum* by transcription profiling. *Microbiology* 2005;151:3881-94.
- [44] Chen MJ, Tang HY, Chiang ML. Effect of heat, cold, acid and bile salt adaptations on stress tolerance and protein expression of kefir-isolated probiotic *Lactobacillus kefirifaciens* M1. *Food Microbiology* 2017;66:20-7.
- [45] Fernandez A, Ogawa J, Penaud S, Boudebbouze S, Ehrlich D, Van De Guchte M, et al. Rerouting of pyruvate metabolism during acid adaptation in *Lactobacillus bulgaricus*. *Proteomics* 2008;8:3154-63.
- [46] Huang R, Pan M, Wan C, Shah NP, Tao X, Wei H. Physiological and transcriptional responses and cross protection of *Lactobacillus plantarum* ZDY2013 under acid stress. *Journal of Dairy Science* 2016;99:1002-10.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ปรมาภรณ์ เกิดทรัพย์ หัวหน้าสาขาเทคโนโลยีชีวภาพและผลิตภัณฑ์การเกษตร คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ E-mail paramapornk@g.swu.ac.th สนใจงานวิจัยด้านการใช้จุลินทรีย์โพรไบโอติกในผลิตภัณฑ์อาหาร และการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่ใช้กับผลิตภัณฑ์อาหาร



วรากร เกิดทรัพย์ หัวหน้าหมวดคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์สำหรับวิศวกร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต E-mail warakorn.ker@kbu.ac.th สนใจงานวิจัยด้านการใช้จุลินทรีย์โพรไบโอติกในผลิตภัณฑ์อาหาร

การลดต้นทุนและรักษาระดับการให้บริการในการจัดการสินค้าคงคลังด้วย
ระบบการตรวจสอบตามรอบ กรณีศึกษา บริษัทธุรกิจค้าปลีก
**COST REDUCTION AND SERVICE LEVEL CONTROL IN INVENTORY
MANAGEMENT BY PERIODIC REVIEW SYSTEM IN RETAIL BUSINESS
IN THAILAND**

บุญเลิศ วงศ์เจริญแสงสิริ

อาจารย์, คณะบริหารธุรกิจ, สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

85/1 หมู่ 2 ถนนแจ้งวัฒนะ ตำบลบางตลาด อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี 11120,

boonlertwon@gmail.com

Boonlert Wongcharoensangsiri

Lecturer, Faculty of Business Administration, Panyapiwat Institute of Management

85/1 Moo2 Changwattana Road, Bangtalad, Pakkred, Nonthaburi 11120,

boonlertwon@gmail.com

บทคัดย่อ

ธุรกิจค้าปลีกมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง สินค้าคงคลังเป็นปัจจัยสำคัญในการประกอบธุรกิจ เพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการลูกค้าได้อย่างรวดเร็ว การบริหารสินค้าคงคลังให้มีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะเสริมความแข็งแกร่งของธุรกิจค้าปลีก อย่างไรก็ตามด้วยลักษณะความต้องการที่ไม่แน่นอนของลูกค้า ซึ่งเป็นคุณลักษณะพื้นฐานของธุรกิจค้าปลีก จึงทำให้การบริหารสินค้าคงคลังเป็นเรื่องที่ยากในการที่จะควบคุมให้ปริมาณสินค้าคงคลังอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม ไม่มากเกินไปซึ่งจะส่งผลต่อต้นทุนการจัดการ และไม่น้อยเกินไปจนส่งผลกระทบต่อระดับการให้บริการ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาวิธีการจัดการสินค้าคงคลังที่เน้นการจัดการแบบทบทวนระดับสินค้าคงคลังตามรอบเวลา ซึ่งเป็นวิธีการจัดการที่ใช้กันโดยทั่วไปในธุรกิจค้าปลีก โดยเน้นศึกษาเปรียบเทียบวิธีการทบทวนตามรอบ (Periodic Review System, (R,S)) และวิธีการแบบผสม (Hybrid System (R,s,S)) โดยประยุกต์ใช้ Revised Power Approximation Rule เพื่อช่วยคำนวณหาค่า s, S ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเปรียบเทียบประสิทธิผลได้ใช้ข้อมูลของบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งเป็นธุรกิจค้าปลีกขนาดใหญ่ที่มีสาขาและสินค้าอยู่เป็นจำนวนมาก โดยทดสอบกับสินค้าจำนวน 59 รายการซึ่งเป็นสินค้าที่มียอดขายสูงที่สุด พบว่าการจัดการสินค้าคงคลังด้วย

วิธีการแบบผสม โดย Revised Power Approximation Rule มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยมีต้นทุนรวมต่ำที่สุด และระดับการให้บริการดีที่สุด

คำสำคัญ: การจัดการสินค้าคงคลัง, การทบทวนตามรอบเวลา, วิธีการแบบผสม, Revised Power Approximation Rule

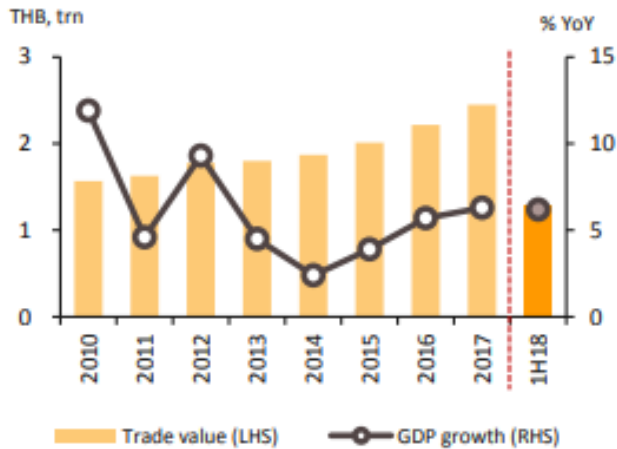
ABSTRACT

Retail Business is continuously growing. Inventory is the key factor for business to respond to customer demand quickly. Effective Inventory management is necessary in strengthening the retail business. However, with uncertain demand which is the nature of retail business, it is daunting task to control the inventory at appropriate level. Overstock causes high total inventory cost while understock leads to low service level. This research focuses on inventory management with periodic review control which is the common policy deployed by retail business. Periodic review system (R, S) and Hybrid System (R, s, S) with Revised Power Approximation Rules are compared. The Revised Power Approximation Rules is effectively compute the value of s and S. The comparison used the data from a big retail business company for case study which has many branches and products items. The test has been conducted with top sale value for 59 product items. It was found that the Hybrid System with Revised Power Approximation Rule excels other methods in both total cost and service level.

KEYWORDS: Inventory Management, Periodic Review System, Hybrid System, Revised Power Approximation Rule

1. บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ธุรกิจร้านค้าปลีกเป็นธุรกิจที่มีแนวโน้มเติบโตอย่างมาก โดยจะเห็นว่ามีมูลค่าการขายในธุรกิจค้าปลีกมีการเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 1 ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งในความสำเร็จของธุรกิจค้าปลีก คือการบริหารจัดการสินค้าคงคลังอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างทันเวลา การจัดการปริมาณสินค้าคงคลังให้เหมาะสม กล่าวคือ ไม่มากเกินไป และไม่น้อยเกินไป เป็นเรื่องที่ยาก เนื่องมาจากเหตุผลหลายประการ เช่น ความต้องการที่ไม่แน่นอนของสินค้า ความหลากหลายของชนิดสินค้า การมีสาขาจำนวนมาก เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลให้ธุรกิจค้าปลีกมีแนวโน้มที่จะต้องจัดเก็บสินค้าคงคลังเป็นจำนวนมาก เพื่อรองรับความต้องการของลูกค้า



รูปที่ 1 แนวโน้มการเติบโตของธุรกิจค้าปลีก [1]

บริษัทกรณีศึกษา เป็นธุรกิจค้าปลีกขนาดใหญ่ มีสาขาจำหน่ายสินค้ามากกว่า 1,000 แห่งกระจายอยู่ทั่วประเทศ มีรายการสินค้าที่ขายหลายร้อยรายการ บริษัทมีคลังกระจายสินค้าเพียงแห่งเดียวซึ่งมีภารกิจหลักในการทำหน้าที่รวบรวมสินค้าจากผู้ส่งมอบทั้งหมด และส่งสินค้าไปยังร้านค้าทุกร้านที่ตั้งกระจายอยู่ทั่วประเทศ คลังกระจายสินค้าแห่งนี้จึงเป็นสถานที่ที่เก็บรวบรวมสินค้าทั้งหมด ซึ่งมีจำนวนมาก ปัญหาที่พบในคลังสินค้าของบริษัทกรณีศึกษาคือ ปริมาณสินค้าที่ถูกส่งมาเก็บไว้ในคลังสินค้ามีเป็นจำนวนมากอันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนของปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่ออุปสงค์และอุปทานของสินค้า ซึ่งเป้าหมายหลักของการปฏิบัติงานในการจัดการคลังสินค้า คือการรักษาระดับการให้บริการ (Service Level) ให้อยู่ในระดับที่สูงตลอดเวลา โดยการที่สามารถส่งสินค้าให้กับร้านค้าได้ทันเวลาเมื่อต้องการ ดังนั้นในการบริหารสินค้าคงคลัง ผู้ปฏิบัติงานจึงใช้ทางเลือกในการสั่งสินค้ามาจัดเก็บไว้เป็นจำนวนมาก เพื่อรองรับความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อระดับการให้บริการได้ โดยความไม่แน่นอนในด้านอุปทาน อาจเกิดขึ้นจากการที่ผู้ส่งมอบไม่สามารถส่งสินค้าได้ตามที่สั่งอย่างทันเวลาเมื่อคลังสินค้าต้องการ ทำให้สินค้าขาด จึงส่งผลกระทบต่ออุปทานที่ไม่สามารถตอบสนองลูกค้าได้ นอกจากนี้ความไม่แน่นอนในด้านอุปสงค์อาจเกิดขึ้นได้ในบางสถานการณ์ เมื่อมีความต้องการยาบางชนิดเป็นจำนวนมากกว่าปกติในท้องตลาด จึงส่งผลให้คลังสินค้าไม่สามารถตอบสนองอุปสงค์ที่เกิดขึ้นได้อย่างทันเวลา อันเนื่องมาจากมีสินค้าคงคลังไม่มากพอต่อความต้องการ

จากแนวทางการบริหารสินค้าคงคลังที่เน้นที่ระดับการให้บริการเป็นหลัก และมีการสั่งสินค้ามาเก็บสต็อกไว้เพื่อจุดประสงค์ในการเผื่อความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้นดังที่ได้กล่าวข้างต้น จึงทำให้ปริมาณสินค้าคงคลังมีปริมาณมากเกินความจำเป็น โดยมีระดับ Safety Stock เฉลี่ยที่ 12 วัน และส่งผลกระทบต่อต้นทุนการจัดการสินค้าคงคลังที่เกินจำเป็น ในขณะที่เดียวกันต้นทุนการบริหารสินค้าคง

คลังอีก รูปแบบหนึ่งคือต้นทุนการสั่งสินค้าในแต่ละครั้ง ซึ่งจะส่งผลต่อต้นทุนรวมของการจัดการสินค้าคงคลังเป็นอย่างมาก

บริษัทกรณีศึกษาใช้ระบบการสั่งซื้อตามรอบ ซึ่งสอดคล้องกับธุรกิจค้าปลีกโดยส่วนใหญ่ที่ตรวจสอบตามรอบ(Periodic Review System) เนื่องจากไม่ต้องใช้เวลาในการติดตามระดับสินค้าคงคลังตลอดเวลา และผู้ส่งมอบสามารถวางแผนการสั่งสินค้าได้แน่นอนตามรอบการสั่งที่ตกลงกันไว้ล่วงหน้า โดยทั่วไปการสั่งซื้อตามรอบเวลาอาจใช้เวลาหลายวันในแต่ละรอบ ในทางปฏิบัติการพบทวนการสั่งซื้อวันละครั้ง สามารถประยุกต์ใช้ระบบการตรวจสอบตามรอบ (Periodic Review System) ในการกำหนดนโยบายการสั่งซื้อได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ระบบการสั่งซื้อตามรอบอาจมีจุดอ่อน ในกรณีที่มีความต้องการสินค้ามีความผันผวนมากในระหว่างช่วงระยะเวลาแต่ละรอบการสั่งซื้อซึ่งอาจส่งผลให้ปริมาณสินค้าไม่เพียงพอต่อความต้องการ เนื่องจากไม่สามารถสั่งซื้อสินค้าได้จนกว่าจะครบรอบการสั่งซื้อ

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมานี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นถึงการเปรียบเทียบแนวทางในการบริหารจัดการสินค้าคงคลัง เพื่อลดปริมาณสินค้าคงคลังลงในขณะที่ยังสามารถรักษาระดับการให้บริการลูกค้าได้ หรืออีกนัยหนึ่งคือการลดต้นทุนการจัดการสินค้าคงคลังลง ในขณะที่คุณภาพของการให้บริการไม่ได้ลดลงและไม่ส่งผลกระทบต่อค่าบริการลูกค้า โดยประยุกต์ใช้ระบบการตรวจสอบตามรอบ (Periodic Review System) และระบบการสั่งซื้อแบบผสม (Hybrid System) [2] ด้วยวิธีการ Revised Power Approximation Rule [3] เพื่อหาระบบการจัดการสินค้าคงคลังที่เหมาะสมกับ ธุรกิจค้าปลีกกรณีศึกษา และนอกจากนี้ ผลการศึกษายังสามารถเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับการจัดการสินค้าคงคลังในธุรกิจอื่น ๆ ที่มีลักษณะคล้ายกันอีกด้วย ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ต่อการจัดการห่วงโซ่อุปทานในภาพรวมของธุรกิจค้าปลีก

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการลดปริมาณสินค้าคงคลังในศูนย์กระจายสินค้าในธุรกิจค้าปลีก โดยที่สามารถรักษาระดับการให้บริการลูกค้า ด้วยระบบการตรวจสอบตามรอบ (Periodic Review System) และระบบการสั่งซื้อแบบผสม (Hybrid System) ด้วยวิธีการ Revised Power Approximation Rule

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การจัดการสินค้าคงคลังต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้องและสามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพ และต้นทุนของการจัดการ [3] เช่น

3.1 การวิเคราะห์กลุ่มของสินค้า

การวิเคราะห์กลุ่มของสินค้า เป็นแนวทางในการคัดเลือกสินค้าที่มีความสำคัญ แยกออกจากสินค้าที่ไม่มีความสำคัญ โดยแนวทางหลักที่นิยมใช้ในการแบ่งกลุ่มสินค้า คือ ABC Analysis ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความสำคัญของสินค้าตามเกณฑ์ของมูลค่าความต้องการของสินค้าในหนึ่งปี โดยสินค้าที่มีมูลค่าความต้องการมากอันดับต้นๆ เมื่อเทียบกับสินค้านำรายการอื่นๆ จะเป็นสินค้าที่มีความสำคัญมาก จัดเป็นสินค้าในกลุ่ม A สินค้าที่มีมูลค่าความต้องการปานกลาง จัดเป็นสินค้าในกลุ่ม B และสินค้าที่มีมูลค่าความต้องการน้อย จัดเป็นสินค้าในกลุ่ม C โดยสินค้ากลุ่ม A อาจมีมูลค่ารวมสูงถึงร้อยละ 60-80 ของมูลค่ารวมของสินค้าทุกรายการ สินค้ากลุ่ม B อาจมีมูลค่ารวมประมาณร้อยละ 15-25 และ สินค้ากลุ่ม C อาจมีมูลค่ารวมประมาณร้อยละ 5-10 ของมูลค่ารวมของสินค้าทุกรายการ

3.2 การพยากรณ์โดยเทคนิคค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบง่าย (Simple Moving Average)

การพยากรณ์เชิงปริมาณมีหลากหลายวิธี วิธีการค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบง่ายเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนและประยุกต์ใช้ง่าย เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานจริงในธุรกิจ โดยใช้หลักการปรับเรียบข้อมูลในอดีตด้วยวิธีการเฉลี่ย ซึ่งมีสูตรการพยากรณ์ดังนี้ [4]

$$MA_n = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \quad (1)$$

เมื่อ D คือ ปริมาณความต้องการในช่วงเวลา i

n คือ จำนวนช่วงเวลาที่นำมาคำนวณค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

3.3 คุณลักษณะของความต้องการ

ลักษณะความต้องการของสินค้าแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ 1) ความต้องการของสินค้าที่สามารถประมาณการได้ชัดเจน (Deterministic Demand) 2) ความต้องการของสินค้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Time-Varying Demand) และ 3) ความต้องการสินค้าที่ประมาณการได้แบบมีความน่าจะเป็น (Probabilistic Demand) ในโลกของธุรกิจที่แท้จริง สินค้าโดยส่วนใหญ่ล้วนมีคุณลักษณะของความ ต้องการแบบความน่าจะเป็น โดยเฉพาะในธุรกิจค้าปลีก ซึ่งความต้องการสินค้าจะมีความไม่แน่นอนอยู่ตลอดเวลา จึงทำให้ทฤษฎีการจัดการสินค้าคงคลังที่ใช้กับความ ต้องการที่สามารถประมาณการได้ชัดเจน ไม่สามารถจัดการสินค้าคงคลังได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่าที่ควร งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการจัดการสินค้าคงคลัง โดยใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความ ต้องการที่ประมาณการได้แบบมีความน่าจะเป็น

3.4 แบบจำลองสินค้าคงคลังที่สามารถประมาณการความต้องการได้แบบมีความน่าจะเป็น (Inventory Model for Probabilistic Demand)

รูปแบบของนโยบายการจัดการสินค้าคงคลัง โดยรูปแบบทั่วไปที่นิยมใช้กัน โดยการกำหนดตัวแปรตัดสินใจต่างๆ ได้แก่

3.4.1 จุดสั่งซื้อ และปริมาณการสั่งซื้อ ((s, Q) System)

รูปแบบนโยบายนี้เป็นการทบทวนการสั่งซื้อแบบต่อเนื่อง โดยเมื่อระดับสินค้าคงคลังอยู่ที่ระดับเท่ากับหรือต่ำกว่า s จะมีการสั่งซื้อในปริมาณ Q

3.4.2 จุดสั่งซื้อ และระดับสินค้าคงคลังเป้าหมาย ((s, S) System)

รูปแบบนโยบายนี้เป็นการทบทวนการสั่งซื้อแบบต่อเนื่อง โดยเมื่อระดับสินค้าคงคลังอยู่ที่ระดับเท่ากับหรือต่ำกว่า s จะมีการสั่งซื้อในปริมาณที่ทำให้ระดับสินค้าคงคลังกลับขึ้นไปอยู่ที่ระดับ S ซึ่งทั้งนโยบาย (s, Q) และ นโยบาย (s, S) มีความคล้ายคลึงกันอย่างมาก และจะส่งผลเหมือนกันในกรณีที่หน่วยสินค้าที่ใช้ไป เป็นหน่วยที่เล็กที่สุดเท่ากับหน่วยสินค้าที่สั่งซื้อ เนื่องจากเมื่อปริมาณสินค้าอยู่ที่ระดับ s พอดี ระบบจะทำการสั่งซื้อที่ปริมาณ Q ซึ่งจะทำให้ระดับสินค้ากลับขึ้นไปอยู่ที่ S ในกรณีนี้ S จึงมีค่าเท่ากับ $s + Q$ อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่หน่วยความต้องการของสินค้ามีขนาดใหญ่มากกว่าหน่วยสินค้าที่สั่งซื้อ ระบบอาจมีการสั่งซื้อเมื่อระดับสินค้าคงคลังตกลงต่ำกว่าระดับ s

3.4.3 รอบเวลาทบทวนการสั่งซื้อ และระดับสินค้าคงคลังเป้าหมาย ((R, S) System)

รูปแบบนโยบายนี้เป็นการทบทวนการสั่งซื้อตามช่วงระยะเวลาที่กำหนด (R) โดยจะมีการทบทวนระดับสินค้าคงคลังทุกๆ ช่วงเวลา R และสั่งซื้อสินค้าในปริมาณที่ทำให้ระดับสินค้ากลับขึ้นไปอยู่ที่ระดับ S โดยจะมีการสั่งซื้อทุกครั้งที่ทบทวนไม่ว่า ระดับสินค้าจะอยู่ที่เท่าไรก็ตาม

3.4.4 รอบเวลาทบทวนการสั่งซื้อ จุดสั่งซื้อ และระดับสินค้าคงคลังเป้าหมาย ((R, s, S) System)

รูปแบบนโยบายนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า เป็นรูปแบบผสม หรือ Hybrid System ซึ่งยังคงเป็นการทบทวนการสั่งซื้อตามช่วงระยะเวลาที่กำหนด (R) โดยจะมีการทบทวนระดับสินค้าคงคลังทุกๆ ช่วงเวลา R แต่จะมีการสั่งซื้อสินค้าเมื่อพบว่าปริมาณสินค้าคงคลังอยู่ที่ระดับ s หรือต่ำกว่า โดยจะทำการสั่งซื้อในปริมาณที่ทำให้ระดับสินค้ากลับขึ้นไปอยู่ที่ระดับ S อย่างไรก็ตาม เมื่อพบว่าระดับสินค้าคงคลังยังอยู่นี้อีกกว่าระดับ s จะไม่มีการสั่งซื้อสินค้าเกิดขึ้น จนกว่าจะถึงรอบการทบทวนปริมาณสินค้าคงคลังในรอบถัดไปและพบว่า ระดับสินค้าคงคลังเท่ากับหรือต่ำกว่า s

การเลือกความถี่ที่เหมาะสมในการทบทวนระดับสินค้าคงคลังนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ต้นทุน หรือเวลาในการทบทวนแต่ละครั้ง ในปัจจุบัน ด้วยเทคโนโลยีที่ทันสมัย ได้มีการนำระบบ POS (Point of Sale) มาใช้เพื่อบันทึกการขายแบบทันทีทั่วทั้งที่ จึงทำให้ต้นทุนและเวลาในการทบทวนระดับสินค้าคงคลังมีน้อยลง เนื่องจากระบบสามารถตัดจ่ายปริมาณสินค้าได้ตลอดเวลาเมื่อมีการขายสินค้าออกไป อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อจำกัดในด้านของการจัดเตรียมและการจัดส่งสินค้าจากแหล่งสินค้า ซึ่งจะต้องทำเป็นรอบๆ ดังนั้นรูปแบบนโยบายที่มีการทบทวนเป็นช่วงเวลาที่มีความเหมาะสมกับสถานการณ์การทำงานในธุรกิจปัจจุบันอยู่ ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่การใช้นโยบายการทบทวนสินค้าคงคลังตามช่วงระยะเวลาที่กำหนด โดยใช้นโยบายการกำหนด รอบเวลาทบทวน การสั่งซื้อ จุดสั่งซื้อ และระดับสินค้าคงคลังเป้าหมาย ((R, s, S) System)

การคำนวณหาค่า R, s, S ให้ได้ค่าที่ดีที่สุดนั้นเป็นเรื่องที่ยากมาก การใช้วิธีการเบื้องต้นโดยทั่วไป ให้ผลได้ไม่ดีเท่าที่ควร จึงมีการคิดค้นวิธีการฮิวริสติกที่หลากหลายเพื่อใช้ในการประมาณการค่า R, s, S โดยที่สามารถคำนวณได้ง่ายกว่าวิธีปกติ โดยหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพคือวิธี Revised Power Approximation Decision Rules ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถประมาณการค่า R, s, S ได้เร็วและไม่ซับซ้อน โดยวิธีนี้ได้ถูกคิดค้นโดย [5] และถูกนำมาประยุกต์กับกฎของ [6] จนได้เป็นวิธีการฮิวริสติก [3] ที่เรียกว่า Revised Power Approximation Decision Rules โดยวิธีการนี้ได้รับการทดสอบประสิทธิภาพแล้วว่าเป็นวิธีการที่หาค่าประมาณการของ จุดสั่งซื้อ (s) และ ระดับสินค้าคงคลังเป้าหมาย (S) ที่เหมาะสมเมื่อกำหนดช่วงเวลาที่ทบทวนระดับสินค้าคงคลัง (R) โดยสามารถทำให้ต้นทุนการจัดการคลังสินค้ามีความใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุด ในขณะที่ยังสามารถรักษาระดับคุณภาพของการให้บริการลูกค้าตามต้องการได้ ประกอบกับวิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยกว่าวิธีการหาค่าที่ดีที่สุด ดังนั้น วิธีการนี้จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดการสินค้าคงคลังในธุรกิจจริงซึ่งมีรายการสินค้าคงคลังมากกว่า 1,000 รายการ

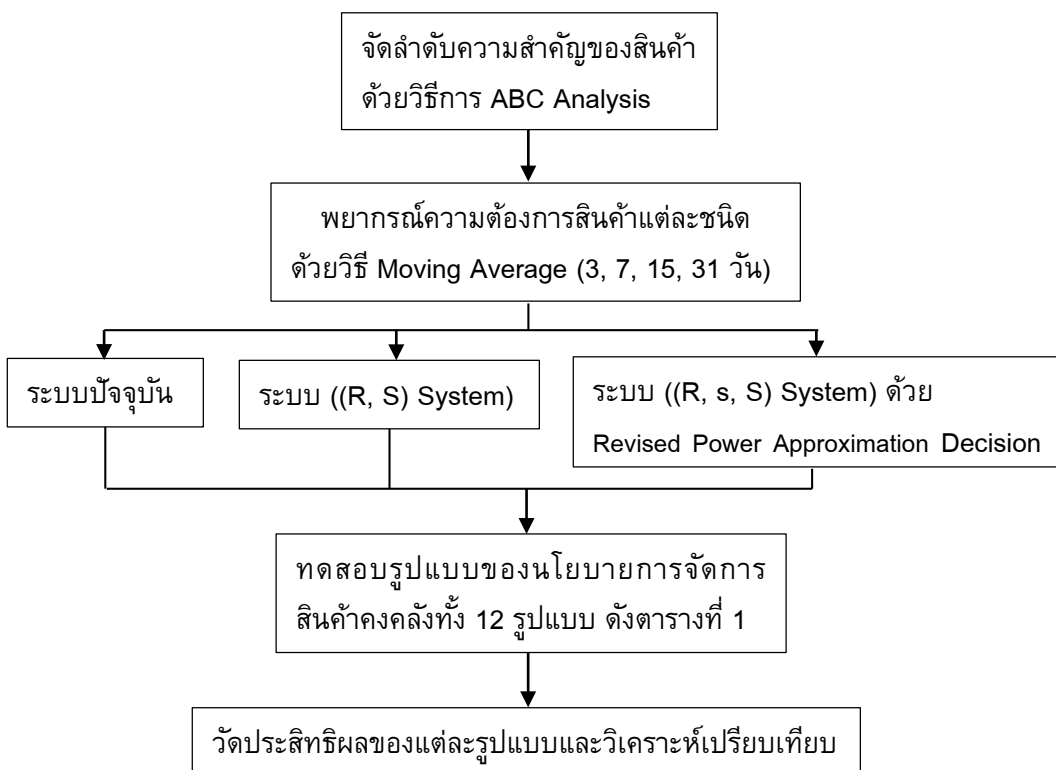
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการจัดการสินค้าคงคลังโดยการตรวจสอบตามรอบมืออยู่หลายลักษณะ ที่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ได้แก่ Bijvank [7] นำเสนอ heuristics algorithm สำหรับการคำนวณหาจุดสั่งซื้อที่เหมาะสม กับวิธีการสั่งซื้อตามรอบ (R, s, S) โดยมุ่งเน้นที่การรักษาระดับการให้บริการให้ได้ตามที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นไปตามคุณลักษณะสำคัญของธุรกิจค้าปลีก นอกจากนี้ Strijbosch [8] ศึกษาประสิทธิภาพของ [9] โดยการทดสอบกับกรณีของ (R, s, S) เมื่อความต้องการและเวลานำอยู่ในรูปแบบ Stochastic เป็นต้น

จากการทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นแล้ว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นถึงการจัดการสินค้าคงคลังของธุรกิจค้าปลีก โดยการจัดแบ่งกลุ่มของสินค้าตามความสำคัญซึ่งจะมีการศึกษาอย่างเฉพาะเจาะจงกับบริษัทกรณีศึกษา ในขั้นตอนถัดไป และจะประยุกต์ใช้การจัดการสินค้าคง

คลังเพื่อรองรับความต้องการที่ไม่แน่นอน โดยการตรวจสอบตามรอบ เพื่อวัตถุประสงค์ในการตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีต้นทุนรวมที่ต่ำลง

4. วิธีดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยโดยแบ่งขั้นตอนออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้ 1) การจัดลำดับความสำคัญของรายการสินค้า 2) การพยากรณ์ความต้องการของสินค้า 3) การคำนวณหาแบบนโยบายการจัดการสินค้าคงคลัง 4) การทดสอบรูปแบบของนโยบาย 5) การวัดประสิทธิผล ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

4.1 การจัดลำดับความสำคัญของรายการสินค้า

ในธุรกิจค้าปลีกทั่วไป มักมีจำนวนรายการสินค้าเป็นจำนวนมาก การจัดลำดับความสำคัญของรายการสินค้าเพื่อให้สะดวกต่อการจัดการจึงเป็นสิ่งจำเป็น แนวทางที่ผู้วิจัยเลือกใช้คือ การวิเคราะห์ลำดับความสำคัญของสินค้าด้วยหลักการ ABC Analysis โดยพิจารณาจากปริมาณสินค้าที่ขายได้ และต้นทุนสินค้าต่อหน่วย โดยใช้สูตร

$$\text{มูลค่าสินค้า} = \text{ปริมาณสินค้าที่ขายได้} \times \text{ต้นทุนสินค้าต่อหน่วย} \quad (2)$$

เมื่อทำการจัดเรียงมูลค่าสินค้าของบริษัทกรณีศึกษา ได้รายการสินค้าทั้งหมดจำนวน 59 รายการจากรายการสินค้าทั้งหมด 483 รายการ ซึ่งครอบคลุมร้อยละ 12.2 ของรายการสินค้าทั้งหมด และ คิดเป็นร้อยละ 80.13 ของมูลค่าสินค้าทั้งหมด ดังนั้นในการวิจัยขั้นต่อไป ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นทดสอบเฉพาะรายการสินค้าที่อยู่ในกลุ่มมูลค่าสูง เท่านั้น

4.2 การพยากรณ์ความต้องการของสินค้า

ในการจัดการสินค้าคงคลัง ปัจจัยที่สำคัญพื้นฐานคือการกำหนดความต้องการของสินค้า เพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลสำหรับการตัดสินใจเพื่อกำหนดนโยบายที่เกี่ยวข้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ การพยากรณ์เป็นแนวทางสำคัญที่ใช้กำหนดความต้องการของสินค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคนิคการพยากรณ์เชิงปริมาณมีมากมายตั้งแต่ขั้นพื้นฐานจนถึงเทคนิคที่ซับซ้อน ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเน้นการลดปริมาณสินค้าคงคลัง ด้วยระบบการตรวจสอบตามรอบ เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของการใช้ระบบการตรวจสอบตามรอบ (Periodic Review System) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้เทคนิคการพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average) เพื่อลดความยุ่งยากในการพยากรณ์ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติในธุรกิจจริงได้อย่างง่ายดาย

ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยนี้ เป็นข้อมูลจากบริษัทกรณีศึกษา ซึ่งเป็นธุรกิจค้าปลีก โดยผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลความต้องการสินค้าจำนวนทั้งสิ้น 558 วันทำการย้อนหลัง และแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 เป็นช่วงของ 90 วันทำการแรก ข้อมูลกลุ่มนี้จะใช้สำหรับการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จะใช้ในการทดสอบ นโยบายการจัดการสินค้าคงคลังในรูปแบบต่างๆ โดยทดสอบกับข้อมูลความต้องการในกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นข้อมูลตั้งแต่วันที่ 91 เป็นต้นไปจนถึงวันที่ 558 เป็นจำนวน 468 วัน

4.3 การคำนวณหาขอบข่ายการจัดการสินค้าคงคลังที่เหมาะสม

บริษัทกรณีศึกษามีรูปแบบการจัดการสินค้าคงคลังโดยใช้ระบบ (R, S) System โดยการกำหนดค่า

$$S = \text{ค่าพยากรณ์ความต้องการสินค้าในวันนั้น} \times (\text{SafetyStockDay} + \text{Lead Time}) \quad (3)$$

โดยจะมีการทบทวนปริมาณสินค้าทุก R วัน และเมื่อปริมาณสินค้าคงคลังต่ำกว่า S จะมีการสั่งซื้อสินค้า โดย

$$\text{ปริมาณการสั่งซื้อ} = S - \text{ปริมาณสินค้าคงคลัง} - \text{ปริมาณสินค้าที่รอรับเข้า} \quad (4)$$

โดยปริมาณสินค้าที่รอรับเข้า หมายถึง ปริมาณสินค้าที่สั่งซื้อไปแล้ว และอยู่ระหว่างรอการส่งมอบ แต่ยังไม่รับเข้าคลังสินค้า

บริษัทกรณีศึกษา มีนโยบายกำหนดให้ Safety Stock Day เท่ากับ 12 วัน สำหรับทุกรายการสินค้า และ Lead Time ของแต่ละรายการสินค้าแตกต่างกันไปตามที่ตกลงกันไว้กับผู้ส่งมอบ ซึ่งมีตั้งแต่ 2-4 วัน โดยบริษัทกรณีศึกษาไม่ได้พิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณความต้องการสินค้า ในการคำนวณเลย

ผู้วิจัยใช้รูปแบบการจัดการสินค้าคงคลังแบบทบทวนตามรอบสำหรับทุกรายการสินค้า เพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการปฏิบัติงานของบริษัทกรณีศึกษา เนื่องจากการทบทวนสั่งซื้อสินค้าเป็นรอบๆ สะดวกต่อการปฏิบัติงานทั้งฝ่ายผู้สั่งซื้อ และผู้ส่งมอบ เนื่องจากสามารถวางแผนการจัดรถขนส่งได้ล่วงหน้า เพราะรู้วันรับคำสั่งซื้อตามรอบที่ตกลงกันไว้ โดยศึกษาระบบการจัดการ 2 ระบบ เพื่อเปรียบเทียบกับระบบปัจจุบัน ในสมการที่ (3) และ สมการที่ (4) โดยระบบที่ผู้วิจัยนำเสนอใหม่คือ

4.3.1 รอบเวลาทบทวนการสั่งซื้อ และระดับสินค้าคงคลังเป้าหมาย ((R, S) System)

ในการจัดการสินค้าคงคลังด้วยวิธีทบทวนตามรอบเวลาด้วยระบบ (R, S) ผู้วิจัยยังคงใช้ค่า R ซึ่งเป็นช่วงเวลาการทบทวนระดับสินค้าคงคลังตามรอบ ที่บริษัทกรณีศึกษากำหนดอยู่เดิม เนื่องด้วยเงื่อนไขการสั่งซื้อและจัดส่งที่ได้ตกลงไว้กับผู้ส่งมอบอยู่ก่อน เพื่อขจัดความยุ่งยากในการเปลี่ยนแปลงรอบการสั่งซื้อและการส่ง โดยใช้รอบเวลาการทบทวนทุก 3 วัน ($R = 3$) ในส่วนของการคำนวณค่า S ซึ่งเป็นระดับสินค้าคงคลังเป้าหมายที่จะต้องรักษาไว้ โดยเมื่อระดับสินค้าคงคลังต่ำกว่าระดับ S ที่กำหนดในวันที่ทบทวน จะต้องทำการสั่งซื้อในปริมาณเท่ากับ [4]

$$\text{ปริมาณการสั่งซื้อ} = S - I \quad (5)$$

$$S = D(R + L) + k\sigma_i\sqrt{R + L} \quad (6)$$

เมื่อ I คือ ระดับสินค้าคงคลัง (หน่วย)

S คือ ระดับสินค้าคงคลังเป้าหมาย (หน่วย)

D คือ ค่าพยากรณ์ความต้องการสินค้ารายวัน

R คือ ช่วงเวลาระหว่างการทบทวนปริมาณสินค้าคงคลัง (วัน)

L คือ เวลาลำนำ (วัน)

σ_i คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้องการสินค้ารายวันในวันที่ i

k คือ ตัวแปรความเผื่อ (Safety Factor) โดย k เป็นค่าสำหรับการกำหนด Safety Stock ตามระดับการให้บริการ

4.3.2 รอบเวลาทบทวนการสั่งซื้อ จุดสั่งซื้อ และระดับสินค้าคงคลังเป้าหมาย ((R, s, S) System)

ผู้วิจัยใช้การคำนวณหา ค่า R, s, S โดยวิธี Revised Power Approximation Decision Rules [3]

ขั้นที่ 1 คำนวณ

$$Q_p = 1.30 \hat{x}_R^{0.494} \left(\frac{A}{vr}\right)^{0.506} \left(1 + \frac{\sigma_{R+L}^2}{\hat{x}_R^2}\right)^{0.116} \tag{7}$$

และ

$$s_p = 0.973 \hat{x}_{R+L} + \sigma_{R+L} \left(\frac{0.183}{z} + 1.063 - 2.192z\right) \tag{8}$$

เมื่อ

$$z = \sqrt{\frac{Q_p r}{\sigma_{R+L} B_3}} \tag{9}$$

$$\hat{x}_R = DR \tag{10}$$

$$\hat{x}_{R+L} = D(R + L) \tag{11}$$

ขั้นที่ 2 ถ้า $\frac{Q_p}{\hat{x}_R} > 1.5$

กำหนดให้

$$s = s_p \tag{12}$$

$$S = s_p + Q_p \quad (13)$$

หากไม่ใช่ ให้ไปที่ขั้นที่ 3

ขั้นที่ 3 คำนวณ

$$S_0 = \hat{x}_{R+L} + k\sigma_{R+L} \quad (14)$$

เมื่อ ค่า k เป็นไปตามสมการ

$$p_u \geq (k) = \frac{r}{B_3+r} \quad (15)$$

ดังนั้น

$$s = \text{ค่าระหว่าง } \{s_p, S_0\} \quad (16)$$

$$S = \text{ค่าที่น้อยสุดระหว่าง } \{s_p + Q_p, S_0\} \quad (17)$$

โดยที่ s คือ จุดสั่งซื้อ (หน่วย)

S คือ ระดับสินค้าคงคลังเป้าหมาย (หน่วย)

B_3 คือ ต้นทุนสินค้าขาดเมื่อสิ้นช่วงเวลาทบทวนปริมาณสินค้าคงคลัง (บาท/บาท (ต้นทุนสินค้า)/วัน)

A คือ ต้นทุนการสั่งซื้อสินค้า (บาท/ครั้ง)

v คือ ต้นทุนสินค้าต่อหน่วยสินค้า (บาท/หน่วย)

r คือ ต้นทุนเก็บรักษาสินค้า (บาท/บาท(ต้นทุนสินค้า)/หน่วย/R วัน)

D คือ ค่าพยากรณ์ความต้องการสินค้ารายวัน

R คือ ช่วงเวลาระหว่างการทบทวนปริมาณสินค้าคงคลัง (วัน)

L คือ เวลามา (วัน)

\hat{x}_i คือ ค่าพยากรณ์ความต้องการสินค้าในช่วงเวลา i

σ_i คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้องการสินค้ารายวันในวันที่ i

k คือ ตัวแปรความเผื่อ (Safety Factor) โดย k เป็นค่าสำหรับการกำหนด Safety Stock ตามระดับการให้บริการ ซึ่ง ค่า Safety Stock = $k\sigma_{R+L}$

$p_u \geq (k)$ คือ ค่าความน่าจะเป็นที่ความต้องการสินค้าในช่วงเวลา $R + L$ มากกว่า S_0

4.4 การทดสอบรูปแบบของนโยบายการจัดการสินค้าคงคลัง

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบผลของนโยบายต่างๆ ในรูปแบบที่แตกต่างกัน เพื่อเทียบกับนโยบายการจัดการแบบเดิมของบริษัทกรณีศึกษา ตามเงื่อนไข ดังตารางที่ 1

ผู้วิจัยทำการทดสอบผลของนโยบายที่แตกต่างกัน ทั้งสิ้น 12 รูปแบบ โดยแบ่งออกเป็นระบบ (R,S) และระบบ(R,s,S) นอกจากนี้ยังทดสอบประสิทธิผลของระบบทั้งสอง ในเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ของค่าพยากรณ์ความต้องการสินค้ารายวัน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้องการสินค้ารายวันด้วย

ในรูปแบบที่ 1 ถึง 5 และรูปแบบที่ 7 ถึง 11 จะมีการคำนวณค่า s และ S ใหม่ในทุกๆ R วัน หรือทุกๆวันที่มีการทบทวนระดับปริมาณสินค้าคงคลังเพื่อตัดสินใจสั่งซื้อ แต่ในรูปแบบที่ 6 และ 12 จะคำนวณหาค่า s และ S เพียงครั้งเดียวในตอนเริ่มต้น และไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกเลย เนื่องจากกำหนดให้ค่าพยากรณ์ความต้องการรายวัน และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าคงที่ตลอด

ตารางที่ 1 รายละเอียดของรูปแบบการจัดการสินค้าคงคลังที่ใช้ในการทดสอบ

รูปแบบ	ระบบ	ค่าพยากรณ์ความต้องการรายวัน	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้องการรายวัน
1	(R,S)	MA(3)	เคลื่อนที่
2	(R,S)	MA(7)	เคลื่อนที่
3	(R,S)	MA(15)	เคลื่อนที่
4	(R,S)	MA(30)	เคลื่อนที่
5	(R,S)	คงที่	เคลื่อนที่
6	(R,S)	คงที่	คงที่
7	(R,s,S)	MA(3)	เคลื่อนที่
8	(R,s,S)	MA(7)	เคลื่อนที่
9	(R,s,S)	MA(15)	เคลื่อนที่
10	(R,s,S)	MA(30)	เคลื่อนที่
11	(R,s,S)	คงที่	เคลื่อนที่
12	(R,s,S)	คงที่	คงที่

โดยค่าพยากรณ์ความต้องการของสินค้ารายวัน ในรูปแบบที่ 1 ถึง 4 และ รูปแบบที่ 7 ถึง 11 ได้มาจากการพยากรณ์โดยเทคนิคการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average, MA) ที่ช่วงเวลาที่แตกต่างกันไป ตั้งแต่ 3, 7, 15, 30 วัน โดยค่าพยากรณ์จะเปลี่ยนในแต่ละวัน ในกรณี “คงที่” หมายถึงการใช้ค่าพยากรณ์เฉลี่ยของข้อมูลกลุ่มที่ 1 (90 วันแรก) ตลอดระยะเวลาการคำนวณโดยไม่เปลี่ยนแปลง

ในส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความต้องการสินค้ารายวัน กรณี “เคลื่อนที่” หมายถึงการใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการคำนวณค่าความต้องการจำนวน 90 วันย้อนหลัง เช่น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ใช้ในวันที่ 91 คือค่าที่คำนวณจากความต้องการวันที่ 1 ถึงวันที่ 90 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ใช้ในวันที่ 92 คือค่าที่คำนวณจากความต้องการวันที่ 2 ถึงวันที่ 91 เป็นต้น

ในกรณี “คงที่” หมายถึงการใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลกลุ่มที่ 1 (90 วันแรก) ตลอดระยะเวลาการคำนวณโดยไม่เปลี่ยนแปลง

4.5 การวัดประสิทธิผล

การวัดประสิทธิผลของแต่ละรูปแบบที่น่าเสนอ พิจารณาจากต้นทุนการจัดการสินค้าคงคลัง ซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลัง ต้นทุนการสั่งซื้อ ต้นทุนเสียโอกาส เนื่องจากสินค้าไม่เพียงพอต่อความต้องการ โดยสามารถคำนวณหาต้นทุนต่างๆได้ ดังนี้

$$\text{ต้นทุนรวม} = \text{ต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลัง} + \text{ต้นทุนการสั่งซื้อ} + \text{ต้นทุนเสียโอกาส} \quad (18)$$

$$\text{ต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลัง} = \text{ปริมาณสินค้าคงคลังแต่ละวัน} \times \text{ต้นทุนการจัดเก็บสินค้าคงคลังต่อหน่วยต่อวัน} \quad (19)$$

$$\text{ต้นทุนการสั่งซื้อ} = \text{จำนวนครั้งของการสั่งซื้อ} \times \text{ต้นทุนการสั่งซื้อต่อครั้ง} \quad (20)$$

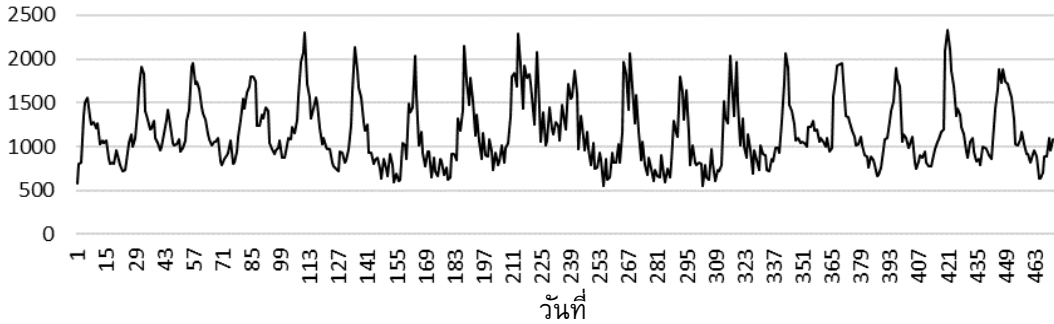
$$\text{ต้นทุนเสียโอกาส} = \text{ผลรวมของจำนวนของสินค้าที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการในแต่ละวัน} \times \text{ต้นทุนเสียโอกาสต่อหน่วยต่อวัน} \quad (21)$$

5. ผลการวิจัย

5.1 ตัวอย่างการคำนวณ

สินค้า A ซึ่งเป็นสินค้าตัวอย่างที่ใช้ในการแสดงการคำนวณ มีปริมาณความต้องการแสดงดังรูปที่ 3

ปริมาณความต้องการสินค้ารายวัน (หน่วย)



รูปที่ 3 ปริมาณความต้องการของสินค้า A

ในการทดสอบทั้ง 12 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปแบบปัจจุบันได้ถูกคำนวณและวัดประสิทธิภาพเพื่อเปรียบเทียบกัน ในตัวอย่างการคำนวณนี้ นำเสนอรูปแบบที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในวิธีการ Periodic Review System (รูปแบบ 1-6) ซึ่งคือ รูปแบบที่ 4 และรูปแบบที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในวิธีการ Hybrid System (รูปแบบที่ 7-12) ซึ่งคือ รูปแบบที่ 10

ในการคำนวณหาค่า S ของรูปแบบที่ 4 และ ค่า s, S ของรูปแบบที่ 10 ในวันที่ 92 จะใช้ค่าพยากรณ์ความต้องการของวันที่ 92 โดยในตัวอย่างนี้จะได้ค่าพยากรณ์จากวิธี MA(30) ดังนั้น MA(30) ของวันที่ 92 ได้จากการเฉลี่ยความต้องการของวันที่ 62 ถึง 91 ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 1,002 หน่วย และหมายถึง D = 1,002 หน่วย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลความต้องการรายวัน (σ) = 320 ซึ่งคำนวณจากปริมาณความต้องการสินค้าย้อนหลังตั้งแต่วันที่ 2 ถึงวันที่ 91 โดยผู้วิจัยกำหนดช่วงระยะเวลา 90 วัน สำหรับข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สำหรับข้อมูลอื่นซึ่งเป็นเงื่อนไขการจัดการสินค้าคงคลัง ได้แก่ R = 3 วัน, L = 3 วัน, A = 1,000 บาท/ครั้ง, v = 138 บาท/หน่วย, r = 0.001 บาท/บาท/หน่วย/3วัน, B3 = 1 บาท/บาท/วัน, k = 2.33 เนื่องจากกำหนดให้โอกาสที่จะมีสินค้าไม่เพียงพอต่อความต้องการน้อยกว่า 1% หรืออีกนัยหนึ่งคือ ระดับการให้บริการที่ระดับ 99% จึงได้ค่ามาตรฐานสำหรับระดับความมั่นใจที่ 99% เท่ากับ 2.33

5.1.1 การคำนวณโดยใช้วิธี Periodic Review System

จากสมการที่ (6)

$$S = 1,002(3 + 3) + 2.33 \times 320\sqrt{3 + 3}$$

$$\sim 7,838 \text{ หน่วย}$$

5.1.2 การคำนวณโดยใช้วิธี Revised Power Approximation Decision Rules

จากสมการที่ (7) ถึง (17)

ขั้นที่ 1 คำนวณ

$$\hat{x}_R = 1,002 \times 3 = 3,006 \text{ หน่วย}$$

$$\hat{x}_{R+L} = 1,002 \times (3+3) = 6,012 \text{ หน่วย}$$

$$\sigma_{R+L} = 320 \times \sqrt{3+3} = 783$$

$$Q_p = 1.30(3,006)^{0.494} \left(\frac{1,000}{133 \times 0.001} \right)^{0.506} \left(1 + \frac{783^2}{3,006^2} \right)^{0.116}$$

$$= 6,261.93$$

$$Z = \sqrt{\frac{6,261.93(0.001)}{783(1)}}$$

$$= 0.089$$

$$s_p = 0.973 (6,012) + 783 \left(\frac{0.183}{0.089} + 1.063 - 2.192(0.089) \right)$$

$$= 8,139.24$$

ขั้นที่ 2

เพราะ $\frac{6,261.93}{3,006} > 1.5$

กำหนดให้

$$s = 8,139.24 \text{ หน่วย}$$

$$S = 8,139.24 + 6,261.93$$

$$\sim 14,401 \text{ หน่วย}$$

5.1.3 การคำนวณโดยใช้วิธีปัจจุบัน

จากสมการที่ (3) บริษัทกรณีศึกษาใช้การพยากรณ์ MA(7) เพื่อพยากรณ์ปริมาณความต้องการสินค้าในแต่ละวันตลอดการคำนวณ ซึ่งจากการคำนวณ MA(7) ของวันที่ 92 เท่ากับ 1,220 หน่วย

$$S = 1,220 \times (12 + 3)$$

$$= 18,300 \text{ หน่วย}$$

5.2 เปรียบเทียบผล

เมื่อทดสอบการใช้งานของรูปแบบทั้ง 12 แบบ และรูปแบบปัจจุบันที่บริษัทกรณีศึกษาใช้อยู่กับข้อมูลปริมาณความต้องการย้อนหลังรายวันของสินค้า A จำนวน 468 วัน และวัดประสิทธิผลของทุกรูปแบบได้ผลดังตารางที่ 2 โดยจะเห็นได้ว่า รูปแบบที่ 10 มีต้นทุนรวมต่ำที่สุด เท่ากับ 247,487 บาท ซึ่งเป็นผลมาจากจำนวนครั้งที่สั่งซื้อน้อยที่สุด เท่ากับ 59 ครั้ง และมีปริมาณสินค้าที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการ (Backorder) ต่ำที่สุด เท่ากับ 18 หน่วย หรือคิดเป็น 0.003% ของปริมาณความต้องการสินค้าทั้งหมดใน 468 วัน เมื่อเทียบกับรูปแบบที่ 1 ถึง 6 ซึ่งเป็นวิธีการ Periodic Review แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ Backorder ของวิธีปัจจุบันจะมีค่าเท่ากัน

หากพิจารณาจากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า รูปแบบที่ 4 ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีต้นทุนรวมต่ำที่สุดสำหรับวิธี Periodic Review มีปริมาณสินค้าที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการเกิดขึ้นหลายครั้ง ดังจะเห็นได้ว่ากราฟเส้นปริมาณสินค้าคงคลังตกลงต่ำกว่า ปริมาณความต้องการสินค้าหลายครั้ง จนทำให้มีสินค้ารองรับความต้องการไม่เพียงพอรวมเท่ากับ 4,836 หน่วย เมื่อเทียบกับรูปแบบที่ 10 และรูปแบบปัจจุบัน จึงทำให้ต้นทุนรวมสูง ถึงแม้ว่าระดับสินค้าคงคลังเฉลี่ยที่ 4,374 หน่วย จะเป็นระดับที่ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับรูปแบบที่ 10 และรูปแบบปัจจุบันก็ตาม

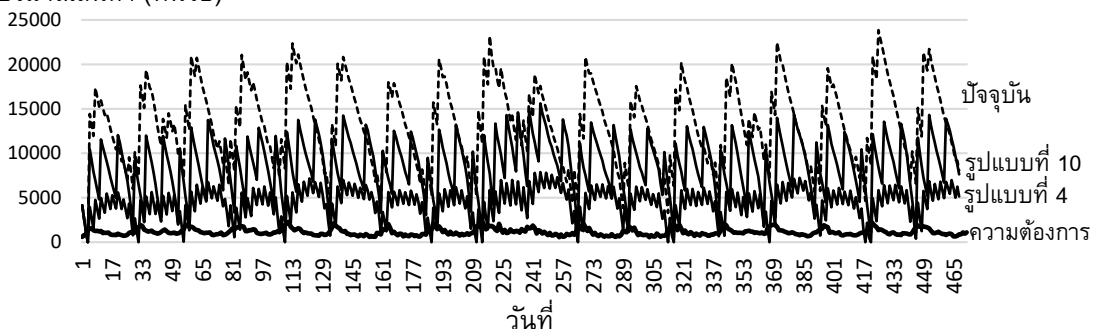
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิผลของทุกรูปแบบแล้ว จะเห็นได้ว่าเกือบทุกรูปแบบสามารถจัดการสินค้าคงคลังได้ โดยมีปริมาณสินค้าที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการ ต่ำกว่า 5% ยกเว้น รูปแบบที่ 6 ซึ่งมีระดับปริมาณสินค้าคงคลังเฉลี่ยต่ำที่สุด (2,952 หน่วย) จึงส่งผลให้ มีค่า Backorder สูงกว่า 5%

ประเด็นสำคัญอีกประการหนึ่งที่พบคือ ในสินค้า A วิธีการพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ 3 วัน เป็นวิธีการพยากรณ์ที่มีค่า MAPE (Mean Absolute Percentage Error) น้อยที่สุด เท่ากับ 15% เมื่อเทียบกับวิธีอื่น คือ MA(7), MA(15), และ MA(30) ซึ่งมีค่า MAPE เท่ากับ 24%, 35% และ 17% ตามลำดับ แต่เมื่อนำค่าพยากรณ์จากทั้ง 4 วิธีมาใช้ในการจัดการสินค้าคงคลังในรูปแบบต่างๆ ดังตารางที่ 1 พบว่า รูปแบบที่มีประสิทธิผลมากที่สุด ในด้านต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด คือรูปแบบที่ 4 และ รูปแบบที่ 10 ซึ่งเป็นผลจากการใช้ค่าพยากรณ์ของวิธี MA(30) จากผลการทดสอบนี้ ทำให้เห็นได้ว่า การใช้ค่าพยากรณ์จากวิธีการที่มีค่า MAPE น้อยที่สุด อาจไม่ใช่การรับรองถึงประสิทธิผลของการจัดการสินค้าคงคลังที่จะได้ต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุดเสมอ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปแบบต่าง ๆ

รูปแบบ	จำนวนครั้งที่สั่งซื้อ	ปริมาณเฉลี่ยสินค้าคงคลังต่อวัน (หน่วย)	รวมปริมาณสินค้าที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการ (หน่วย)	ต้นทุนรวม (บาท)	%ปริมาณสินค้าที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการ
1	151	4,440	14,223	2,209,315	2.63%
2	155	4,458	21,737	2,209,315	4.02%
3	155	4,442	22,236	3,319,205	4.11%
4	155	4,374	4,836	916,524	0.89%
5	155	3,210	22,091	3,272,306	4.08%
6	155	2,952	27,589	4,025,848	5.10%
7	62	8,864	18	255,357	0.003%
8	63	9,093	18	261,292	0.003%
9	63	8,958	18	257,960	0.003%
10	59	8,638	18	247,487	0.003%
11	67	7,445	410	283,894	0.08%
12	67	6,933	1,637	442,162	0.30%
ปัจจุบัน	106	13,188	18	392,451	0.003%

ปริมาณสินค้า (หน่วย)



รูปที่ 4 เปรียบเทียบระดับสินค้าคงคลังรายวันของการจัดการสินค้าคงคลังในรูปแบบที่ 4, 10, ปัจจุบัน และปริมาณความต้องการสินค้า A รายวัน

6. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากการทดสอบโดยใช้วิธีการทั้ง 3 วิธี ในรูปแบบทั้งหมด 13 รูปแบบ ตามเงื่อนไขดังตารางที่ 2 กับสินค้าจำนวน 59 รายการของบริษัทกรณีศึกษา เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยรวมของวิธีการทั้ง 3 ดังรายละเอียดในตารางที่ 3 โดยพิจารณาจาก ปริมาณสินค้าคงคลังเฉลี่ย ปริมาณสินค้าคงคลังรวมร้อยละของปริมาณสินค้าที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการเมื่อเทียบกับความต้องการรวม และต้นทุนรวม จะเห็นได้ว่า วิธีการจัดการสินค้าคงคลังแบบ Revised Power Approximation Rule ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าในด้านต้นทุนรวม ที่เท่ากับ 5,941,867 บาท ซึ่งต่ำกว่าวิธีการปัจจุบัน ซึ่งมีต้นทุนรวม 12,392,430 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 52 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในด้านปริมาณสินค้าคงคลังเฉลี่ย วิธีการ Revised Power Approximation Rule ก็ยังสามารถจัดการได้ต่ำกว่าวิธีการปัจจุบันถึง ร้อยละ 15.7 และเมื่อพิจารณาด้านระดับการให้บริการที่วัดผลจากร้อยละของสินค้าที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการเมื่อเทียบกับความต้องการรวมทั้งหมด พบว่าระดับการให้บริการของวิธีการ Revised Approximation Rule ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.11 ต่ำกว่า วิธีปัจจุบัน ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.62 หรือคิดเป็นร้อยละ 93 (เทียบค่าลดลงจาก 1.62 ไปยัง 0.11)

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของวิธีการ Periodic Review System พบว่าสามารถจัดการให้มีปริมาณสินค้าคงคลังเฉลี่ยได้ต่ำที่สุด คือ 310,733 หน่วย ซึ่งต่ำกว่า วิธีปัจจุบันถึงร้อยละ 67 และต่ำกว่าวิธี Revised Power Approximation Decision Rules ร้อยละ 60.8 อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ทำให้ระดับการให้บริการ หรือร้อยละของสินค้าไม่เพียงพอต่อความต้องการสูงกว่าวิธีอื่น คือที่ ร้อยละ 1.76

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการทั้ง 3 วิธีการ

วิธีการจัดการสินค้าคงคลัง	ปริมาณสินค้าคงคลังเฉลี่ย (หน่วย)	ปริมาณสินค้าคงคลังรวม (หน่วย)	%สินค้าไม่เพียงพอต่อความต้องการ	ต้นทุนรวม (บาท)
Periodic Review	310,733	145,422,955	1.76%	20,759,702
Revised Power Approximation Decision Rules	793,628	371,359,873	0.11%	5,941,867
ปัจจุบัน	942,109	440,906,793	1.62%	12,392,430

ในการเลือกวิธีการที่จะไปประยุกต์ใช้สำหรับการจัดการสินค้าคงคลัง ขึ้นอยู่กับเป้าหมายของการนำไปใช้ หากเป้าหมายของการนำไปใช้คือการควบคุมต้นทุนรวมให้ได้ต่ำที่สุด วิธีการ Revised

Power Approximation Decision Rules ถือว่าเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในกรณีนี้ หากเป้าหมายของการนำไปใช้คือ มุ่งเน้นที่การลดปริมาณสินค้าคงคลัง ก็สามารถประยุกต์ใช้วิธีการ Periodic Review แต่ทั้งนี้ก็มีความเสี่ยงสูงต่อการที่สินค้าไม่เพียงพอต่อความต้องการ ทำให้ระดับการให้บริการต่ำลง และส่งผลต่อต้นทุนโดยรวมที่สูงขึ้น เนื่องจากต้นทุนเสียโอกาสที่สูงขึ้น

7. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้ Revised Power Approximation Decision Rules กับกรณีศึกษาเกี่ยวกับธุรกิจค้าปลีก ซึ่งเป็นการมุ่งเน้นถึงผลของการจัดการสินค้าคงคลังโดยเน้นที่ต้นทุนรวม และระดับการให้บริการเป็นหลัก การวิจัยศึกษาเพิ่มเติมถึงปัจจัย หรือเงื่อนไขต่างๆ ที่มีผลกับ Revised Power Approximation Decision Rules เช่น ต้นทุนการสั่งซื้อในแต่ละครั้ง ต้นทุนการเก็บรักษาสินค้า ต้นทุนเสียโอกาสเนื่องจากสินค้าไม่เพียงพอต่อความต้องการ หรือค่าพยากรณ์ความต้องการของสินค้าจากเทคนิคการพยากรณ์ที่แตกต่างกัน อาจมีผลต่อประสิทธิภาพของเทคนิคนี้ จึงเป็นประเด็นการวิจัยที่น่าสนใจและจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อไป

References

- [1] Poonsuk Ninkitsaranont. Modern trade. Thailand industry outlook 2018 - 20. Bangkok: Krungsri Research, 2018. (In Thai)
- [2] Krajewski LJ, Manoh KM, Larry PR. Operations management: process and supply chain. 11th ed. Essex: Pearson Education Publishing, 2016.
- [3] Silver EA, Pyke DF, Douglas JT. Inventory and production management in supply chains: 4th ed. Florida: CRC Press, 2017.
- [4] Taylor BW, Russell RS. Operations and supply chain management. 8th ed. Asia: John Wiley & Sons, 2014
- [5] Ehrhardt R, Mosier C. A revision of the power approximation for computing (s, S) policies. Management Sciences 1984;30:618-22.
- [6] Robert DM. Approximations to optimal policies in a dynamic inventory model. California: Stanford University Press/Office of Naval Research; 1959. Report No.: 12.
- [7] Bijvank M, and Vis FI. Lost-sales inventory systems with a service level criterion. Production, Manufacturing and Logistics 2012;3:610-8.
- [8] Strijbosch LWG., and Moors JJA. Simulating an (R,s,S) inventory system. Center Discussion Paper, Tilburg: Econometrics. 2002; 2002-94.

- [9] Moors JJA, and Strijbosch LWG. Exact fill rates for (R, s, S) inventory control with Gamma distributed demand. Journal of Operational Research Society 2002;53:1268-74.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร. บุญเลิศ วงศ์เจริญแสงสิริ สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ 85/1 หมู่ 2 ถนนแจ้งวัฒนะ ตำบลบางตลาด อำเภอปากเกร็ด นนทบุรี โทรศัพท์: 02 855 1247 Email: boonlertwon@gmail.com

งานวิจัยที่สนใจ: การจัดการโลจิสติกส์และซัพพลายเชน, การจัดการการปฏิบัติการและบริการ, การจัดการธุรกิจการค้าสมัยใหม่, การประยุกต์ใช้ Blockchain และ Big Data ในธุรกิจ

อุปสรรคและการส่งเสริมของการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร
สำหรับผู้รับเหมาก่อสร้างขนาดกลางในจังหวัดกรุงเทพมหานคร
**OBSTACLES AND ENCOURAGEMENT OF PRACTICAL BIM
IMPLEMENTATION FOR MEDIUM SIZED CONTRACTORS IN BANGKOK**

กมลทิพย์ จงจิตร์¹ และ อภิชาติ ประสิทธิ์สม²

¹นักศึกษา, หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต,
1761 ถนนพัฒนาการ แขวง/เขต สวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250, kamontip.j66@hotmail.com

²อาจารย์, หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต,
1761 ถนนพัฒนาการ แขวง/เขต สวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250, apichart.w@outlook.com

Kamontip Jongjit¹ and Apichart Prasitsom²

¹Student of Engineering in Civil Engineering Kasembundit University,
1761 Pattanakarn Rd., Suanluang Bangkok 10250 Thailand, kamontip.j66@hotmail.com

²Lecturer of Engineering in Civil Engineering Kasembundit University,
1761 Pattanakarn Rd., Suanluang Bangkok 10250 Thailand, apichart.w@outlook.com

บทคัดย่อ

การที่รัฐบาลมีนโยบายประเทศไทย 4.0 ที่เน้นการนำเทคโนโลยีเข้ามาปรับใช้ ซึ่งเป็นแนวคิดที่จะนำโครงสร้างเศรษฐกิจไปสู่เศรษฐกิจที่ขับเคลื่อนด้วยนวัตกรรม และการเข้าร่วมเป็นหนึ่งในประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน ซึ่งเป็นช่วงเวลาแห่งการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญสำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้าง และแบบจำลองแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling, BIM) คือแนวคิดและกระบวนการที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาการบริหารงานก่อสร้างตั้งแต่ขั้นตอนของการออกแบบ โดยแนวคิดดังกล่าวสนับสนุนงานออกแบบก่อสร้างด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถระบุข้อมูลทางกายภาพพร้อมลักษณะการทำงานของส่วนประกอบอาคาร และแสดงผลให้เห็นในรูปของแบบจำลองสามมิติ พร้อมทั้งยังแสดงบัญชีปริมาณงานได้ในคราวเดียว เทคโนโลยีนี้สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายๆ ด้าน อาทิเช่น สามารถใช้แสดงเอกสารการประกวดราคา หรือใช้นำเสนอโครงการต่อผู้เกี่ยวข้อง หรือใช้วางแผนงานก่อสร้างและบริหารทรัพยากร เพิ่มความปลอดภัยในการดำเนินโครงการไม่เพียงแต่ในขั้นตอนการออกแบบแต่รวมถึงการจำลองการส่งมอบงานเมื่อเสร็จสิ้นโครงการได้อีกด้วย การศึกษารั้ครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอุปสรรคและการส่งเสริมของการประยุกต์ใช้ BIM สำหรับผู้รับเหมาก่อสร้าง โดยวิธีสุ่มตัวอย่างบุคลากรที่เกี่ยวข้อง

ในบริษัทรับเหมาก่อสร้าง จำนวน 70 ตัวอย่าง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยเป็นแบบสอบถามแบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ ผลการศึกษาสามารถจำแนกอุปสรรคในการประยุกต์ใช้ BIM ได้เป็น 5 ประเด็นหลัก เรียงตามระดับความสำคัญของค่าเฉลี่ยจากมากที่สุดไปหาน้อยที่สุด คือ อุปสรรคจากองค์ความรู้มีความสำคัญมากที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.42 และอุปสรรคจากรูปแบบการทำงานขององค์กรมีความสำคัญมากอันดับที่สองซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.19 และอุปสรรคจากเทคโนโลยีด้านฮาร์ดแวร์ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.88 และยังแปลผลอยู่ในระดับมากเป็นอันดับที่สามและถดถลงมาในอันดับที่สี่และห้าซึ่งแปลผลความสำคัญอยู่ในระดับปานกลาง คือ อุปสรรคจากทัศนคติส่วนบุคคลซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.24 และอุปสรรคจากเทคโนโลยีด้านซอฟต์แวร์โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.23 ตามลำดับ ทั้งนี้ในส่วนของแนวทางส่งเสริมการประยุกต์ใช้ BIM สำหรับผู้รับเหมา พบว่ามี 2 แนวทาง ได้แก่ การสนับสนุนให้เจ้าของงานกำหนดให้ใช้ BIM เป็นหนึ่งเงื่อนไขใน TOR เพื่อคัดเลือกผู้รับเหมา และการสนับสนุนในการเพิ่มความรู้ความสามารถในการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สนับสนุน BIM แก่บุคลากร

คำสำคัญ: อุปสรรคการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร , แบบจำลองสารสนเทศอาคาร, บริษัทรับเหมาก่อสร้างขนาดกลาง

ABSTRACT

The Thailand 4.0 policy that focuses on applying technology is the idea that pushes the economy with innovation and to become a part of the ASEAN Community. It is the time of major changes for the construction industry. Building Information Modeling (BIM) is the idea and the process that has been developed to solve the construction management starting from the designing process. This idea supports the construction design by the computer system which is able to indicate the physical data, working characteristics of the buildings, and to demonstrate the data in a 3D model, including bill of quantity. This technology can be applied to several works such as representing bidding document or project presentation to related persons or planning of construction and resource management. Moreover, it increases the safety in the operation, not only the designing process but also the modeling of project delivery after the completion. This research purposed to study obstacles and promotion of BIM application for contractors. The random sampling method was used to select the sample group of 70 people who associated with construction companies. The 5-rating scales questionnaire was the tool. According to the study, the application of BIM can be divided into 5 main topics, considering from the highest mean to the least mean; there

are the obstacle of knowledge has the mean at 4.42, the obstacle of working type of the organization at 4.19; the obstacle of hardware technology at 3.88, respectively. The forth and the fifth remain at the medium level, which are the obstacle of personal attitude at 3.24 and the obstacle of software technology at 3.23, respectively. And, for the contractors, there were two guidelines for encouragement in BIM application as follows: (1) the construction project owners should be supported in putting the BIM as one of requirements in TOR for selecting contractors, and (2) the personnel should be supported in enhancing their knowledge and ability on application of the program for supporting BIM.

KEYWORDS: Obstacles of practical BIM, Building information modeling (BIM), Medium sized contractors

1. บทนำ

แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling, BIM) คือ แนวคิดและกระบวนการที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาการบริหารงานก่อสร้างตั้งแต่ขั้นตอนของการออกแบบ ซึ่งเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของกระบวนการก่อสร้าง [1] โดยแนวคิดดังกล่าวพัฒนาขึ้นเพื่อสนับสนุนงานออกแบบก่อสร้างด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถระบุข้อมูลทางกายภาพพร้อมลักษณะการทำงานของส่วนประกอบอาคาร และแสดงผลให้เห็นในรูปของแบบจำลองสามมิติ พร้อมทั้งยังแสดงบัญชีปริมาณงาน (Bill of Quantity) (BOQ) ได้ในคราวเดียว เมื่อสามารถมองเห็นรายละเอียดของแบบจำลองเสมือนอาคารจริง ก็ทำให้มองเห็นปัญหาและจุดเสี่ยงที่จะทำให้เกิดปัญหารวมทั้งการปรับแก้ไขปัญหาต่างๆ ในสภาพแวดล้อมด้วยแบบจำลอง ทำให้สามารถบริหารจัดการงานก่อสร้างได้ดียิ่งขึ้น เพิ่มความสามารถที่จะหลีกเลี่ยงความล่าช้าและลดค่าใช้จ่ายของโครงการในการทำงานจริงได้ [2] เทคโนโลยีนี้สามารถประยุกต์ใช้งานได้ในหลายๆ ด้าน อาทิเช่น สามารถใช้แสดงเอกสารการประกวดราคา หรือใช้นำเสนอโครงการต่อผู้เกี่ยวข้อง หรือใช้วางแผนงานก่อสร้างและบริหารทรัพยากร เพิ่มความปลอดภัยในการดำเนินโครงการไม่เพียงแต่ในขั้นตอนการออกแบบ แต่รวมถึงการจำลองการส่งมอบงานเมื่อเสร็จสิ้นโครงการได้อีกด้วย [2, 3]

การประยุกต์ใช้ BIM ในบริษัทรับเหมาก่อสร้างขนาดกลางอาจมีหลายๆ ปัจจัยที่สนับสนุนให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแต่ในขณะเดียวกันก็มีอุปสรรคขัดขวางอันนำไปสู่การปฏิเสธเช่นกัน สำหรับประโยชน์ของการประยุกต์ใช้ BIM ในองค์กร ได้แก่ BIM ช่วยลดปัญหาการบริหารจัดการข้อมูลงานก่อสร้าง ช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายของโครงการเมื่อก่อสร้างจริง ช่วยเพิ่มความถูกต้องของข้อมูลนำมาสู่การเพิ่มโอกาสชนะคู่แข่งในตลาดด้วยผลงานที่มีประสิทธิภาพ และภาพลักษณ์ที่ส่งเสริมความเป็นมืออาชีพขององค์กร [3] และสำหรับอุปสรรคขัดขวาง ได้แก่ ความยากง่ายของการใช้งาน

ตัวโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การเพิ่มภาระหน้าที่และความรับผิดชอบของบุคลากรที่เกี่ยวข้อง ระดับทักษะความรู้ความสามารถและประสบการณ์การทำงานของแต่ละบุคคล การที่บุคลากรมีทัศนคติเชิงลบ การที่องค์กรต้องเพิ่มเงินลงทุนเพื่อเตรียมความพร้อม และสุดท้ายความคุ้มค่าต่อการลงทุน เป็นต้น [3, 4]

ทั้งนี้ปัจจัยสนับสนุนและอุปสรรคอาจแตกต่างกันระหว่างองค์กรขนาดใหญ่กับองค์กรขนาดกลางและองค์กรขนาดเล็ก กล่าวคือ องค์กรขนาดใหญ่มีความพร้อมด้านเงินทุนที่จะสนับสนุนการประยุกต์ใช้ BIM ด้วยรายได้จากงานที่รองรับซึ่งคุ้มค่ากับการลงทุนมากกว่าองค์กรขนาดกลางที่อยู่ในสภาวะที่ต้องผลัดกันตัวเองเพื่อพัฒนาสู่ความเป็นองค์กรขนาดใหญ่ต่อไป BIM นั้นถูกพัฒนาขึ้นเพื่อบริหารจัดการข้อมูลอาคารอันเกี่ยวข้องกับขั้นตอนงานออกแบบโดยกลุ่มบริษัทผู้ออกแบบขั้นตอนการก่อสร้างโดยกลุ่มบริษัทผู้รับเหมา และขั้นตอนการบริหารจัดการและบำรุงรักษาอาคารโดยเจ้าของอาคาร แต่แนวโน้มส่วนใหญ่มุ่งเน้นผู้ใช้งานไปที่กลุ่มบริษัทผู้ออกแบบก่อสร้าง และกลุ่มบริษัทรับเหมาก่อสร้างขนาดใหญ่ ซึ่งค่อนข้างจะมีความพร้อมสูงในการปรับเปลี่ยนเพื่อประยุกต์ใช้ BIM นำมาสู่การศึกษาเพื่อสำรวจสถานะและแนวโน้มการประยุกต์ใช้ BIM ทั้งยังจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยสนับสนุนและอุปสรรคชัดเจน พร้อมเสนอแนวทางสนับสนุนให้เกิดการประยุกต์ใช้ BIM ในบริษัทรับเหมาก่อสร้างขนาดกลาง ซึ่งอยู่ในช่วงเวลาแห่งการเปลี่ยนแปลงของอุตสาหกรรมก่อสร้างที่เทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทในทุกบริบท และมีข้อจำกัดด้านความพร้อมในหลายๆ ด้าน [5]

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยภายใต้หัวข้ออุปสรรคและการส่งเสริมการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารสำหรับผู้รับเหมาก่อสร้างขนาดกลางในจังหวัดกรุงเทพมหานคร มีดังนี้ (1) เพื่อสำรวจแนวโน้ม ณ ปัจจุบันและในอนาคตอันใกล้ของการประยุกต์ใช้ BIM ร่วมกับการทำงานเดิมขององค์กร (2) เพื่อระบุและจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยสนับสนุนและอุปสรรคของการประยุกต์ใช้ BIM ในองค์กร (3) เพื่อเสนอแนวทางส่งเสริมการประยุกต์ใช้ BIM สำหรับองค์กร

3. แนวคิดทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 หลักการและกระบวนการทำงาน

หลักการและกระบวนการทำงานภายใต้ระบบ BIM [1] นั้นต้องทำงานผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อรองรับกระบวนการ โดยลักษณะของโปรแกรมจะมีลักษณะเน้นไปที่การทำงานในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติขึ้นมาเป็นหลัก และมีกลไกในการควบคุมขนาดและสัดส่วนต่างๆ ของวัตถุด้วยระบบพารามิเตอร์ (Parametric Object-Based) ซึ่งการควบคุมการ

ทำงานนั้นจะเป็นการทำงานผ่านมุมมองต่างๆ ทั้งมุมมองที่เป็น 2 มิติ และ 3 มิติ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรายละเอียดของวัตถุใดๆ ในมุมมอง จะส่งผลไปถึงมุมมองอื่นทั้งหมด โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อสนับสนุนกระบวนการ BIM นั้น มีลักษณะของการแสดงผลของแบบจำลองในหลากหลายมุมมอง ในมุมมอง 2 มิติ ได้แก่ ผังพื้น (Floor Plan) รูปด้าน (Elevation) รูปตัด (Section Detail) และในมุมมอง 3 มิติ ได้แก่ รูปทัศนียภาพ (Perspective) รูป Isometric เป็นต้น หรือยังสามารถแสดงข้อมูลของแบบออกมาในรูปแบบของตารางได้ เช่น ตารางแสดงปริมาณวัสดุพื้น หรือวัสดุผนัง หรือเหล็กเส้น (Rebar) หรือแสดงพื้นที่ใช้สอยในแต่ละห้อง เป็นต้น ดังนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไขในสัดส่วนของแบบจำลองที่สร้างขึ้น การแก้ไขก็จะส่งผลออกไปยังทุกๆ มุมมอง เพื่อให้เกิดการปรับเปลี่ยนตามกันทั้งหมด และรวมถึงความสัมพันธ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งในส่วนของการกราฟิก (Graphics) เช่น ขนาด ระยะ สี วัสดุ เป็นต้น และข้อมูลที่ไม่ใช่กราฟิกส์ (Non-Graphics) เช่น ข้อมูลผู้ผลิต รุ่น ราคา เป็นต้น

3.2 การประยุกต์ใช้กระบวนการทำงานด้วย BIM ในงานก่อสร้าง (How to Adopt BIM)

การประยุกต์ใช้การทำงานด้วย BIM แบ่งเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้ [6]

- 1) เริ่มต้นจากการเรียนรู้และฝึกฝนการใช้โปรแกรมในการสร้างแบบจำลอง BIM ขึ้นมา
- 2) พัฒนาแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นให้มีข้อมูลส่งออกสนับสนุนด้วยเอกสาร (Output Document) เช่น แบบขออนุญาต แบบก่อสร้าง เป็นต้น
- 3) ตรวจสอบข้อมูลต่างๆ ที่บันทึกไว้ในแบบจำลองว่าถูกต้องหรือไม่ เพื่อให้ได้ข้อมูลส่งออก (Output) ในรูปแบบที่ไม่ใช่กราฟิกส์ (Non-Graphics) นั้นถูกต้อง เช่น ตามตารางแสดงปริมาณวัสดุ หรือตามตารางแสดงปริมาณพื้นที่ใช้สอย เป็นต้น
- 4) นำแบบจำลองที่ได้นั้นมาใช้สำหรับวิเคราะห์ในด้านต่างๆ เช่น การวิเคราะห์พื้นที่ การวิเคราะห์พลังงาน การวิเคราะห์โครงสร้าง การวิเคราะห์ระบบปรับอากาศ เป็นต้น
- 5) นำแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาใช้ในการวางแผนและการบริหารจัดการในลักษณะ 4D, 5D และ 6D

3.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พีรพัฒน์ วณิชลักษณ์ [7] เป็นงานวิจัยเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์เชิงบรรยายเกี่ยวกับระดับสถานการณ์ประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารและรูปแบบการประยุกต์ใช้ในองค์กรก่อสร้าง รวมทั้งวิเคราะห์เปรียบเทียบประโยชน์ประโยชน์ที่ได้รับและปัญหาอุปสรรคที่พบจากการประยุกต์ใช้แนวคิดดังกล่าว จากการศึกษาพบระดับสถานการณ์ประยุกต์ใช้แนวคิดแบบจำลองข้อมูลอาคารอยู่ในระดับเริ่มต้น และมีหลายประเด็นสำคัญที่เป็นปัญหาอุปสรรคและข้อจำกัดหลาย

ด้าน นอกจากนี้ผลการศึกษายังพบประโยชน์ที่รับจากการประยุกต์ใช้แนวคิดแบบจำลองสารสนเทศอาคารหลายด้าน สามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีการปฏิบัติงาน 3 วิธี วิธีการปฏิบัติงานทั่วไปโดยใช้แบบก่อสร้าง 2 มิติ วิธีการปฏิบัติงานที่มีการประยุกต์ใช้ไม่สมบูรณ์โดยใช้แบบก่อสร้าง 2 มิติ ร่วมกับแบบจำลองข้อมูลอาคาร และวิธีการปฏิบัติงานโดยการประยุกต์ใช้แนวคิดแบบจำลองสารสนเทศอาคารอย่างสมบูรณ์ เพื่อศึกษาความซับซ้อนของขั้นตอนการทำงาน ต้นทุนของการทำงาน ระยะเวลาของการทำงานและคุณภาพของข้อมูลจากการคำนวณปริมาณ นอกจากนี้ยังเสนอแนวทางพัฒนาระบบต้นแบบสนับสนุนการประมาณราคาสำหรับวิธีการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร เพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูลปริมาณวัสดุ จากการศึกษาพบว่าวิธีการปฏิบัติงานโดยการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารอย่างสมบูรณ์ใช้ระยะเวลาน้อยกว่าวิธีการปฏิบัติงานแบบทั่วไป ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาแนวทางประยุกต์ใช้อย่างเป็นทางการและถูกต้อง เนื่องจากในอนาคตอันใกล้เชื่อว่าแบบจำลองข้อมูลของอาคารจะมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

ธณัชชา สุขขี [8] ศึกษาเกี่ยวกับการใช้งานและปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร ขององค์กรออกแบบและรับเหมาก่อสร้างในประเทศไทย เพื่อสำรวจการใช้งานแบบจำลองสารสนเทศอาคารและปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้ การศึกษาเก็บข้อมูลจากกลุ่มองค์กรตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์เชิงสถิติเกี่ยวกับสถานการณ์ประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารในประเทศไทย และเก็บข้อมูลจากกรณีศึกษาเพื่อวิเคราะห์เชิงบรรยายเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้พบว่า การใช้งาน BIM ในประเทศไทยยังมีไม่มากประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์ ของประชากรที่สำรวจและปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้มากคือ การเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบ เช่นประมาณราคา วิเคราะห์อาคาร และลดการสูญเสียทรัพยากร ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้ในระดับปานกลางคือ As-Build Drawing มีความถูกต้อง เชื่อถือได้ และลดปัญหาจากการเริ่มต้นทำงานใหม่เมื่อเกิดการแก้ไข เปลี่ยนแปลง และปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้ขั้นน้อยที่สุด ตอบสนองความต้องการของลูกค้า พัฒนารูปแบบการทำงานให้เป็นระบบสากล ใช้บุคลากรน้อยกว่าการทำงานด้วย AutoCAD สามารถนำข้อมูลมาบริหารจัดการอาคาร ความสามารถในการนำเสนอผลงานในรูปแบบสามมิติ ผู้บริหารเล็งเห็นความสำคัญของ BIM มาก่อนการใช้ AutoCAD ต้องอาศัยทักษะในการถ่ายทอดข้อมูลและสื่อสาร และกระแสของ LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)

ปัญญาพล จันทรัดอน [4] จากการทดลองนำ TeklaBIMsight มาใช้ในการจัดทำแบบก่อสร้างจริง (AS-Built Drawing) ในส่วนงานระบบอาคารเฉพาะงานระบบสุขาภิบาลของโครงการเวฟพิทยา พบว่า TeklaBIMsight มีความเหมาะสมอยู่ในระดับปานกลางเนื่องจาก Tekla Structure ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์โมเดลที่เป็นฐานข้อมูลของ TeklaBIMsight ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับงานโครงสร้างอาคารโดยเฉพาะโครงสร้างเหล็ก เพราะในตัวซอฟต์แวร์มีข้อมูลสำเร็จรูปของเหล็กอย่างครบถ้วนซึ่งในส่วนงานระบบสุขาภิบาล ตัวซอฟต์แวร์ไม่มีข้อมูลสำเร็จรูปรองรับผู้ใช้งาน โดยผู้ใช้งานต้อง

สร้างข้อมูลโดยกำหนดค่าต่างๆ ขึ้นมาเองในส่วนงานระบบสุขาภิบาลทำให้เกิดความไม่สะดวกในการใช้งานในส่วนนี้ แต่ข้อดีคือ TeklaBIMsight ใช้งานง่ายไม่สลับซับซ้อน เหมาะกับการ Review เพื่อตรวจสอบส่วนต่างๆ ของงานสุขาภิบาล และ TeklaBIMsight จะแสดงผลในรูปแบบ 3 มิติเพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ต่างๆ อีกทั้งยังสามารถ Note บันทึกตำแหน่งภาพหรือจุดต่างๆ ที่ต้องการลงใน Models แล้วส่งข้อมูลที่ Note ไปยังผู้ร่วมงานส่วนอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องได้ ซึ่งเกิดความสะดวกและเข้าใจได้ง่ายต่อผู้ใช้งาน และยังสามารถใช้งานบนแท็บเล็ตภายใต้ Application ที่ชื่อว่า TeklaBIMsight Note ซึ่งช่วยให้เกิดความสะดวกและเหมาะกับการนำไปเป็นฐานข้อมูลบริหารอาคารต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ TeklaBIMsight กับ Naviswork Freedom โดยใช้เกณฑ์การ Review เพื่อตรวจสอบส่วนต่างๆ ของงานสุขาภิบาลของแบบก่อสร้างจริง (AS-Built Drawing) โครงการเวฟ พัทยา พบว่า TeklaBIMsight มีความเหมาะสมกว่า Naviswork Freedom

4. ระเบียบวิธีวิจัย

4.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้วิจัยครั้งนี้ คือ บริษัทผู้ประกอบการรับเหมาก่อสร้างขนาดกลาง โดยผู้วิจัยทำการสุ่มสัมภาษณ์และแจกแบบสอบถามเชิงลึกแก่กลุ่มบุคคลากรในตำแหน่งผู้จัดการที่มีวุฒิการศึกษาด้านวิศวกรรมศาสตร์หรือสถาปัตยกรรมศาสตร์ ตำแหน่งวิศวกรที่มีวุฒิการศึกษาด้านวิศวกรรมศาสตร์ในสาขาวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมเครื่องกลและตำแหน่งพนักงานเขียนแบบที่มีวุฒิการศึกษาหรือมีประสบการณ์และเชี่ยวชาญในงานเขียนแบบงานโครงสร้าง งานสถาปัตยกรรม งานระบบไฟฟ้าและสื่อสาร งานระบบประปาสุขาภิบาลและดับเพลิง งานระบบปรับอากาศและระบายอากาศ จำนวน 70 ตัวอย่าง

4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) เครื่องมือที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างของการวิจัย มี 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 ใช้การสุ่มสัมภาษณ์แบบที่มีคำถามแน่นอน (Structured Interview) รูปแบบที่ 2 ใช้แบบสอบถาม (Questionnaire) โดยแบ่งแบบสอบถามออกเป็น 3 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ใช้รูปแบบคำถามปลายปิด (Closed Ended) เนื้อหาของคำถามมุ่งเน้นข้อมูลพื้นฐานส่วนบุคคลของผู้ตอบแบบสอบถามและระดับมาตรวัดตัวแปรทางสถิติ

ตอนที่ 2 เป็นคำถามที่มีเนื้อหามุ่งเน้นประเด็นทางความรู้สึก ความคิดเห็น วิสัยทัศน์ ทศนคติ ด้านบวกและด้านลบที่มีต่อการประยุกต์ใช้ BIM โดยการตอบคำถามด้วยการให้คะแนน โดยระดับคะแนนอยู่ที่ 1-5 คะแนน ใช้มาตราวัดทางสถิติแบบมาตราวัดประมาณค่า (Rating Scale)

ตอนที่ 3 เป็นคำถามที่มีเนื้อหามุ่งเน้นประเด็นทางความคิดเห็นเพื่อหาข้อเสนอแนะแนวทางที่สนับสนุน และแนวโน้มการตัดสินใจประยุกต์ใช้ BIM

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลจากแบบสอบถามมาวิเคราะห์ทางสถิติหา ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย (\bar{X}) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) เพื่อนำมาแปลผลและจัดอันดับอุปสรรค และแนวทางผลักดันส่งเสริมให้เกิดการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร หรือ BIM แต่ละด้านอยู่ในระดับใด และหาค่าฐานนิยมเพื่อแปลผลสรุปเป็นแนวทางผลักดันส่งเสริมการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร หรือ BIM

5. ผลการศึกษา

การประเมินระดับคะแนนใช้เกณฑ์การแปลผลของลิเคิร์ต (Likert Scale) ซึ่งใช้เกณฑ์ 5 อันดับ แทน 5 ความหมาย ดังนี้

ค่าเฉลี่ย 1.00 – 1.80 หมายถึง ส่งผลน้อยที่สุด

ค่าเฉลี่ย 1.81 – 2.60 หมายถึง ส่งผลน้อย

ค่าเฉลี่ย 2.61 – 3.40 หมายถึง ส่งผลปานกลาง

ค่าเฉลี่ย 3.41 – 4.20 หมายถึง ส่งผลมาก

ค่าเฉลี่ย 4.21 – 5.00 หมายถึง ส่งผลมากที่สุด

ผลการศึกษาอุปสรรคและการส่งเสริมของการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร สำหรับผู้รับเหมาก่อสร้างขนาดกลางในจังหวัดกรุงเทพมหานคร ผ่านการใช้แบบสอบถามกับกลุ่มตัวอย่างทั้งสิ้น 130 ตัวอย่าง และได้รับกลับมาโดยสมบูรณ์ทั้งหมด 70 ตัวอย่าง ซึ่งจำแนกผู้ตอบแบบสอบถามเป็น เพศชาย 46 คน (65.71%) เพศหญิง 24 คน (34.29%) ส่วนใหญ่มีอายุอยู่ในช่วง 26-30 ปี 21 คน (30%) รองลงมา คือ ช่วง 40-45 ปี 15 คน (21.42%) และช่วงอายุ 31-35 ปี จำนวน 12 คน (17.14%) ต่อมาช่วง 36-40 ปี 11 คน (15.17%) และในลำดับ 5 มากกว่า 45 ปี 6 คน (8.57%) และน้อยที่สุดช่วง 20-25 ปี 5 คน (7.14%) และส่วนใหญ่เป็นบุคลากรในตำแหน่งเจ้าหน้าที่เขียนแบบมากที่สุด 23 คน (32.86%) รองลงมาคือวิศวกรหน้า 13 (18.57%) และวิศวกรสำนักงาน 10 คน (14.29%) ต่อมาตำแหน่งประมาณราคา 8 คน (11.43%) รองลงมาวิศวกรโครงการ 6 คน (8.57%) และผู้จัดการโครงการ 5 คน (7.14%) และโฟร์แมนผู้ควบคุมงาน 3 คน

(4.29%) และน้อยที่สุดวิศวกรสำรวจ 2 คน (2.86%) พบว่าส่วนใหญ่จบการศึกษาในสาขาวิศวกรรมโยธา/ก่อสร้างมากที่สุด 47 (67.14%) รองลงมาสาขาสถาปัตยกรรม 14 คน (20%) รองลงมาสาขาวิศวกรรมเครื่องกลเท่ากับสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คือ 3 คน (4.29%) และสาขาบริหารธุรกิจ 2 คน (2.86%) และสุดท้ายสาขาวิศวกรรมสำรวจ 1 คน (1.43%) ส่วนใหญ่มีประสบการณ์ในการทำงานมากที่สุดในช่วง 5 – 10 ปี 25 คน (35.71%) รองลงมาน้อยกว่า 5 ปี 20 คน (28.57%) และ 10 – 15 ปี 19 คน (27.14%) ต่อมาช่วง 15 – 20 ปี 5 คน (7.14%) และประสบการณ์ 20 – 25 ปี จำนวน 1 คน (1.43%) ตามลำดับ

5.1 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของอุปสรรคในการประยุกต์ใช้ BIM ในองค์กร

อุปสรรคในการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร หรือ BIM กับงานก่อสร้างในส่วนของผู้รับเหมาในด้านต่างๆ สามารถจำแนกเป็น 5 ประเด็นหลักเรียงตามลำดับของค่าเฉลี่ยจากมากไปน้อยแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ย (Average, \bar{X}), ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, S.D) และระดับอุปสรรคต่อการประยุกต์ใช้ BIM สำหรับผู้รับเหมาก่อสร้างในภาพรวม

รหัส	อุปสรรคต่อการประยุกต์ใช้ BIM สำหรับผู้รับเหมาก่อสร้าง	\bar{X}	S.D	แปลผล	อันดับ
KNO	อุปสรรคเรื่ององค์ความรู้ (Knowledge)	4.42	0.60	มากที่สุด	1
ORO	อุปสรรคเรื่องรูปแบบการทำงานขององค์กร (Organization)	4.19	0.79	มาก	2
HWO	อุปสรรคเรื่องเทคโนโลยีด้านฮาร์ดแวร์ (Hardware)	3.88	0.83	มาก	3
PAO	อุปสรรคเรื่องทัศนคติส่วนบุคคล (Personal Attitude)	3.24	0.89	ปานกลาง	4
SWO	อุปสรรคเรื่องเทคโนโลยีด้านซอฟต์แวร์ (Software)	3.23	1.03	ปานกลาง	5
	ภาพรวม	3.79	0.83	มาก	

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าระดับความสำคัญของอุปสรรคในการประยุกต์ใช้แบบจำลองข้อมูลอาคารในส่วนงานของผู้รับเหมาก่อสร้างในภาพรวมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.79 แปลผลอยู่ในระดับมาก

อาจกล่าวได้ว่าการที่องค์กรจะปรับเปลี่ยนและริเริ่มประยุกต์ใช้ BIM ได้นั้นเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เนื่องจากการที่จะประยุกต์ใช้ BIM ให้ประสบความสำเร็จได้นั้น ต้องอาศัยความรู้ความสามารถ หลากหลายด้านประกอบกัน เช่น ความรู้ความสามารถทางวิศวกรรมก่อสร้าง ความรู้ความสามารถ ในด้านการบริหารต้นทุนก่อสร้างและเรื่องของเวลา ความรู้ความสามารถทางด้านงานประมาณ ราคา ความรู้ความเข้าใจในเรื่องของระบบคอมพิวเตอร์สารสนเทศ (Information Technology, IT) และสำคัญอย่างยิ่ง คือ ความรู้ความชำนาญด้านงานเขียนแบบด้วยโปรแกรมสำเร็จที่สนับสนุน BIM เพื่อเพิ่มศักยภาพของงานก่อสร้างได้สูงสุดในทุก ๆ ด้าน และจากอุปสรรคในการประยุกต์ใช้ BIM ทั้ง 5 ประเด็นหลัก พบว่าอุปสรรคเรื่ององค์ความรู้ (Knowledge Obstacle, KNO) มีระดับความสำคัญ มากที่สุดเป็นอันดับที่ 1 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 4.42 และอุปสรรคที่มีระดับความสำคัญเป็น อันดับที่ 2 คือ อุปสรรคเรื่องรูปแบบการทำงานขององค์กร (Organization Pattern Obstacle, OPO) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.19 และอุปสรรคเรื่องเทคโนโลยีด้านฮาร์ดแวร์ (Hardware Obstacle, HWO) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.88 มีระดับความสำคัญเป็นอันดับที่ 3 และระดับความสำคัญรองลงมา ในอันดับที่ 4 คือ อุปสรรคเรื่องทัศนคติส่วนบุคคล (Personal Attitude Obstacle, PAO) มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 3.24 และแปลผลอยู่ในระดับปานกลาง และสุดท้ายในอันดับที่ 5 มีระดับความสำคัญน้อย ที่สุด คือ อุปสรรคเรื่องเทคโนโลยีด้านซอฟต์แวร์ (Software Obstacle, SWO) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.22 และแปลผลอยู่ในระดับปานกลาง ทั้งนี้ผลงานวิจัยสามารถระบุอุปสรรคย่อยเชิงลึกในแต่ละ ด้าน และได้ทำการวิเคราะห์ระดับความสำคัญของอุปสรรคในประเด็นย่อยได้ทั้งหมด 17 ประเด็น และลำดับความสำคัญของแต่ละประเด็นปัญหาจากค่าเฉลี่ย (Average, \bar{X}) แสดงผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ย (Average, \bar{X}), ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, S.D), และระดับความสำคัญของอุปสรรคย่อย 17 ประเด็น เรียงลำดับจาก ค่าเฉลี่ยมากไปหาน้อย

อันดับ	รหัส	อุปสรรคย่อยต่อการประยุกต์ใช้ BIM สำหรับผู้รับเหมาก่อสร้าง	\bar{X}	S.D	แปลผล
(1)	HWO1	ปัญหาเรื่ององค์ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่สามารถรองรับและประมวลผลซอฟต์แวร์ ให้เพียงพอต่อการทำงานร่วมกันของบุคลากร	4.67	0.65	มากที่สุด
(2)	ORO1	ปัญหาเรื่ององค์กรไม่ได้กำหนดบทบาทหน้าที่ความรับผิดชอบให้กับบุคลากรที่เกี่ยวข้องอย่างชัดเจน	4.63	0.54	มากที่สุด

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ย (Average, \bar{X}), ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, S.D), และระดับความสำคัญของอุปสรรคย่อย 17 ประเด็น เรียงลำดับจากค่าเฉลี่ยมากไปหาน้อย (ต่อ)

อันดับ	รหัส	อุปสรรคย่อยต่อการประยุกต์ใช้ BIM สำหรับผู้รับเหมาก่อสร้าง	\bar{X}	S.D	แปลผล
(3)	KNO1	ปัญหาการที่องค์กรขาดบุคลากรที่มีความรู้ความเข้าใจเรื่องหลักการทำงานของ BIM และการใช้ Software อย่างแท้จริง	4.49	0.56	มากที่สุด
(4)	ORO4	ปัญหาเรื่ององค์กรไม่มีการจัดสรรงบประมาณเพื่อสนับสนุนผลักัดันการทำงาน	4.43	0.71	มากที่สุด
(5)	KNO2	ปัญหาเรื่องผู้จำหน่ายซอฟต์แวร์ไม่สามารถแก้ปัญหาให้ผู้ใช้งานได้	4.36	0.64	มากที่สุด
(6)	SWO1	ปัญหาการที่องค์กรต้องซื้อซอฟต์แวร์ลิขสิทธิ์ซึ่งมีราคาสูง และต้องจ่ายค่าพัฒนาซอฟต์แวร์ตลอดอายุการใช้งาน	4.26	0.99	มากที่สุด
(7)	ORO2	ปัญหาเรื่ององค์กรไม่ตั้งวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนและสื่อสารให้บุคลากรเข้าใจและตระหนักถึงความสำคัญในการใช้ BIM อย่างจริงจัง	4.16	0.93	มาก
(8)	SWO2	ปัญหาการที่องค์กรต้องซื้อซอฟต์แวร์ลิขสิทธิ์หลายตัว เพื่อให้การทำงานเกิดประสิทธิภาพสูงสุดและครอบคลุมทุกส่วนงาน	4.14	1.00	มาก
(9)	ORO3	ปัญหาเรื่ององค์กรไม่วางนโยบายและกำหนดแนวทางการทำงานให้กับบุคลากรเพื่อการทำงานด้วยมาตรฐานเดียวกัน	4.06	0.74	มาก
(10)	ORO5	ปัญหาเรื่ององค์กรไม่มีผลตอบแทนรองรับบุคลากรที่พัฒนาตัวเอง	3.69	1.03	มาก
(11)	PAO1	ปัญหาเรื่องทัศนคติและความเคยชินของผู้ใช้งานที่ไม่สามารถยอมรับความเปลี่ยนแปลง	3.67	0.83	มาก
(12)	PAO2	ปัญหาเรื่องทัศนคติของผู้บริหารองค์กร ที่ไม่ตระหนักถึงความสำคัญและประโยชน์ของ BIM	3.66	0.78	มาก

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ย (Average, \bar{X}), ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, S.D), และระดับความสำคัญของอุปสรรคย่อย 17 ประเด็น เรียงลำดับจากค่าเฉลี่ยมากไปหาน้อย (ต่อ)

อันดับ	รหัส	อุปสรรคย่อยต่อการประยุกต์ใช้ BIM สำหรับผู้รับเหมาก่อสร้าง	\bar{X}	S.D	แปลผล
(13)	HWO2	ปัญหาเรื่ององค์กรต้องเสียค่าใช้จ่ายซื้อเครื่อง Sever เพื่อใช้เก็บข้อมูลทั้งหมด และการระบบเครือข่ายภายในองค์กร เพื่อแบ่งปันข้อมูลระหว่าง Server และคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล	3.09	1.00	ปานกลาง
(14)	SWO4	ปัญหาการแปลงข้อมูลเพื่อทำงานร่วมกันระหว่างซอฟต์แวร์ต่างเวอร์ชันซอฟต์แวร์ต่างค่ายกันอาจทำได้ไม่สมบูรณ์ไม่สามารถทำงานต่อเนื่องกัน	3.00	1.02	ปานกลาง
(15)	SWO3	ปัญหาเรื่องมาตรฐานข้อมูลของซอฟต์แวร์ที่ผลิตในต่างประเทศไม่สอดคล้องกับการใช้งานในประเทศไทย	2.46	1.05	น้อย
(16)	PAO3	ปัญหาเรื่องทักษะทางวิชาชีพพื้นฐานของบุคคลากรแต่ละคน	2.39	1.05	น้อย
(17)	SWO5	ปัญหาไฟล์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดใหญ่	2.27	1.08	น้อย

5.2 ผลการวิเคราะห์แนวทางส่งเสริมของการประยุกต์ใช้ BIM ในองค์กร

สามารถจัดกลุ่มผู้ตอบแบบสอบถามออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มตัวอย่างระดับผู้ปฏิบัติงานจำนวน 65 คน คิดเป็นร้อยละ 92.85 และกลุ่มผู้บริหาร จำนวน 5 คน คิดเป็นร้อยละ 7.15 สามารถสรุปผลการวิเคราะห์แนวทางส่งเสริมการประยุกต์ใช้ BIM กับงานก่อสร้างในส่วนของผู้รับเหมา ได้เป็น 2 แนวทาง ดังนี้

1) แนวทางผลักดันส่งเสริมที่ส่งผลต่อตัวบุคคลากรระดับผู้ใช้งานสามารถระบุข้อเสนอแนะแนวทางสนับสนุนและส่งเสริมการใช้ BIM ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าฐานนิยม (Mode, Mo) ของแนวทางผลักดันส่งเสริมที่ส่งผลต่อตัวบุคคลากรระดับผู้ใช้งาน

(1)	แนวทางส่งเสริมที่ส่งผลต่อตัวบุคคลากรระดับผู้ใช้งาน	ระดับคะแนน					n (คน)	Mo
		5	4	3	2	1		
(1.1)	องค์กรสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการฝึกอบรมให้ความรู้แก่บุคคลากร	49	18	3	-	-	70	5
(1.2)	องค์กรมีนโยบายเลื่อนตำแหน่ง ปรับเพิ่มค่าตอบแทนสร้างความก้าวหน้าให้บุคคลากรที่สามารถใช้งานซอฟต์แวร์ได้	36	23	11	-	-	70	5
(1.3)	องค์กรมีการวางแผนและจัดระบบการทำงานที่ดี สื่อสารเป้าหมายให้บุคคลากรผู้เกี่ยวข้องได้เข้าใจและยอมรับการเปลี่ยนแปลง	39	31	-	-	-	70	5

จากตารางที่ 3 พบว่า กลุ่มตัวอย่างบุคคลากรมีความต้องการในการเพิ่มความรู้ความสามารถในการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่สนับสนุนแนวคิด BIM มากที่สุด ด้วยการให้คะแนนระดับความสำคัญมากที่สุด 5 คะแนน มีจำนวนมากถึง 49 คน คิดเป็นร้อยละ 75.38 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความสำคัญของอุปสรรคในการใช้ BIM ในเรื่องของคนที่องค์กรขาดบุคคลากรที่มีความรู้ความเข้าใจเรื่องหลักการทำงานของ BIM และการใช้ Software อย่างแท้จริง เป็นปัญหาที่มีความสำคัญมากเป็นอันดับที่ 3 จากภาพรวมทั้งหมด 17 ประเด็น ฉะนั้นแนวทางสนับสนุนและส่งเสริมการประยุกต์ใช้ BIM คือการสนับสนุนเรื่องขององค์ความรู้อย่างจริงจัง โดยคาดหวังว่าองค์กรเป็นผู้สนับสนุนค่าใช้จ่ายในการส่งบุคคลากรไปเรียนเพิ่มเติมหรือเข้ารับการอบรม

2) แนวทางผลักดันส่งเสริมที่ส่งผลต่อองค์กร สามารถระบุข้อเสนอแนะแนวทางสนับสนุนและส่งเสริมการใช้แบบจำลองข้อมูลอาคารหรือ BIM ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าฐานนิยม (Mode, Mo) ของแนวทางส่งเสริมที่ส่งผลกระทบต่อองค์กร

(2)	แนวทางส่งเสริมที่ส่งผลกระทบต่อองค์กร	ระดับคะแนน					n (คน)	Mo
		5	4	3	2	1		
(2.1)	สนับสนุนให้ผู้บริหารตระหนักถึงประโยชน์และความสำคัญของการใช้ BIM	40	30	-	-	-	70	5
(2.2)	สนับสนุนให้ผู้บริหารมองเห็นถึงศักยภาพของทีมงานที่จะพัฒนาได้	15	31	13	10	1	70	4
(2.3)	สนับสนุนให้ผู้บริหารมองเห็นถึงความคุ้มค่าต่อการลงทุน	61	9	-	-	-	70	5
(2.4)	สนับสนุนให้เจ้าของงานใช้ BIM เป็นเงื่อนไขในการคัดเลือกผู้รับเหมา	70	-	-	-	-	70	5

จากตารางที่ 4 พบว่ากลุ่มตัวอย่างทั้งหมดมีความเห็นตรงกัน 100% คือการสนับสนุนให้ทางเจ้าของงาน (Owner) ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเป็นหนึ่งใน TOR เพื่อคัดเลือกผู้รับเหมาเป็นแนวทางสนับสนุนที่มีระดับสำคัญมากที่สุด ซึ่งแนวทางนี้เป็นการสนับสนุนให้เจ้าของงานเป็นผู้เริ่มต้นประยุกต์ใช้แบบจำลองอาคารหรือ BIM ก่อนในอันดับแรก เพื่อที่จะให้ผู้รับผิดชอบงานในส่วนอื่นๆ นั้นถูกกระตุ้นให้ประยุกต์เช่นเดียวกันเพื่อความต่อเนื่องของข้อมูล ซึ่งสอดคล้องกับแนวความคิด ของกระบวนการของแบบจำลองข้อมูลอาคารอย่างแท้จริง (BIM Concept) ตลอดวงจรชีวิตของอาคาร (Building life Cycle) คือ เริ่มต้นกระบวนการที่เจ้าของอาคาร ส่งต่อสู่ขั้นตอนการออกแบบ และต่อด้วยขั้นตอนการก่อสร้าง และกลับมาสู่เจ้าของอาคารในขั้นตอนการเปิดใช้อาคารและการบำรุงรักษาตลอดจนรีอื้อถอนอาคาร

6 สรุปผลการศึกษา

จากการใช้แบบสอบถาม (Questionnaire) กับกลุ่มตัวอย่าง โดยการสุ่มเลือกบุคลากรในบริษัทผู้รับเหมาก่อสร้างในตำแหน่งผู้จัดการ ตำแหน่งวิศวกร ตำแหน่งโพรแมนผู้ควบคุมงาน และตำแหน่งเจ้าหน้าที่เขียนแบบ โดยได้รับการตอบแบบสอบถามกลับมาโดยสมบูรณ์ทั้งหมด 70 ชุด สามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1 สรุปผลการวิเคราะห์ความสำคัญของอุปสรรคในการประยุกต์ใช้ BIM ในองค์กร

ผลการวิเคราะห์พบว่าประเด็นอุปสรรคเรื่ององค์ความรู้ (KNO) มีค่าเฉลี่ยในภาพรวมสูงที่สุดเท่ากับ 4.42 และประเด็นย่อยเรื่องปัญหาการที่องค์กรขาดบุคลากรที่มีความรู้ความเข้าใจเรื่อง

หลักการดำเนินงานของ BIM และการใช้ Software อย่างแท้จริงจัง (KNO1) มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 4.49 เป็นประเด็นปัญหาหลักอันนำมาสู่การปฏิเสธการประยุกต์ใช้ BIM มากที่สุด และพบว่ามีผู้ให้คะแนนในระดับปัญหาเรื่องของเทคโนโลยีด้านฮาร์ดแวร์ (HWO) ในประเด็นย่อยเรื่องที่ต้องการต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่สามารถรองรับและประมวลผลซอฟต์แวร์ให้เพียงพอต่อการทำงานร่วมกันของบุคลากร (HWO1) มากที่สุดในระดับ 5 คะแนน จำนวนมากถึง 51 คน (73.86%) ซึ่งแปลผลได้ว่าปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายเป็นประเด็นปัญหาย่อยที่เป็นอุปสรรคสำคัญต่อการประยุกต์ใช้ BIM เช่นกัน

6.2 สรุปผลแนวทางส่งเสริมของการประยุกต์ใช้ BIM ในองค์กร

ผลการวิเคราะห์พบว่าแนวทางที่ 2 คือการผลักดันให้องค์กรเป็นผู้ริเริ่มประยุกต์ใช้ BIM โดยการสนับสนุนให้ทางเจ้าของงาน (Owner) ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเป็นหนึ่งใน TOR เพื่อคัดเลือกผู้รับเหมาเป็นแนวทางสนับสนุนที่มีระดับสำคัญมากที่สุด จากการที่กลุ่มตัวอย่างเห็นตรงกันด้วยการให้ 5 คะแนน ทั้ง 70 ตัวอย่าง นอกจากนี้เพื่อลดอุปสรรคในเรื่องของการที่องค์กรขาดบุคลากรที่มีความรู้ความเข้าใจเรื่องหลักการดำเนินงานของ BIM และการใช้ Software อย่างแท้จริงนั้น ในแนวทางที่ 1 ตัวบุคลากรระดับผู้ใช้งานเองก็มีความคาดหวังให้องค์กรเป็นผู้สนับสนุนในการฝึกอบรมพัฒนาความรู้ความสามารถด้วยการให้คะแนนระดับความสำคัญมากที่สุด 5 คะแนน มีจำนวนมากถึง 49 คน คิดเป็นร้อยละ 75.38

7 ข้อเสนอแนะ

1) ข้อเสนอแนะในเรื่องขององค์ความรู้ สำหรับระดับผู้ใช้งาน (User) ต้องเปิดใจเรียนรู้เรื่องเทคโนโลยีสมัยใหม่และยอมรับการเปลี่ยนแปลง และอาจจะต้องลงทุนด้วยเงินทุนส่วนตัว ผู้ใช้งาน (User) ไม่อาจคาดหวังให้การลงทุนเรื่องการเรียนรู้และฝึกอบรมเป็นภาระขององค์กรได้ และจากการสัมภาษณ์ความคิดเห็นของผู้บริหารในตำแหน่ง กรรมการผู้จัดการ และกรรมการบริหาร ของบริษัทเอกชน จำนวน 5 คน ที่ประกอบกิจการรับเหมาก่อสร้าง โรงงานผลิตชิ้นส่วนประกอบอาคาร (Precast) รับออกแบบก่อสร้าง และบริษัทพัฒนาอสังหาริมทรัพย์ผู้เป็นเจ้าของโครงการบ้านจัดสรร เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ BIM ซึ่งมีมุมมองความคิดเห็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ องค์กรไม่ได้มีความจำเป็นต้องส่งบุคลากรที่เกี่ยวข้องทุกคนในทุกส่วนงานไปเรียนเพิ่มเติม แต่อาจจะพิจารณาเป็นรายบุคคลไป โดยให้เหตุผลว่าการที่องค์กรรับผิดชอบจัดส่งบุคลากรไปเรียนเพิ่มเติม นั้น มีข้อเสียที่ส่งผลเสียต่อองค์กรอย่างมาก หากส่งไปเรียนแล้วบุคลากรโยกย้ายเปลี่ยนงานลาออกไปในภายหลัง หรือถ้ามีความจำเป็นที่จัดส่งไปเรียนจริงๆ อาจมีการทำสัญญาเพิ่มเติมเพื่อให้บุคลากรนั้นยังคงอยู่ในองค์กรในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งค่อนข้างที่จะยุ่งยากและผู้บริหารไม่ยอม

แบกรับความเสี่ยงเท่าไรหนัก และในอนาคตผู้ที่มีความชำนาญเรื่อง BIM คงมีจำนวนมากขึ้น เป็นการเพิ่มตัวเลือกให้กับองค์กรที่จะจัดหาคคลากรจากภายนอกเข้ามาเพื่อสนับสนุนให้องค์กรประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้ BIM ได้ เห็นได้ชัดเจนว่า ผู้บริหารนั้นมีตัวเลือกในการสนับสนุนการประยุกต์ใช้ BIM ที่หลากหลาย ฉะนั้นบุคลากรเดิมขององค์กรจำเป็นมากที่จะต้องเรียนรู้และพัฒนาตัวเองให้ทันต่อสถานการณ์

2) ข้อเสนอแนะในเรื่องของรูปแบบการทำงานขององค์กร ผู้บริหารอาจจะต้องกำหนดพันธกิจ (Mission) ขององค์กรอย่างจริงจัง อาจจะต้องปรับโครงสร้างองค์กร และจัดตั้งดูแลและผู้รับผิดชอบเรื่อง BIM โดยตรง เพื่อให้เกิดความชัดเจนในหน้าที่ และสร้างแรงจูงใจในการพัฒนาผู้เกี่ยวข้องทั้งหมดไปในทิศทางเดียวกันอย่างมีเป้าหมาย เป็นการเรียนรู้ไปพร้อมกันทั้งองค์กร เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองข้อมูลอาคารหรือ BIM ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และคุ้มค่าต่อการลงทุน

3) การวิจัยครั้งนี้เป็นการสำรวจอุปสรรค และแนวทางส่งเสริมการประยุกต์ใช้ BIM ในกลุ่มตัวอย่างที่เป็นผู้รับเหมาก่อสร้างขนาดกลางเท่านั้น และต้องการผลการศึกษาที่เน้นประเด็นปัญหาอุปสรรคในการประยุกต์ใช้ BIM ของกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งชี้ให้เห็นปัญหามากมาย เช่น ประเด็นปัญหาเรื่องเงินลงทุนก็มีระดับความสำคัญไม่น้อย และนอกเหนือจากที่ระบุในผลการวิจัย คือ ปัญหาในเรื่องของการเลือกใช้ BIM ให้เหมาะสมการลักษณะงานของผู้ใช้ เช่น ผู้ประกอบการผลิตชิ้นส่วนประกอบอาคาร เลือกใช้โปรแกรม Autodesk Revit for Structure อย่างเดียวเพียงพอหรือไม่ มีความจำเป็นต้องใช้โปรแกรม Autodesk Revit for Architecture ควบคู่หรือไม่ และโปรแกรม Autodesk Navisworks จำเป็นต้องใช้จริง ๆ หรือไม่ เป็นต้น ซึ่งแต่ละโปรแกรมมีมูลค่าค่อนข้างสูง และผู้ใช้อาจไม่จำเป็นต้องใช้คุณลักษณะเหล่านี้ทั้งหมด ซึ่งหากซื้อทั้งหมดอาจเป็นค่าใช้จ่ายที่มากเกินไปจนความจำเป็น ดังนั้นในการวิจัยครั้งต่อไปควรศึกษาเพิ่มเติมเปรียบเทียบในประเด็นเรื่องของค่าใช้จ่ายประกอบกับคุณลักษณะของ BIM เพื่อสนับสนุนการประยุกต์ใช้ BIM ให้เพิ่มมากขึ้นในประเทศไทย

References

- [1] The Association of Siamese Architects under the Royal Patronage (ASA). Thailand BIM Guideline. Bangkok: Plus press; 2015. (In Thai)
- [2] Saraschai Ongprasert. BIM should be adopted for construction. Prachachat business newspaper 2018: 20. (In Thai)
- [3] Saraschai Ongprasert, Rapee Parichutkanon. BIM with engineering revolution. Prachachat business newspaper online [Internet]. 2017 [Cited 06 Dec 2017]. Available from: https://www.prachachat.net/news_detail.php?newsid=1497698219. (In Thai)

- [4] Panyaphon Chundon. The study of BIM application for M&E as building drawing production : case study wave hotel pattaya [dissertation]. Bangkok: Sripatum University; 2013. (In Thai)
- [5] Amorn Pimanmas. Council of engineers recommend BIM to be revolutionary design high-rise Thailand 4.0 era. Thansettakij [Internet]. 2018 [Cited 30 Mar 2018]. Available from: <http://www.thansettakij.com/content/272608>. (In Thai)
- [6] Viwat Udompitisup. The developed concept for design and construction processing with building information modeling. Thansettakij [Internet]. 2017 [Cited 06 Dec 2017]. Available from: <http://www.thansettakij.com/content/113189>. (In Thai)
- [7] Peerapath Vanichluxmee. A stage and implementation of building information modeling in construction organizations [dissertation]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2010. (In Thai)
- [8] Thanatcha Sukkhi. A study of factors affecting building information modeling selection in construction industry in Thailand [Independent study]. Bangkok: Silpakorn University; 2011. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



กมลทิพย์ จงจิตร นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
สถานที่ทำงาน: บริษัท จอมธกล จำกัด เลขที่ 323 ถ.บอนด์สตรีท ต.บางพูด อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120 โทรศัพท์: 087-996-8311, Email: kamontip.j66@hotmail.com



ดร.อภิชาติ ประสิทธิ์สม อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 1761 ถนนพัฒนาการ แขวง/เขต สวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250 โทรศัพท์: 081-828-0225, Email: apichart.w@outlook.com

**การออกแบบและพัฒนาเครื่องสลัดน้ำมันหมูฝอยต้นแบบสำหรับ OTOP
กลุ่มสตรีอาสาพัฒนาบ้านหนองหลวงเพื่อการส่งออกสู่ประชาคมอาเซียน
DESIGN AND DEVELOPMENT OF THE OIL SHAKE OFF SHREDDED
PORK PROTOTYPE MACHINE OF BAN NONG LUANG VOLUNTEER
FOR RURAL DEVELOPMENT WOMEN GROUP'S OTOP FOR
EXPORTING TO AEC**

ไพศาล ทองสงค์¹, สมชาย เข้มเจริญ² และ ศิริชัย ต่อสกุล³

^{1,2,3}อาจารย์, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี,
39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก(คลองหก) อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

¹paisan.t@en.rmutt.ac.th, ²sonchai.k@en.rmutt.ac.th, ³sirichai.to@en.rmutt.ac.th

Paisan Thongsong¹, Sonchai Kamcharlearn² and Sirichai Torsakul³

^{1,2,3}Lecturer, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 Moo 1 Rangsit-Nakhonnayok Rd.,
Thanyaburi Amphur Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand

¹paisan.t@en.rmutt.ac.th, ²sonchai.k@en.rmutt.ac.th, ³sirichai.to@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

เครื่องสลัดน้ำมันหมูฝอยถูกออกแบบและสร้างขึ้นมาเพื่อลดเวลาในขั้นตอนการสลัดน้ำมันหมูฝอย
สำหรับใช้ในวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม เครื่องต้นแบบประกอบไปด้วย โครงเครื่องมีขนาด
900×900×1200 มิลลิเมตร ถึงเครื่องมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 800 มิลลิเมตร ลึก 500
มิลลิเมตร ตะแกรงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 200 มิลลิเมตร ลึก 25 มิลลิเมตร และระบบ
ควบคุมการทำงานโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2 แรงม้า เป็นเครื่องต้นกำลังในการหมุนเหวี่ยงสลัด
น้ำมัน และใช้ใบเวอร์ขนาด 1800 วัตต์ เพื่อเป่าลมร้อนในการอบหมูฝอย การทดสอบการทำงาน
พบว่า ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 700 รอบต่อนาทีและเวลาสลัดน้ำมันหมูฝอย 10 นาที มีปริมาณ
ความชื้นที่น้อยที่สุดเท่ากับ 2.08 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าปริมาณน้ำมันเท่ากับ 10.18 เปอร์เซ็นต์
สามารถสลัดน้ำมันหมูฝอยได้สูงสุดที่ 93 กิโลกรัมต่อวัน

คำสำคัญ: หมู, วิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม, เครื่องสลัดน้ำมัน

ABSTRACT

Oil splashing machine was design and built to help reduce time in procedure oil splashing of worker in small to medium enterprise. The prototype included machine frame size 900 × 900 × 1200 mm, bucket internal diameter 800 mm. and depth 500 mm, grille internal diameter 200 mm and depth 25 mm, and controlling system with 2 HP as the initial power of the oil splashing. The experiment found that the machine peak performance spinning at 700 rpm and time in oil splashing 10 minute have minimum humidity 2.08 % and have volume oil 10.18 % with production at the maximum of 93 kg/day

KEYWORDS: Pork, small to medium enterprise, oil splashing machine

1. บทนำ

หมูฝอยเป็นอาหารชนิดหนึ่งของคนไทยที่นิยมทานกันแพร่หลาย “หมูฝอย” ผลิตจากเนื้อหมูส่วนสะโพกหลังหรือสันใน ตัดแต่งแยกมันออกจนได้เนื้อหมูล้วนๆ มองให้ เห็นเส้นใยเป็นริ้วๆ นำมาต้มให้สุก (หากเป็นเนื้อส่วนสะโพกใช้เวลาไจการต้มนานกว่าสันในจนเนื้อหมูเริ่ม เปื่อย) แล้วจึงนำมาฉีกเป็นเส้นๆ ฝอยๆ หลังจากนั้น จึงนำไปหมักกับเครื่องปรุงรส เช่น น้ำตาล ซีอิ้วขาว เกลือหมักไว้ให้ซึมเข้าเนื้อดี ก่อนจะนำไปทอดในน้ำมันร้อนๆ ซึ่งใส่ใบเตยลงไปด้วย เพื่อเพิ่มกลิ่นหอมจาก ใบเตย ช่วยดูดซับกลิ่นหืน และช่วยให้ไขมันไม่ข้นเหนียว ความพิเศษอีกประการหนึ่งของหมูฝอยคือ ใส หอมแดงซอยลงไปทอดพร้อมเนื้อหมูด้วย [1]

ขั้นตอนกระบวนการผลิตหมูฝอยจะใช้เนื้อหมูส่วนสะโพกมีขั้นตอนการผลิตดังต่อไปนี้ ขั้นตอนแรกนำเนื้อหมูไปต้มจนสุกได้ที่ ต่อก็นำหมูที่ต้มแล้วมาทุบเพื่อให้เนื้อหมูแตกเพื่อที่จะฉีกได้ง่ายขึ้นแล้วทำการฉีกเนื้อหมูออกเป็นเส้น จากนั้นนำเนื้อหมูที่ฉีกเป็นเส้นๆแล้วไปปรุงรสตามสูตร เมื่อปรุงรสเสร็จแล้วนำลงไปทอดจนเป็นสีน้ำตาลทอง แล้วจากนั้นจะทำหมูฝอยที่ได้ขึ้นมาสะเด็ดน้ำมัน เมื่อแห้งได้ตามต้องการแล้วจะนำหมูฝอยไปบรรจุลงหีบห่อเพื่อทำการจำหน่ายให้แก่ผู้บริโภคต่อไป

กลุ่มสตรีอาสาพัฒนาแม่บ้านหนองหลวง ต.ไตรตรึงษ์ อ.เมือง จ.กำแพงเพชร ได้พบปัญหาในขั้นตอนของการสะเด็ดน้ำมันหมูฝอยที่ผ่านการทอดมาแล้ว มีปริมาณน้ำมันคงเหลืออยู่ในหมูฝอยมาก ซึ่งจะส่งผลเสียต่อคุณภาพของหมูฝอยคือ อายุในการเก็บรักษาจะน้อยลง และหมูฝอยจะมีกลิ่นหืนทำให้เสียรสชาติของหมูฝอย และในขั้นตอนการสะเด็ดน้ำมันหมูฝอยนี้ค่อนข้างใช้เวลานานทำให้เสียเวลาในขั้นตอนการบรรจุลงหีบห่อดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วิธีการเสิร์ฟน้ำมันแบบเดิม

ตั้งหน้าวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบและสร้างเครื่องสลัดน้ำมันหมูฝอยต้นแบบ เพื่อต้องการลดปริมาณน้ำมันที่คงเหลืออยู่ในหมูฝอย และต้องการลดระยะเวลาในขั้นตอนเสิร์ฟ น้ำมัน ซึ่งมีระบบกลไกการทำงานคือใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง โดยใช้มอเตอร์ที่สามารถควบคุมความเร็วได้ นอกจากนี้ยังใช้เครื่องเป่าลมร้อนเพื่อนำความร้อนเข้าสู่ตัวถังทำให้หมูฝอยแห้งโดยทั่วกัน โดยตัวถังของเครื่องทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 จากนั้นจึงทำการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องโดยการนำหมูฝอยที่ผ่านการทอดเสร็จแล้วเข้าไปเหวี่ยงสลัดในเครื่องแล้วหาความเร็วรอบที่ทำให้ปริมาณน้ำมันในหมูฝอยออกมากที่สุดแล้วยังคงมีคุณภาพดี เมื่อได้ความเร็วรอบที่เหมาะสมแล้วจึงได้ทำการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ส่งผลให้ปริมาณน้ำมันในหมูฝอยน้อยที่สุดแล้วคุณภาพของหมูฝอยดีที่สุด

2. วิธีการศึกษา

2.1 ศึกษาข้อมูลสำหรับออกแบบ

จากการศึกษาดูงานของกลุ่มแม่บ้านแม่ลำดวนพบว่ากรรมวิธีการผลิตหมูฝอยเริ่มจากการเลือกสันสะโพกหมูเพื่อนำไปต้ม เพราะสันสะโพกหมูมีความเหนียวและเป็นเส้นง่ายต่อการฉีกโดยใช้เวลาต้ม 50 นาที เมื่อต้มเสร็จนำมาทุบและฉีกเป็นเส้น จากนั้นหมักด้วยเครื่องปรุงรสคลุกเคล้าให้เข้ากันจนน้ำตาลละลายเมื่อเสร็จขั้นตอนที่กล่าวข้างต้นก็สามารถนำไปทอดได้โดยใช้เวลาทอดประมาณ 10 หลังจากนั้นนำขึ้นมาเสิร์ฟน้ำมัน

2.2 การออกแบบเครื่องต้นแบบ

จากการศึกษาปัญหาและข้อมูลต่างๆ สำหรับการออกแบบเครื่องทอดหมูฝอยต้นแบบเพื่อใช้ในธุรกิจขนาดเล็กนั้น สามารถออกแบบส่วนประกอบหลักของเครื่องโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) [2-3] การออกแบบเครื่องสลัดน้ำมันต้นแบบ ได้แบ่งออกเป็น 2 ระบบ

ด้วยกัน ได้แก่ ระบบเหยียงสลัดน้ำมัน โดยจากการคำนวณค่าแรงบิดจะได้เท่ากับ 2 N.m และระบบอบด้วยลมร้อน [4] การทำงานของเครื่องสลัดน้ำมันหมูฝอยต้นแบบใช้มอเตอร์ 2 แรงม้า ที่ต้องใช้มอเตอร์ 2 แรงม้าเนื่องจากโมเมนต์แรงบิดที่คำนวณมาได้นั้นคือ 2 N.m เมื่อเผื่อค่า (Safety Factor) เท่ากับ 2 เป็นเครื่องต้นกำลังส่งกำลังไปยังเพลลาเพื่อทำการหมุนเหยียงชุดตะแกรงที่อยู่ด้านในของตัวเครื่อง [5] และใช้ฮีตเตอร์เป่าลมร้อนเพื่อใช้ในการอบหมูฝอย ดังรูปที่ 2 โดยโครงเครื่องจะมีขนาดกว้าง 90 เซนติเมตร ยาว 90 เซนติเมตร และ สูง 120 เซนติเมตร ถึงเครื่องมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ภายใน 80 เซนติเมตร ลึก 50 เซนติเมตร ตะแกรงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ภายใน 20 เซนติเมตร ลึก 25 เซนติเมตร ฝาตะแกรงเส้นผ่าศูนย์กลาง นอกสุด 25 เซนติเมตร เพลามีขนาด 37.6 เซนติเมตร ฝาเครื่องเส้นผ่าศูนย์กลาง ภายใน 38 เซนติเมตร ฝาของระบายลม กว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร สูง 0.2 เซนติเมตร และท่อฮีตเตอร์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร วัสดุที่ใช้ในการสร้างขึ้นส่วนคือ สแตนเลส เกรด 304 ซึ่งเป็นวัสดุสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร [6-8]



รูปที่ 2 เครื่องสลัดน้ำมันหมูฝอยต้นแบบ

2.3 การทดลอง

2.3.1 ขั้นตอนการทดลองสลัดน้ำมันหมูฝอย

เมื่อดำเนินการสร้างเครื่องสลัดน้ำมันหมูฝอยต้นแบบเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการทดลองเครื่องสลัดน้ำมันหมูฝอยต้นแบบ เพื่อหาการตั้งค่าเครื่องที่เหมาะสมในการสลัดน้ำมัน เพื่อให้ได้กำลังการผลิต และความแห้งของหมูฝอยมากที่สุด ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการ

เหยียงสลัดน้ำมัน ได้มีการออกแบบการทดลอง โดยการแบ่งความเร็วรอบที่ใช้ในการสลัดน้ำมันเป็น 500 รอบต่อนาที, 700 รอบต่อนาที และ 900 รอบต่อนาที ซึ่งมีขั้นตอนการเหยียงสลัดน้ำมันด้วยเครื่องสลัดน้ำมันดังนี้

- 1) นำเนื้อหมูส่วนสันสะโพกมาต้มในหม้อที่มีน้ำเดือด โดยใช้เวลาในการต้มประมาณ 50 นาที จนกระทั่งเนื้อหมูสุกได้ที่
- 2) นำหมูที่ต้มเสร็จแล้วมาฉีกเป็นเส้นก่อนฉีกควรทำการทุบหมูเพื่อให้หมูสามารถฉีกได้ง่ายขึ้นและปรุงรสด้วยเครื่องปรุงต่างๆ ตามสูตร
- 3) นำหมูฝอยที่ฉีกและปรุงรสเสร็จเรียบร้อยแล้วมาทอดโดยใช้เวลาในการทอดประมาณ 5 นาที จะได้หมูฝอยสีน้ำตาลทอง
- 4) นำหมูฝอยที่ผ่านการทอดเสร็จสิ้นแล้วมาสะเด็ดน้ำมันโดยการแผ่ทิ้งไว้บนตะแกรงเป็นเวลาประมาณ 1 นาที
- 5) นำหมูที่สะเด็ดน้ำมันแล้ว ใส่ในตะแกรง จากนั้นปรับความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที 700 รอบต่อนาที และ 900 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาในการเหยียงสลัดที่ 10, 15, 20 และ 25 นาที
- 6) นำหมูที่สลัดน้ำมันแล้ว ไปทำการตรวจสอบค่าปริมาณน้ำมันที่น้อยที่สุด จากนั้นจึงนำค่าหมูที่ดีที่สุด ไปทำการอบด้วยลมร้อนต่อที่ความเร็ว 30 รอบต่อนาที ด้วยอุณหภูมิที่ 90, 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการอบด้วยลมร้อนที่ 10, 15, 20 และ 25 นาที

2.3.2 การตรวจสอบปริมาณน้ำมันในหมูฝอย

หลังจากขั้นตอนการสลัดน้ำมันหมูฝอยแล้วทางคณะผู้วิจัยได้ทำการเก็บตัวอย่างของหมูฝอยที่ผ่านการสลัดน้ำมันแต่ละตัวอย่างเพื่อนำมาตรวจสอบหาปริมาณน้ำมันในหมูฝอยและเปรียบเทียบกับหมูฝอยที่ไม่ได้สลัดน้ำมันและหมูฝอยตามท้องตลาด โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) เก็บตัวอย่างหมูฝอยที่สลัดน้ำมันแล้วที่ 500 รอบต่อนาที, 700 รอบต่อนาที และ 900 รอบต่อนาที โดยใช้เวลาในการเหยียงสลัดที่ 10, 15, 20 และ 25 นาที และหมูฝอยที่ทำการอบด้วยลมร้อนที่ความเร็ว 30 รอบต่อนาที ด้วยอุณหภูมิที่ 90 , 100 , 110 และ 120 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการอบด้วยลมร้อนที่ 10, 15, 20 และ 25 นาที
- 2) เตรียมถ้วยอลูมิเนียมโดยการใช้เครื่องชั่งน้ำหนักชนิด 4 ตำแหน่ง ชั่งน้ำหนักของถ้วยก่อนการนำเข้าเตาอบด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เพื่อนำความชื้นออกจากถ้วยอลูมิเนียม
- 3) นำถ้วยอลูมิเนียมที่ชั่งน้ำหนักเรียบร้อยแล้วไปอบที่ความร้อน 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำถ้วยอลูมิเนียมออกจากตู้อบปล่อยให้เย็นจนกระทั่งอุณหภูมิของถ้วยอลูมิเนียมลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนักอีกครั้ง
- 4) หลังจากอบถ้วยอลูมิเนียมจนน้ำหนักของถ้วยต่างกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัมแล้ว ทำการชั่งน้ำหนักของหมูฝอยให้ได้น้ำหนักประมาณ 3.5 กรัม

5) นำถั่วยอลูมิเนียมที่ใส่หุฝอยไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำถั่วยอลูมิเนียมออกจากตู้อบปล่อยให้เย็นจนกระทั่งอุณหภูมิของถั่วยอลูมิเนียมลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนักถั่วยอลูมิเนียมพร้อมหุฝอย

6) นำถั่วยอลูมิเนียมพร้อมหุฝอยที่ผ่านการอบแล้วมาชั่งน้ำหนักหลังการอบ อบซ้ำกันจนกระทั่งผลต่างของน้ำหนักไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม แล้วจึงนำไปคำนวณหาค่าความชื้น

7) นำหุฝอยที่ผ่านการอบเพื่อนำความชื้นออกแล้วมาสกัดน้ำมัน โดยนำหุฝอยพับใส่แผ่นกรองและใส่ลงในทิมเบิล

8) เตรียมตัวทำลายและเติมตัวทำลายปิโตรเลียมอีเทอร์ใส่ลงในบีกเกอร์ 150 มิลลิลิตร

9) ทำการสกัดน้ำมันโดยนำหุฝอยที่อยู่ในทิมเบิลใส่ลงไปในทิมเบิลอะแดปเตอร์ โดยใช้ระยะเวลาในการสกัดน้ำมันประมาณ 3-4 ชั่วโมง

10) หลังจากการสกัดน้ำมันเสร็จแล้วจะได้ไขมันอยู่ในบีกเกอร์ นำบีกเกอร์ไปอบเพื่อกลั่นสารปิโตรเลียมอีเทอร์ออกจากไขมัน โดยนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปทิ้งไว้ในโถดูดความชื้น 30 นาที เพื่อให้อุณหภูมิเย็นเท่าอุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงชั่งน้ำหนักและนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ไขมัน

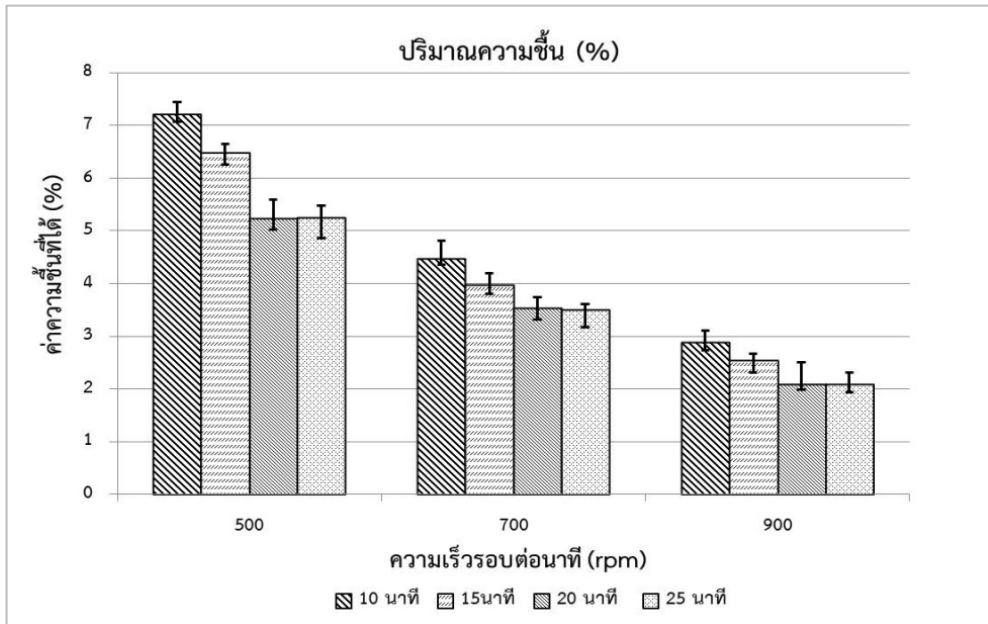
การสกัดน้ำมัน Soxhlet Extraction เป็นวิธีการสกัด เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไขมัน ในตัวอย่างอาหาร หรือปริมาณน้ำมัน เป็นการสกัดแบบต่อเนื่องโดยใช้ตัวทำลายที่มีจุดเดือดต่ำ การสกัดทำได้โดยให้ความร้อนจนตัวทำลายระเหยขึ้นไปแล้วกลั่นตัวลงมาใน Thimble ซึ่งบรรจุตัวอย่างไว้ เมื่อสารที่สกัดได้สูงถึงระดับ กาลักน้ำ สารสกัดจะไหลกลับลงมาใน Flask วงเวียนเช่นนี้ จนครบวงจรการสกัดสมบูรณ์ โดยสามารถสังเกตจากสีของตัวทำลายใน Thimble ที่ใสขึ้น การสกัดด้วยวิธีนี้ใช้ความร้อน จึงอาจทำให้สารสำคัญบางชนิดสลายตัวได้ [9]

3. ผลการทดลอง

การทดลองเครื่องสกัดน้ำมันหุฝอย โดยใช้หุฝอย 3 กิโลกรัมต่อครั้ง ความเร็วรอบที่ใช้ในการสกัดน้ำมัน 500 รอบต่อนาที, 700 รอบต่อนาที และ 900 รอบต่อนาที ที่เวลาสกัด 10, 15, 20 และ 25 นาที และอบที่อุณหภูมิ 90 ,100 ,110 และ 120 องศาเซลเซียส ทำการทดลองและเก็บผลการทดลองได้ผลดังนี้

3.1 ผลการทดลองหาปริมาณความชื้นในหุฝอย

ผลการทดลองหาปริมาณความชื้นหลังการสกัดน้ำมันในหุฝอยที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อ นาที, 700 รอบต่อนาที และ 900 รอบต่อนาที ที่เวลาสกัด 10, 15, 20 และ 25 นาที ดังรูปที่ 3

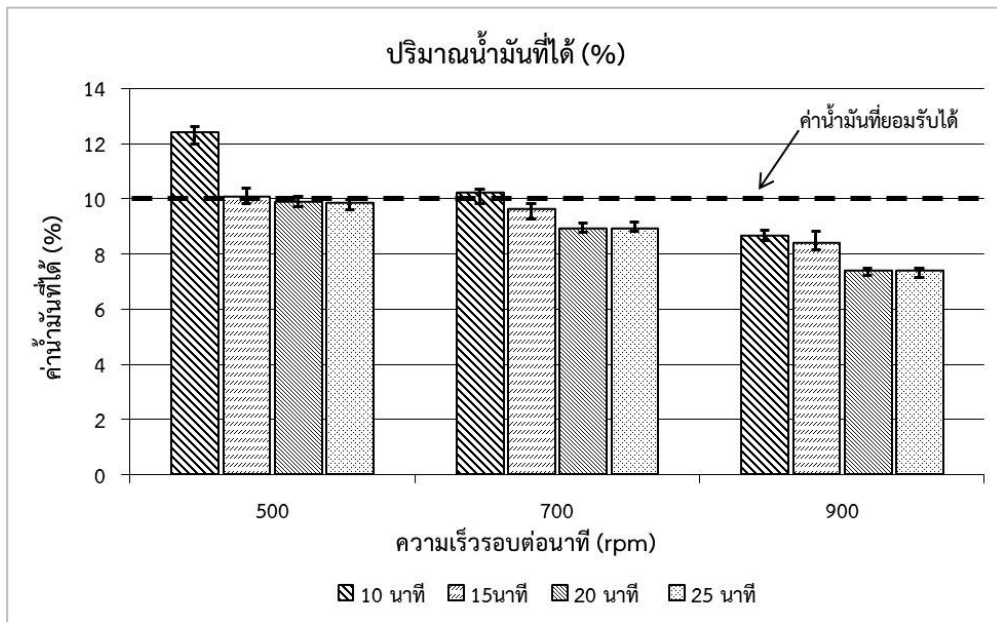


รูปที่ 3 ปริมาณความชื้นหลังการสกัดน้ำมันที่ความเร็วรอบและเวลาต่าง ๆ

ผลการทดลองสกัดน้ำมัน พบว่าความเร็วรอบและเวลาที่ใช้ในการสกัดน้ำมันมีผลต่อปริมาณความชื้นในหมูฝอย ความเร็วรอบและเวลาเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณความชื้นที่อยู่ในหมูฝอยมีค่าลดน้อยลง ซึ่งการหาปริมาณความชื้นนั้นเป็นเพียงส่วนหนึ่งของการหาปริมาณน้ำมัน ในวิธี AOAC 2000 [10] ปริมาณความชื้นที่น้อยที่สุดเท่ากับ 2.08 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที ที่เวลาสกัด 25 นาที และปริมาณความชื้นที่มากที่สุดเท่ากับ 7.21 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ที่เวลาสกัด 10 นาที อย่างไรก็ตามการหาปริมาณความชื้นนั้นไม่มีผลต่อการหาปริมาณน้ำมัน เพราะการหาปริมาณความชื้นเป็นเพียงส่วนหนึ่งในขั้นตอนของวิธี AOAC 2000

3.2 ผลการทดลองหาปริมาณน้ำมันในหมูฝอยด้วยการสกัดและอบ

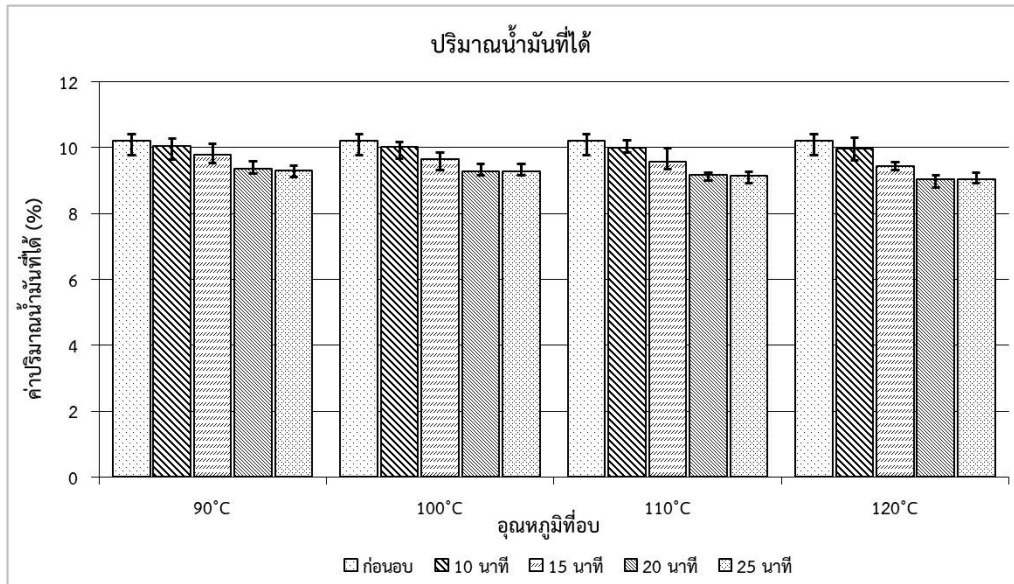
1) ผลการทดลองหาปริมาณน้ำมันหลังการสกัดในหมูฝอยที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที, 700 รอบต่อนาที และ 900 รอบต่อนาที ที่เวลาสกัด 10, 15, 20 และ 25 นาที ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ปริมาณน้ำมันหลังการสลัดน้ำมันที่ความเร็วรอบและเวลาต่าง ๆ

ผลการทดลองสลัดน้ำมัน พบว่าความเร็วรอบและเวลาที่ใช้ในการสลัดน้ำมันมีผลต่อปริมาณน้ำมันในหมูฝอย ความเร็วรอบและเวลาเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณน้ำมันที่อยู่ในหมูฝอยมีค่าลดน้อยลง จากปริมาณน้ำมันในอาหารทอดทั่วไปมีค่าปริมาณน้ำมันอยู่ในช่วง 10 – 40 เปอร์เซ็นต์ [10] ซึ่งจากผลการทดลองพบว่ามี 3 ค่าที่อยู่ในช่วงดังกล่าว คือ 12.40 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ที่เวลา 10 นาที 10.04 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ที่เวลา 15 นาที และ 10.18 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที ที่เวลา 10 นาที ซึ่งถ้าหากมีปริมาณน้ำมันในอาหารทอดยิ่งน้อยก็จะทำให้อาหารมีคุณภาพที่ดีและสามารถเก็บรักษาได้นาน ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเร็วรอบที่ 700 รอบต่อนาที ที่เวลา 10 นาที เพราะมีค่าแตกต่างกับ ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ที่เวลา 15 นาที เพียงเล็กน้อยแต่ใช้เวลาในการสลัดน้ำมันน้อยกว่า ส่วนความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที หมูฝอยมีลักษณะอัดกันเป็นก้อนแข็งเนื่องจากแรงหมุนเหวี่ยงที่มากเกินไปจึงไม่นำมาพิจารณา

2) ผลการทดลองหาปริมาณน้ำมันหลังการสลัดและอบในหมูฝอยที่ความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที ที่เวลาสลัด 10 นาที แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ 90, 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส ที่เวลาอบ 10, 15, 20 และ 25 นาที ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ปริมาณน้ำมันหลังการสกัดและอบที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

จากผลการทดลองหาปริมาณน้ำมันหลังการสกัดและอบในหมูฝอยที่ความเร็วรอบ 700 รอบต่อ นาที ที่เวลาสกัด 10 นาที แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ 90, 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส ที่เวลาอบ 10, 15, 20 และ 25 นาที พบว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบมีผลต่อปริมาณน้ำมันในหมูฝอย อุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณน้ำมันที่อยู่ในหมูฝอยมีค่าลดน้อยลง แต่ปริมาณน้ำมันหลังการอบมีค่าแตกต่างกับปริมาณน้ำมันก่อนอบเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับต้นทุนในขั้นตอนการอบที่เพิ่มขึ้น ทำให้ไม่คุ้มค่าถ้าหากทำการอบ ผู้วิจัยจึงมีความเห็นว่าการสกัดน้ำมันที่ความเร็วรอบ 700 รอบต่อ นาที ที่เวลาสกัด 10 นาที ก็เพียงพอแล้ว จึงไม่จำเป็นที่จะต้องทำการอบด้วยลมร้อน

3.3 ระยะเวลาคืนทุน

การทดลองและการทดสอบการสกัดน้ำมันของหมูฝอยนั้นสามารถนำผลดังกล่าวมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาจุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุน โดยราคาสร้างเครื่องสกัดน้ำมันหมูฝอยต้นแบบมีราคาอยู่ที่ 60,000 บาท มูลค่าซาก 1,000 บาท อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ 8.62 เปอร์เซ็นต์ต่อปี และอายุการใช้งาน 5 ปี สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1 [11]

$$\text{ระยะเวลากลับคืนทุน} = -\text{ราคาเครื่อง} + \text{รายได้ต่อปี (A/P, i, n)} + \text{มูลค่าซาก (A/F, i, n)} + \text{ต้นทุนแปรผัน} + \text{ค่าแรงงานต่อปี} \quad (1)$$

โดยที่ $(A/P, i, n)$ คือ Capital recovery factor, $(A/F, i, n)$ คือ Sinking Fund factor, i คือ อัตราดอกเบี้ย, n คือ อายุการใช้งาน

จากการคำนวณระยะเวลาการคืนทุนของเครื่องฉีกหมูฝอยต้นแบบ พบว่า ใช้ระยะเวลาคืนทุนเพียง 1 ปี ซึ่งถือว่าเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการลงทุน

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองหาปริมาณความชื้นในหมูฝอยพบว่า ความเร็วรอบและเวลาที่ใช้ในการสลัดน้ำมันมีผลต่อปริมาณความชื้นในหมูฝอย ความเร็วรอบและเวลาเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณความชื้นที่อยู่ในหมูฝอยมีค่าลดน้อยลง

ผลการทดลองหาปริมาณน้ำมันในหมูฝอยพบว่าความเร็วรอบและเวลาที่ใช้ในการสลัดน้ำมันมีผลต่อปริมาณน้ำมันในหมูฝอย ความเร็วรอบและเวลาเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณน้ำมันที่อยู่ในหมูฝอยมีค่าลดน้อยลง ความเร็วรอบที่เหมาะสมในการสลัดน้ำมันหมูฝอย คือความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการสลัดน้ำมัน 10 นาที มีค่าปริมาณน้ำมันเท่ากับ 10.18 เปอร์เซ็นต์

การวิเคราะห์ผลทางกายภาพของหมูฝอยที่ผ่านกระบวนการสลัดน้ำมันและอบ พบว่าตัวอย่างทางกายภาพของหมูฝอยที่มีคุณภาพดีตามมาตรฐาน น้ำมันที่คงเหลือในหมูฝอยน้อย และไม่มีการเหม็นหืน คือที่ความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที ที่เวลาสลัด 10 นาทีและอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ที่เวลาอบ 25 นาที มีค่าเท่ากับ 9.01 เปอร์เซ็นต์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก RMUTT financial budget in fiscal in 2017 ที่ได้ให้งบประมาณสนับสนุนโครงการวิจัย และขอขอบคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ จนโครงการวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จในการดำเนินงานเป็นอย่างดี ทางผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

References

- [1] Technology Clinic Moofoy Making [Internet]. [cited 2015 Jun 28]. Available from: <http://\clinictech.rmutp.ac.th> (In Thai)
- [2] Krutz G, Thomson L, Claar P. Design of agricultural machinery. New York: John Wiley and Sons; 1994.
- [3] Shigley JE, Mischke CR. Mechanical engineering design. USA: McGraw-Hill Book; 1989.

- [4] Utai Phongrasamee. The oil splashing machine for fried food. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Phetchaburi Rajabhat University; 2008. (In Thai)
- [5] Tatree Srisombat, Monthol Changchok and Precha Yuenyongkul. Oil expelling machine from banana chip. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna; 2005. (In Thai)
- [6] Adisak Ruecha, Must Srila. Banana Slider Machine. Prawarun Agricultural Journal. 2015;12(2):136-43. (In Thai)
- [7] Pimpen Pornchaiuempong, Nithiya Rattanapanone. Stainless steel [Internet]. [cited 2016 Oct 15]. Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1236/stainless-steel> (In Thai)
- [8] Notification of the Ministry of Public Health (No. 193) B.E. 2543 (2000) Re: Production processes, production equipments, and foods storages [Internet]. 2000 [cited 2015 Jun 28]. Available from: http://food.fda.moph.go.th/law/data/announ_moph/P193.pdf (In Thai)
- [9] Moisture and fat content analysis [Internet]. [cited 2016 Dec 25]. Available from: http://researchsystem.siam.edu/images/researchin/Developmen_t_of_tempeh_for_the_production_of_a_vegetarian_food_product/55555.pdf (In Thai)
- [10] Daranee Klaikreuh. Mechanism for oil uptake reduction in food products after frying. Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University; 2010. (In Thai).
- [11] Paiboon Yaemphuan. Engineering economy. Bangkok: Se-education; 2005. (in Thai).

ประวัติผู้เขียนบทความ



ไพศาล ทองสงค์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก(คลองหก) อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 025-493490 โทรสาร 025-493442 E-mail: paisan.t@en.rmUTT.ac.th



สนชัย เข้มเจริญ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก(คลองหก) อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 025-493490 โทรสาร 025-493442 E-mail: sonchai.k@en.rmutt.ac.th ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม



ศิริชัย ต่อสกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก(คลองหก) อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ 025-493490 โทรสาร 025-493442 E-mail: sirichai.to@en.rmutt.ac.th ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

จำนวนประชากรที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมขนาดเล็ก
สำหรับประเมินความแข็งแรงในที่ของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์
AN APPROPRIATE POPULATION OF MICRO GENETIC ALGORITHMS
FOR EVALUATION OF IN SITU STIFFNESS OF SOIL-CEMENT BASE

พุทพอล ทองอินทร์ดำ¹ และ ประกาศ ทองประไพ²

¹หัวหน้าศูนย์ความเป็นเลิศด้านโครงสร้างพื้นฐานและเทคโนโลยีท่าอากาศยาน (CEIA)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.

คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12110, puttapon.t@en.rmutt.ac.th

²กรรมการศูนย์ความเป็นเลิศด้านโครงสร้างพื้นฐานและเทคโนโลยีท่าอากาศยาน (CEIA)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก

ต.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12110, prakard.t@en.rmutt.ac.th

Puttapon Thongindam¹ and Prakard Thongprapai²

¹Head of Center of Excellence for Infrastructure and Airport Technology (CEIA),
Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 M.1 Rangsit-
Nakorn Nayok Road, Klong 6, Klong Luang, Pathumthani, 12110, puttapon.t@en.rmutt.ac.th

²Committee of Center of Excellence for Infrastructure and Airport Technology (CEIA),
Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 M.1 Rangsit-
Nakorn Nayok Road, Klong 6, Klong Luang, Pathumthani, 12110, prakard.t@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาประสิทธิภาพการวิเคราะห์ย้อนกลับหาค่าความแข็งแรงของ
โครงสร้างถนนที่ใช้พื้นทางดินซีเมนต์ด้วยระเบียบวิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรมขนาดเล็ก โดยเก็บข้อมูล
ภาคสนามจากแปลงทดสอบที่สร้างขึ้นในจังหวัดฉะเชิงเทรา โดยทดลองกำหนดจำนวนประชากร
แบบอย่างง่ายที่แปรผันตามความยาวของสายอักขระ พบว่าการวิเคราะห์ด้วยจำนวนประชากร
ขนาดใหญ่กว่าด้วยระยะเวลาสั้นกว่ามีแนวโน้มให้ค่าคำตอบที่มีความถูกต้องสูงกว่า แต่มีข้อด้อยที่
ใช้ระยะเวลานาน รวมทั้งการวิเคราะห์ช่วงประมาณ 10,000 ครั้งสุดท้ายอาจไม่คุ้มค่ากับผลลัพธ์ที่
ได้ ในขณะที่กระบวนการวิเคราะห์ที่มีจำนวนรอบจำกัดให้ค่าความถูกต้องในเกณฑ์ที่ยอมรับได้
โดยผลการศึกษาพบว่าจำนวนประชากรต่อรุ่นเท่ากับ 7 ทำให้ระเบียบวิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรม
ขนาดเล็กสามารถทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุดในกรณีศึกษา

คำสำคัญ: พื้นทางดินซีเมนต์, โมดูลัสยืดหยุ่น, ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมขนาดเล็ก

ABSTRACT

This article presents the results of a study on the efficiency of backanalysis for the strength of road structure containing soil-cement base using micro-genetic algorithms. Field data are collected from the test sections constructed in Chachoengsao Province. The population sizing is determined by the simplified approach depending on the string length. It has been found that large population with generous computational resources results in higher accuracy. But the disadvantages are that it takes longer time and the approximate last 10,000 function evaluations may not be worth the added computation cost. While large population with limited computational resources is appropriate for practical application and the accuracy is within acceptable range. It is clear in these results that the micro-GA performed best with population size equals to 7 for this case study.

KEYWORDS: Soil-cement base, Layer moduli, Micro Genetic Algorithms

1. บทนำ

ปัญหาการขาดแคลนวัสดุหินคลุกในการก่อสร้างถนนได้ขยายตัวออกไปในหลายพื้นที่ของประเทศไทย การขนส่งหินคลุกจากกระยะทางไกลทำให้ต้องเพิ่มต้นทุนการก่อสร้าง สร้างความเสียหายให้กับเส้นทางขนส่ง รวมทั้งการระเบิดหินที่กลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อม ทำให้การใช้วัสดุทดแทนในท้องถิ่น เช่น ดินซีเมนต์ (Soil-cement) เป็นหนึ่งในกลยุทธ์สำคัญที่จะช่วยแก้ปัญหาได้

ในช่วงเวลาที่ผ่านมา มีการออกมาตรฐานเกี่ยวกับพื้นทางดินซีเมนต์ [1] และมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับดินซีเมนต์มากยิ่งขึ้น เช่น การศึกษาเพื่อแก้ปัญหาเกี่ยวกับรอยร้าวขนาดใหญ่จากการหดตัวที่เกิดขึ้นในชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ (Major shrinkage cracks) ที่สามารถส่งผลให้เกิดเป็นรอยร้าวแบบสะท้อน (Reflective cracks) ในชั้นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตได้ภายในระยะเวลาเพียงไม่นานภายหลังจากเปิดให้บริการ ซึ่งทำให้โครงสร้างทางมีอายุการใช้งานที่สั้นลงอย่างมาก

ทั้งนี้การแก้ปัญหารอยร้าวแบบสะท้อนด้วยการสร้างรอยร้าวขนาดเล็ก (Microcracking method) เป็นวิธีที่สะดวก และมีผลการศึกษาทั้งในและต่างประเทศ [2] ยืนยันถึงประสิทธิภาพที่ดีและที่สำคัญใช้ต้นทุนต่ำ เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในประเทศไทย โดยมีหัวใจสำคัญอยู่ที่การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการลดกำลังความแข็งแรงในที่ (In situ stiffness) ของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ให้เหมาะสม ทั้งนี้จำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back Analysis) หาค่าความ

แข็งแรงของชั้นทางดินซีเมนต์ที่มีความถูกต้องและรวดเร็ว เนื่องจากเป็นงานที่ต้องการคำตอบในภาคสนามเพื่อควบคุมการก่อสร้างให้มีประสิทธิภาพ

สำหรับระเบียบวิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) นั้นได้เริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการคำนวณย้อนกลับ เนื่องจากปัญหาดังกล่าวมีความซับซ้อน พื้นที่คำตอบมีหลายจุดสูงสุดและต่ำสุด (Multimodal problems) โดยเฉพาะระเบียบวิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรมขนาดเล็ก (micro Genetic Algorithms, μ GA) ซึ่งมีคุณสมบัติหลายประการที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ประเมินความแข็งแรงในที่ของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ และชั้นทางอื่นๆ แต่กลับพบการนำ μ GA มาประยุกต์ใช้ในงานลักษณะนี้น้อยมาก

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการประยุกต์ใช้ μ GA ในการวิเคราะห์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทาง (Layer moduli) โดยเฉพาะชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ จากค่าการยุบตัว (measured deflections) ที่วัดได้จริงในสนามจากเครื่องวัดค่าการยุบตัวจากตุ้มกระแทกแบบเบา (Lightweight Deflectometer, LWD) โดยมุ่งเป้าหมายขนาดประชากรที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้ได้แนวทางในการประยุกต์ใช้ μ GA ในการประเมินความแข็งแรงโครงสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้พื้นทางดินซีเมนต์ ทั้งในขั้นตอนการก่อสร้างและช่วงเวลาเปิดให้บริการแล้ว

2. ทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดินซีเมนต์และการพัฒนากำลัง

โครงสร้างผิวทางที่ก่อสร้างชั้นพื้นทางด้วยดินซีเมนต์และปิดทับหน้าด้วยแอสฟัลต์คอนกรีตถือเป็นโครงสร้างผิวทางชนิดหยุนตัว ซึ่งสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมทางกลศาสตร์ได้โดยทฤษฎีชั้นทางยืดหยุ่น (Layered Elastic Theory, LET) โดยจำเป็นต้องทราบค่าความหนาชั้นทาง อัตราส่วนปัวส์ซอง ค่าการยืดเกาะระหว่างชั้นทาง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นแต่ละชั้นทางเพื่อใช้เป็นค่า นำเข้าสำหรับการวิเคราะห์ค่าการยุบตัวตามทฤษฎี โดยในการทำนายค่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (ES) ของพื้นทางดินซีเมนต์นั้นอาจทำได้โดยใช้แบบจำลอง จากค่ากำลังอัดแกนเดียว (UCS) ซึ่งนำเสนอโดย Jaritngam et al. [3] ในปี ค.ศ. 2012 ที่พบว่าค่า UCS ของดินซีเมนต์มีการเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นเมื่อพล็อตเทียบกับค่าลอกการิทึมของเวลา และได้นำเสนอผลการศึกษาเป็น ไว้ดังนี้

$$ES = -71.83 + 188.28UCS \quad (1)$$

2.2 ระเบียบวิธีขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมขนาดเล็ก

ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1997 จนถึงปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น NUS-GABACK, GA, BACKGA, GAPAVE และ BACKGENETIC3D [4-8] ตามลำดับ ซึ่งโปรแกรมคำนวณย้อนกลับ

ทั้งหมดข้างต้นใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย (Simple Genetic Algorithm) หรือ SGA เป็นเครื่องมือค้นหาค่าคำตอบ ซึ่งขั้นตอนพื้นฐานการคำนวณย้อนกลับหาค่าโมดูลัสของถนนด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย (Simple Genetic Algorithms, SGA) สามารถสรุปได้ดังนี้

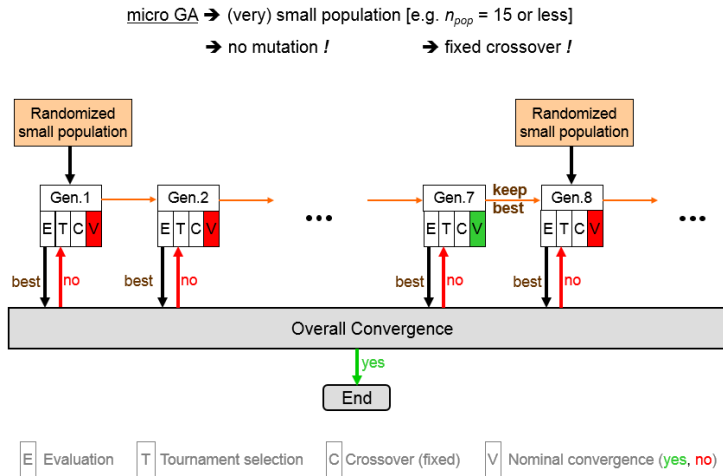
สร้างกลุ่มประชากรแบบสุ่มโดยใช้ระบบเลขฐานสอง (0,1) และแปลงรหัสกลับให้เป็นค่าโมดูลัสยึดหยุ่น (ตัวแปร E) ของแต่ละชั้นทาง จากนั้นประเมินค่าความเหมาะสม (fitness value) โดยเปรียบเทียบค่าความยุบตัวที่คำนวณได้จาก LET กับค่าวัดจริงในสนามจากเครื่องมือ LWD โดยใช้ค่า Root Mean Square Error (RMSE) และเข้าสู่การผสมข้ามแบบจุดเดียว โดยโครงสร้างที่มีความเหมาะสมกว่าจะมีโอกาสถูกเลือกให้จับคู่แบบสุ่ม และผสมพันธุ์เพื่อให้เกิดทายาทรุ่นต่อไป จากนั้นเข้าสู่การกลายพันธุ์แบบกระโดด ซึ่งรุ่นทายาทจะถูกสุ่มเลือกให้มีการเปลี่ยนค่าจาก 0 เป็น 1 หรือกลับกัน ณ ตำแหน่งสุ่มใดๆ ซึ่งมีโอกาสค่อนข้างน้อยและเพียงพอเพื่อช่วยให้การค้นหาค่าตอบไม่ติดอยู่กับจุดต่ำสุดเฉพาะที่ใดๆ

โดยปกติประชากรรุ่นใหม่จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยลง และการพัฒนาประชากรจะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ จนกว่าจะพบโครงสร้างที่เป็นไปตามเงื่อนไข เช่น $RMSE_{คำนวณได้} < RMSE_{ที่ยอมรับ}$ ซึ่งโครงสร้างนั้นจะกลายเป็นค่าชุดคำตอบที่ต้องการ ทั้งนี้จะพบว่า SGA มีศักยภาพที่ดีแต่ใช้ระยะเวลาและทรัพยากรการคำนวณค่อนข้างมาก

ในปี ค.ศ. 2005 พุทธพล ทองอินทร์ดำ [9] ได้พัฒนาโปรแกรมการคำนวณย้อนกลับชื่อ GAMLET ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งระบบ SGA [10] และ μ GA ซึ่งมีกระบวนการคล้ายกับ SGA ที่อธิบายไว้ข้างต้น แต่ใช้ระยะเวลาในการคำนวณน้อยกว่า เพราะ SGA ใช้ประชากรต่อรุ่นประมาณ 50-500 แต่ μ GA ใช้เพียง 15 หรือน้อยกว่า ส่งผลให้วิเคราะห์ปัญหาได้เร็วกว่าประมาณ 7 -18 เท่าตัว [9] แต่ยังคงศักยภาพการค้นหาค่าตอบได้ดี ดังนั้นในกรณีการควบคุมการสร้างรอยร้าวขนาดเล็กของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ ซึ่งเป็นกระบวนการในภาคสนามเพื่อให้ได้ข้อมูลสำคัญประกอบการตัดสินใจการเพิ่มรอบการบดอัดหรือไม่ ดังนั้น μ GA จึงมีคุณสมบัติเบื้องต้นที่เหมาะสม

ในรูปที่ 1 แสดงกระบวนการของ μ GA โดยประชากรเริ่มต้นจะถูกสุ่มสร้างขึ้นตามจำนวนที่กำหนด และประเมินหาค่าความเหมาะสมเช่นเดียวกับใน SGA แต่การคัดเลือกผู้มีโอกาสสืบทอดสายพันธุ์ใช้วิธีทัวร์นาเมนต์ (tournament selection) [9] ซึ่งเป็นลักษณะของการสุ่มเลือกมาเปรียบเทียบหาผู้ชนะแบบตัวต่อตัว และเข้าสู่กระบวนการแปลงข้ามสายพันธุ์ด้วยค่าความน่าจะเป็นแบบคงที่ และทำการตรวจสอบถึงค่าความคลาดเคลื่อนว่าอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้เบื้องต้น (nominal convergence) หรือไม่ ประชากรที่ผลประเมินที่ดีที่สุดในแต่ละรุ่นจะถูกส่งไปตรวจสอบตามเกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนโดยรวม (overall convergence) หากอยู่ในเกณฑ์ก็แสดงว่าได้ชุดคำตอบค่าโมดูลัสชั้นทางที่ต้องการ แต่หากเกินกว่าเกณฑ์ กระบวนการของรุ่นที่ 2 และรุ่นต่อไปจะเริ่มต้นขึ้นในลักษณะเดิม จนถึงจำนวนรุ่นที่กำหนด เช่นในรุ่นที่ 8 ที่แสดงในรูปที่ 1 จะมีการคัดทิ้งประชากร

ทั้งหมด ยกเว้นประชากรที่ดีที่สุดเพียง 1 เดียว และทำการสุ่มสร้างประชากรชุดใหม่แทนชุดเก่าที่คัดทิ้งไป จากนั้นก็เริ่มขั้นตอนในรุ่นต่อไปในลักษณะเดิมจนกว่าจะพบชุดคำตอบที่ต้องการ



รูปที่ 1 กระบวนการของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมขนาดเล็ก

โดยในปี ค.ศ. 1999 Abu-Lebdeh และ Benekohal [11] ได้ศึกษาความแปรผันของการลู่เข้าและขนาดประชากรที่เหมาะสมของ μ GA และพบว่าจำนวนประชากรที่ดีที่สุดไม่สามารถหาค่าได้หากยังไม่มีข้อมูลการลู่เข้า และการลู่เข้านั้นอาจไม่มุ่งสู่คำตอบที่ดีที่สุด โดยในการศึกษานั้นได้แบ่งระดับของการคำนวณไว้ 3 ระดับ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับการคำนวณของ μ GA [11]

ระดับการคำนวณ	จำนวนครั้งการคำนวณฟังก์ชัน
จำกัด (limited)	5,000 ครั้ง
ปานกลาง (medium)	10,000 ครั้ง
เปิดกว้าง (generous)	30,000 ครั้ง

โดยพบว่าในกรณีการคำนวณแบบเปิดกว้างนั้นจำนวนประชากรขนาดเล็กสามารถทำงานได้ดีเทียบเท่าหรือในบางครั้งดีกว่าจำนวนประชากรขนาดใหญ่ ทั้งนี้ Abu-Lebdeh และ Benekohal [11] ได้นำเสนอวิธีการหาค่าจำนวนประชากรที่ดีที่สุดกับแต่ละโจทย์ปัญหาของ micro-GA ไว้ 3 วิธีการ ได้แก่ วิธีสุ่มเลือกประชากร (Random Choice of Population) วิธีรายละเอียด (The Detailed Approach) และ วิธีอย่างง่าย (The Simplified Approach)

โดยจากทั้ง 3 วิธี พบว่าวิธีอย่างง่ายเป็นวิธีที่สะดวกเหมาะกับการใช้งานในทางปฏิบัติ จึงเป็นวิธีที่จะนำมาใช้ทดสอบหาค่าจำนวนประชากรที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ โดยมีขั้นตอน ดังนี้คือ

- 1) กำหนดช่วงของจำนวนประชากรโดยประมาณจากค่าระหว่าง $0.4(L)^{1/2}$ ถึง $1.4(L)^{1/2}$ โดยที่ L คือ ความยาวของสายอักขระ (String length)
- 2) เริ่มต้นคำนวณโดยใช้ค่าจำนวนประชากรโดยประมาณ $(L)^{1/2}$ โดยทดสอบทั้ง 3 ระดับการคำนวณ ในกรณีกำหนดสถานะแบบจำกัดให้เลือกทดสอบที่ด้านบนของช่วง แต่หากกำหนดสถานะแบบเปิดกว้างให้เลือกทดสอบที่ด้านล่างของช่วง

3. ขั้นตอนวิธีวิจัย

1. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ GAMLET ให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางดินซีเมนต์แบบเดินหน้าด้วย LET และใช้ μGA เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ย้อนกลับ
2. เลือกวัสดุดินลูกรังสำหรับก่อสร้างดินซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานพื้นทางดินซีเมนต์ มาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 204/2556 [1]
3. กำหนดบริเวณก่อสร้างแปลงทดสอบและอยู่ในบริเวณที่มีความสะดวกในการเผ่าสังเกตและบันทึกข้อมูลการพัฒนาของรอยร้าวทั้งในช่วงเวลาต่างๆ
4. สร้างแปลงทดสอบ 2 แปลง ขนาดความกว้าง 3 เมตร ความยาว 10 เมตร ตามมาตรฐานการก่อสร้างของกรมทางหลวง โดยเลือกใช้รถบดล้อเหล็กขนาด 19 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะของรถบดล้อเหล็กที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ น้ำหนัก 19 ตัน

5. ผสมดินกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ร้อยละ 8 โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักดินแห้ง ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงกว่าค่ามาตรฐานทั่วไป เนื่องจากต้องการให้มีรอยร้าวที่ชัดเจนในชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ของแปลงทดสอบ เพื่อความสะดวกต่อการติดตามพฤติกรรมรอยร้าวด้วยตาเปล่า
6. ปูชั้นพื้นทางดินซีเมนต์หนา 15 เซนติเมตร ทั้ง 2 แปลงทดสอบ และทำการบ่มเปียกด้วยการฉีดพ่นน้ำ 3 วัน โดยไม่มีการลาดแอสฟัลต์ชั้น Prime coat ปิดทับ และกำหนดให้แปลงที่ 1 เป็นแปลงทดสอบ และแปลงที่ 2 เป็นแปลงควบคุม

7. ที่อายุ 3 วัน และ 7 วัน ตรวจสอบรอยร้าวและสภาพความเสียหายทั่วไป รวมทั้งเจาะเก็บตัวอย่างดินซีเมนต์จากทั้ง 2 แปลงทดสอบ เพื่อหาค่า UCS
 8. ใช้ผลทดสอบ UCS ที่ได้จากขั้นตอนที่ 9 วิเคราะห์หาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นพื้นทางดินซีเมนต์ โดยใช้แบบจำลองจากผลการศึกษาของ Jaritngam et al. [3]
 9. ใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่อายุ 28 วัน จากขั้นตอนที่ 10 สร้างแบบจำลองโครงสร้างทางในโปรแกรมวิเคราะห์ชั้นทางยืดหยุ่น BISAR ซึ่งต้องมีค่าตัวแปรพื้นฐานของชั้นทาง ได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ค่าความหนา และอัตราส่วนปัวซ็องงง เป็นต้น
 10. วิเคราะห์หาค่าการยุบตัวตามแนวรัศมีในโปรแกรมวิเคราะห์ชั้นทางยืดหยุ่น BISAR เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในประเมินประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ย้อนกลับ
 11. ใช้ผลวิเคราะห์จากโปรแกรม BISAR เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเปรียบเทียบความสามารถในการวิเคราะห์ย้อนกลับของโปรแกรม GAMLET ที่ใช้ μ GA
 12. วิเคราะห์หาค่าจำนวนประชากรที่ดีที่สุด (best population size) สำหรับ μ GA ด้วยวิธีอย่างง่าย และประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างแอสฟัลต์ที่ใช้พื้นทางดินซีเมนต์
- ทั้งนี้การวิเคราะห์การปฏิบัติงานในภาคสนามต้องการได้คำตอบที่รวดเร็ว ดังนั้นในการศึกษานี้จะทำการวิเคราะห์ในระดับเปิดกว้างเพื่อดูในภาพรวมเท่านั้น และจะมุ่งประเด็นที่การทดสอบในระดับจำกัด (limited) หรือ 5,000 ครั้ง เป็นหลัก ส่วนค่านำเข้าอื่นแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรของ μ GA สำหรับวิเคราะห์

ตัวแปร (variable)	ค่านำเข้า
ค่า $E_{min}-E_{max}$ ชั้นทางที่ 1 [MPa]	500-8,000
ค่า $E_{min}-E_{max}$ ชั้นทางที่ 2 [MPa]	5-1,000
ค่า $E_{min}-E_{max}$ ชั้นทางที่ 3 [MPa]	5-500
จำนวนรุ่นสูงสุด	varies
จำนวนประชากร	varies
อัตราการผสมข้ามแบบจุดเดียว	0.50
การปิด-เปิด การผสมข้ามแบบสม่ำเสมอ	on
การคงอยู่ของผู้นำ	on
จำนวนทายาทต่อหนึ่งคู่	1

4. ผลการทดสอบและบทวิเคราะห์

4.1 ผลการคาดการณ์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นดินซีเมนต์

จากผลศึกษาของ Jaritngam et al. [3] ได้ค่าคาดการณ์ค่า UCS ของดินซีเมนต์แบบเชิงเส้นเทียบกับ log ของเวลา ทำให้ประเมินค่าโมดูลัสยืดหยุ่นดินซีเมนต์ที่อายุ 28 วันได้ 666 MPa จึงสร้างแบบจำลองโครงสร้างถนนได้ดังตารางที่ 3 และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ BISAR วิเคราะห์ภายใต้น้ำหนักกระทำ 0.7 MPa ตามแนวรัศมี ที่ระยะ 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, และ 1500 มม. ได้ค่ายุบตัวเท่ากับ 828, 708, 630, 530, 446, 319, 236 และ 181 ไมครอน ตามลำดับ

ตารางที่ 3 แบบจำลองโครงสร้างถนน-พื้นทางดินซีเมนต์ ที่อายุ 28 วัน

Layer	Thickness [m]	Material	E [MPa]	μ	Slip behavior
1	0.10	HMA	3,000	0.35	0.00
2	0.15	Soil cement	666	0.20	0.00
3	Inf.	Subgrade	20	0.40	

จากช่วงความเป็นไปได้ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแต่ละชั้นทางทำให้ได้ความยาวข้อมูล (String length, L) ของเลขฐาน 2 (Binary code) ได้ 32 ทำให้กำหนดช่วงจำนวนประชากรได้ระหว่าง $0.4(L)/2$ ถึง $1.4(L)/2$ คือ 2 ถึง 8 แต่เนื่องจากค่าจำนวนประชากร 3 เป็นค่าต่ำสุดที่แนะนำ [11] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงกำหนดค่าตัวแปรของช่วงจำนวนประชากรที่ดีที่สุด คือ 3 ถึง 8 โดยค่า $(L)/2$ ซึ่งเท่ากับ 6 คือ ค่าจำนวนประชากรต่อรุ่นที่แนะนำให้ใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการวิเคราะห์

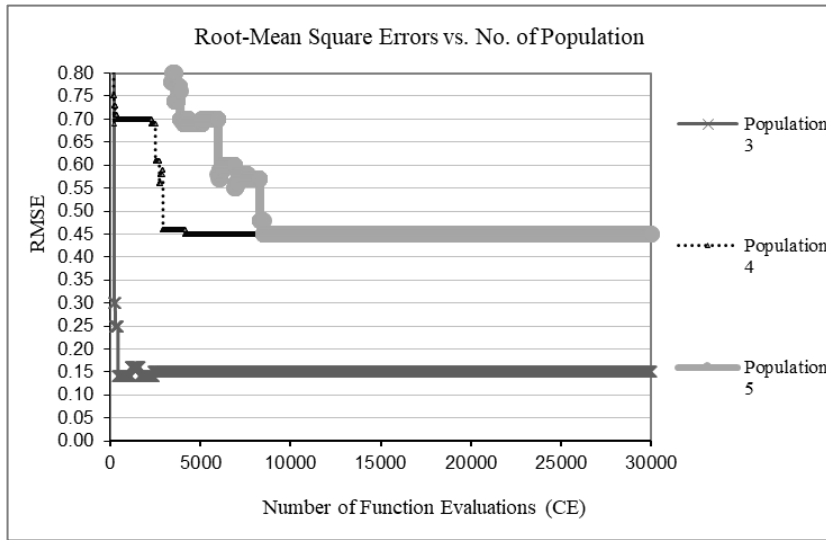
4.2 ผลการวิเคราะห์ระดับเปิดกว้าง

พิจารณาความคลาดเคลื่อนของคำตอบในรูปของค่า RMSE จากการเปรียบเทียบค่าการยุบตัวตั้งต้นกับค่าการยุบตัวที่ได้จากชุดโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทาง (E_1, E_2, E_3) จากการคำนวณย้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าจำนวนประชากร 7 และ 8 ได้ชุดคำตอบสุดท้ายที่ใกล้เคียงกันโดยจำนวนประชากร 7 ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เท่ากับ 0.02 เท่านั้น โดยให้ค่าคำตอบของโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทาง ดังนี้

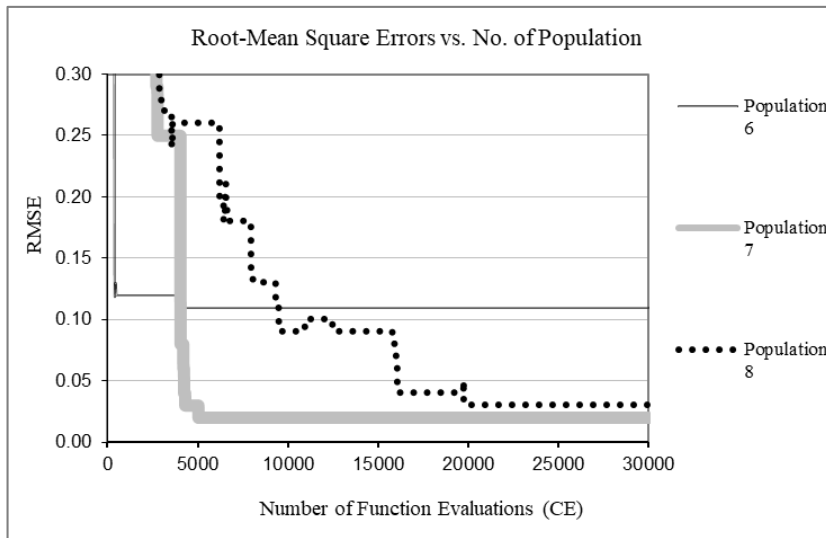
ผลวิเคราะห์: $E_1 = 3,002, E_2 = 666$ และ $E_3 = 50$ [MPa]

คำตอบแท้จริง: $E_1 = 3,000, E_2 = 666$ และ $E_3 = 50$ [MPa]

ทำให้สรุปได้ว่าผลวิเคราะห์มีความถูกต้องแม่นยำในเกณฑ์สูง มีเพียงค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ แอสฟัลต์คอนกรีตคลาดเคลื่อนไปเพียง 2 MPa ซึ่งไม่มีผลกระทบในการนำไปใช้งานออกแบบเลย โดยมีข้อสังเกตเพิ่มเติมว่าการลู่เข้าของค่าคำตอบยุติโดยประมาณที่ ค่า Function Evaluations = 20,000 แสดงว่าการทำงานหลังจากนั้นไม่เกิดประโยชน์เพิ่มเติม



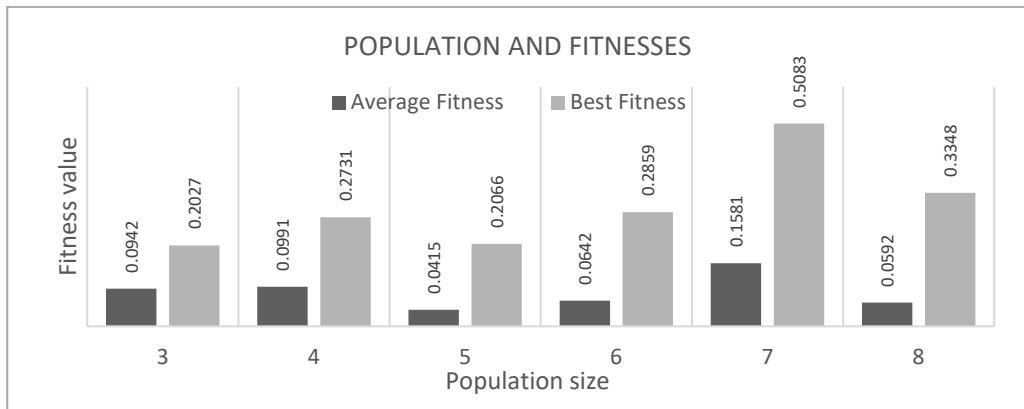
รูปที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนของกรณีประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 3, 4 และ 5



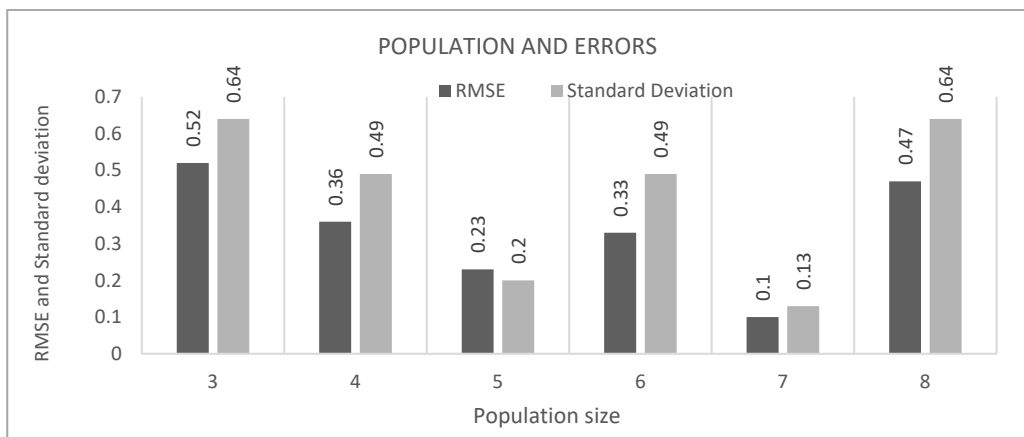
รูปที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนของกรณีประชากรเริ่มต้นเท่ากับ 6, 7 และ 8

4.3 ผลการวิเคราะห์ระดับ Limited

การวิเคราะห์ทั้งหมดในงานวิจัยนี้ เปิดใช้งานฟังก์ชัน Elitism ซึ่งเก็บชุดคำตอบโมดูลัสยัดหยุ่นที่ดีที่สุดไว้ตลอดเวลาและส่งต่อสู่รุ่นถัดไปโดยอัตโนมัติ ดังนั้นชุดคำตอบในรุ่นสุดท้ายจึงเป็นชุดคำตอบที่ดีที่สุดของการวิเคราะห์นั้นเสมอ โดยการนำชุดคำตอบที่ดีที่สุดของรุ่นสุดท้ายจากการวิเคราะห์ทั้งหมดจำนวน 10 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย ทำให้ได้ผลค่าเฉลี่ยของ Average Fitness และ Best Fitness ดังรูปที่ 5 ซึ่งพบว่าจำนวนประชากร=7 ยังคงมีประสิทธิภาพสูงสุด สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนที่แสดงในรูปที่ 6 ที่จำนวนประชากร=7 มีค่า RMSE โดยเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ 0.10 นอกจากนั้นยังมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเพียง 0.13 ซึ่งก็เป็นค่าที่ต่ำที่สุดอีกด้วย จึงสรุปได้อย่างชัดเจนว่าจำนวนประชากร=7 คือค่าที่ดีที่สุดในการใช้วิเคราะห์ประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ใช้พื้นทางดินซีเมนต์



รูปที่ 5 ค่า Fitness โดยเฉลี่ยและที่ดีที่สุดแยกตามขนาดจำนวนประชากร



รูปที่ 6 ค่า RMSE และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แยกตามขนาดจำนวนประชากร

โดยตารางที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ยทั้งหมดจากการวิเคราะห์จำนวน 10 รอบ พบว่าชุดคำตอบของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นชั้นทางมีความคลาดเคลื่อนจากคำตอบที่แท้จริงมากกว่า การวิเคราะห์ระดับเปิดกว้างแต่ยังคงแสดงแนวโน้มที่ชัดเจนของความถูกต้อง และมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยของผลวิเคราะห์จาก 10 ชุดที่ต่างกัน

No. of Pop.	Gen	Evaluation Function	Average Fitness	Best Fitness	Max. Error	RMSE	Standard Deviation	E1	E2	E3
3	1667	5001	0.0942	0.2027	-0.57	0.52	0.64	3471	634	50
4	1250	5000	0.0991	0.2731	0.36	0.36	0.49	3579	576	52
5	1000	5000	0.0415	0.2066	0.01	0.23	0.20	3942	581	68
6	834	5004	0.0642	0.2859	-0.43	0.33	0.49	3632	678	107
7	715	5005	0.1581	0.5083	-0.08	0.10	0.13	3488	644	121
8	625	5000	0.0592	0.3348	-0.66	0.47	0.64	3628	600	75

จากผลการวิเคราะห์ที่ดีที่สุดระดับจำกัด เมื่อใช้จำนวนประชากร 7 พบว่า ถึงแม้ว่าค่า RMSE จะมีค่าเท่ากับ 0.02 ซึ่งเท่ากับกรณีการวิเคราะห์ระดับเปิดกว้าง แต่เห็นได้ชัดว่าค่าโมดูลัสค่าตอบของชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต (E_1) มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าเล็กน้อย คือ 75 MPa ทั้งนี้น่าจะมีสาเหตุจากระบบการปิดเศษค่า RMSE ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของทั้ง 2 ชุดคำตอบมีค่าเท่ากัน

5. สรุปผล

จากผลการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้

วัสดุหลักที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้โดยเฉพาะดินลูกรัง มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกรมทางหลวง โดยค่า UCS ของดินซีเมนต์ที่อายุ 3 และ 7 วัน พัฒนากำลังเพิ่มขึ้นจึงใช้แบบจำลองคาดการณ์ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเพื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีชั้นทางยืดหยุ่นได้

การวิเคราะห์โครงสร้างที่ระดับเปิดกว้างแสดงว่าจำนวนประชากรขนาดเล็กมีประสิทธิภาพต่ำกว่าขนาดใหญ่กว่า ทั้งนี้จำนวนประชากรเท่ากับ 7 ให้คำตอบที่มีความถูกต้องสูงสุด แต่การวิเคราะห์ประมาณ 10,000 ครั้งสุดท้ายกลายเป็นข้อด้อยที่ใช้ระยะเวลานานขึ้น ในขณะที่การวิเคราะห์ที่ระดับจำกัดทำให้ได้คำตอบเร็วขึ้น 6 เท่าโดยประมาณ โดยจำนวนประชากรเท่ากับ 7 ยังคงให้คำตอบที่มีความถูกต้องสูงสุดด้วยค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุดอีกด้วย จึงสรุปได้ว่าเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกรณีศึกษา

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่อนุมัติงบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2560 ขอขอบคุณที่มอบศูนย์ความเป็นเลิศด้านโครงสร้างพื้นฐานและเทคโนโลยีท่าอากาศยาน (Center of Excellence for Infrastructure and Airport Technology) ที่ทำงานอย่างจริงจัง และขอขอบคุณหน่วยงานท้องถิ่นในจังหวัดฉะเชิงเทราที่อำนวยความสะดวกในการใช้สถานที่ ทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยนี้ได้อย่างต่อเนื่องและเสร็จสมบูรณ์

References

- [1] Department of Highways Thailand. Standard No. DH-S. 204/2556 Soil cement base. Road Standards; 2013. (In Thai)
- [2] Suntisakul J, et al. Microcracks to reduce reflective crack in soil cement road in Thailand. Department of Highway Thailand; 2007. (In Thai)
- [3] Jaritngam S. et al. Development of strength model of Lateritic soil-cement. Engineering Journal 2012;17(1):69-77.
- [4] Fwa TW, Rani TS. Seed modulus generation algorithm for backcalculation of flexible pavement moduli. Transportation Research Record 2005;1905:117-27.
- [5] Kameyama S, et al. Backcalculation of pavement layer moduli using genetic algorithms. Eighth International Conference on Asphalt Pavements; 1997 Aug 10-14; Seattle, Washington. 1998. p.1375-85.
- [6] Reddy MA, Murthy MS, Reddy KS, Pandey BB. Backcalculation of pavement layer moduli using genetic algorithms. Journal of Highway Research Board 2002;66:1-10.
- [7] Park HM; Park SW, Hwang JJ. Use of genetic algorithm and finite element method for backcalculating layer moduli in asphalt pavements. Transportation Research Record 2006; Report No. 07-2614.
- [8] Alkasawneh W. Backcalculation of pavement moduli using genetic algorithms [Dissertation]. Akron: The University of Akron; 2007.
- [9] Thongindam P. Enhancement of backcalculation techniques for assessing flexible pavement layer moduli using genetic algorithms [Dissertation]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz University of Hannover; 2009.

- [10] Thongindam P. Integrated pavement engineering for evaluation of Thai asphalt roads by the way of Life. Engineering Journal Siam University 2013;14(1):43-56 (In Thai)
- [11] Abu-Lebdeh G, Benekohal R. Convergence variability and population sizing in micro-genetic algorithms. Computer-Aided Civil Engineering and Infrastructure Engineering 1999;14:321-34.

ประวัติผู้เขียนบทความ



พุทธรพล ทองอินทร์ดำ ผู้ช่วยคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ และ หัวหน้าศูนย์ความเป็นเลิศด้านโครงสร้างพื้นฐานและเทคโนโลยีท่าอากาศยาน ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์สาขาวิศวกรรมขนส่ง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โทรศัพท์ 02-549-4446, E-mail: puttapon.t@en.rmutt.ac.th



ประกาศ ทองประไพ กรรมการบริหารศูนย์ความเป็นเลิศด้านโครงสร้างพื้นฐานและเทคโนโลยีท่าอากาศยาน ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีธัญบุรี หมายเลขโทรศัพท์ 0-2549-3410, E-mail: prakard.t@en.rmutt.ac.th

การปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการสั่งซื้อวัสดุก่อสร้างของบริษัท
ผู้รับเหมาก่อสร้างขนาดเล็ก

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE CONSTRUCTION MATERIALS
PROCUREMENT PROCESS OF SMALL CONTRACTORS

วารารณ ตาลประไพ¹ และ อภิชาติ ประสิทธิ์สม²

¹นักศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
1761 ถนนพัฒนาการ แขวง/เขต สวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250, tanprapai.war@outlook.com

²อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
1761 ถนนพัฒนาการ แขวง/เขต สวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250, apichart.w@outlook.com

Waraporn Tanprapai¹ and Apichart Prasitsom²

¹Student of Engineering in Civil Engineering Kasembundit University

1761 Pattanakarn Rd., Suanluang, Bangkok 10250 Thailand, tanprapai.war@outlook.com

²Lecturer of Engineering in Civil Engineering Kasembundit University

1761 Pattanakarn Rd., Suanluang, Bangkok 10250 Thailand, apichart.w@outlook.com

บทคัดย่อ

กระบวนการจัดซื้อวัสดุก่อสร้างมักประสบปัญหาการสั่งวัสดุผิดพลาดในบริษัทรับเหมาก่อสร้างขนาดเล็กจึงเป็นความสนใจศึกษากระบวนการจัดซื้อในบริษัทรับเหมาก่อสร้างขนาดเล็กเพื่อศึกษาปรับปรุงกระบวนการสั่งซื้อวัสดุก่อสร้างโดยใช้เครื่องมือคือแบบสอบถามโดยทำการสำรวจจากบริษัทรับเหมาก่อสร้างขนาดเล็ก ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 18 บริษัท (54 ตัวอย่าง) พบว่าสามารถจำแนกรูปแบบของกระบวนการจัดซื้อวัสดุก่อสร้างในปัจจุบันเป็น 3 รูปแบบ หลังจากนั้นจึงทำการวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการใหม่โดยใช้เทคนิคเดลฟาย ผลการศึกษาสามารถนำเสนอกระบวนการสั่งซื้อ 2 แนวทาง ได้แก่ แนวทางที่ 1 เหมาะสมกับผู้รับเหมาที่มีบุคลากร 10-50 คนและมีตำแหน่งงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดซื้อ 3-5 คน และแนวทางที่ 2 ที่เหมาะสมกับผู้รับเหมาที่มีบุคลากรน้อยกว่า 10 คนและมีตำแหน่งงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดซื้อ 1-3 ตำแหน่ง

คำสำคัญ: กระบวนการจัดซื้อ, จัดซื้อ, บริษัทรับเหมาก่อสร้าง

ABSTRACT

The procurement process of construction materials is often neglected. In small construction companies, it is of interest to study the purchasing process in small construction companies to improve the ordering process of construction materials using the questionnaire. Surveyed by small construction companies. In the Bangkok metropolitan area 18 companies (54 samples), it was found that 3 types of ordering materials could be classified as follows. Two approaches are available, guideline 1 for contractors with 10-50 employees and 3-5 positions for procurement processes, and option 2 for contractors with less staff. More than 10 people with positions related to purchasing process 1-3 positions.

KEYWORDS: procurement process, procurement, construction company

1. บทนำ

กระบวนการจัดซื้อจัดจ้างเป็นกระบวนการที่สำคัญในขั้นตอนการเตรียมงานก่อสร้าง เป็นกระบวนการที่จำเป็นมากในการควบคุมต้นทุนด้านปริมาณและด้านงบประมาณ เป็นกระบวนการที่ต้องใช้ทักษะ ความรู้ความสามารถเพื่อให้ได้มา เพื่อคุณภาพ ต้นทุน และเวลา ดังที่ Weele [1] ได้กล่าวเกี่ยวกับกระบวนการจัดซื้อว่า การจัดซื้อ คือ การบริหารจัดการแหล่งทรัพยากรภายนอกขององค์กร ได้แก่ สินค้า งานบริการ ความสามารถ และความรู้ ที่เป็นส่วนสำคัญในการดำเนินงาน และบริหารจัดการกิจกรรมหลักและกิจกรรมสนับสนุนเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด กระบวนการสั่งซื้อวัสดุก่อสร้างของแต่ละบริษัทผู้รับเหมาก่อสร้างล้วนมีความแตกต่างกันออกไปตามปัจจัยต่างๆ เช่น ขนาดขององค์กร จำนวนบุคลากร โครงสร้างองค์กร และแนวนโยบาย จากความแตกต่างกันของปัจจัยต่างๆ หากกระบวนการจัดซื้อเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือความผันแปรที่เกี่ยวกับวัสดุและอุปกรณ์ก่อสร้างเนื่องจากความผิดพลาดของกระบวนการสั่งซื้อวัสดุก่อสร้าง จะก่อให้เกิดผลกระทบต่องานก่อสร้างโดยทันที อาทิเช่น การวางแผนงานการจัดส่งวัสดุอุปกรณ์เข้าหน่วยงาน การก่อสร้างไม่ทันตามแผนงาน ภาวะการณ์ขาดแคลนวัสดุอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการก่อสร้างตามความต้องการของเจ้าของโครงการ ความล่าช้าในการจัดส่งของร้านค้า จำนวนวัสดุอุปกรณ์ที่จัดส่งให้ไม่เพียงพอกับปริมาณงานที่ต้องทำ ความไม่แน่นอนของราคาที่มีการเปลี่ยนแปลงในอัตราที่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว วัสดุอุปกรณ์ที่นำมาใช้มีคุณสมบัติที่ไม่ได้ตามมาตรฐาน โดยเหตุการณ์ทั้งหมดข้างต้นอาจนำมาซึ่งความเสียหายต่อเจ้าของโครงการหรือเจ้าของอาคารได้ จากที่กล่าวมาจึงเป็นความสนใจศึกษากระบวนการจัดซื้อในบริษัทผู้รับเหมาก่อสร้างขนาดเล็ก โดยทำการศึกษากระบวนการสั่งซื้อวัสดุก่อสร้างและปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการจัดซื้อของบริษัทผู้รับเหมาก่อสร้างขนาดเล็ก เพื่อนำมาวิเคราะห์เสนอเป็นแนวทางกระบวนการสั่งซื้อวัสดุก่อสร้าง ของบริษัทผู้รับเหมาก่อสร้าง

ขนาดเล็กสำหรับผู้สนใจปรับเปลี่ยนกระบวนการที่เหมาะสมกับองค์กร หรือที่กำลังจะจัดตั้งบริษัท รับเหมาก่อสร้างขนาดเล็ก รวมถึงการทำสถิติเพื่อบ่งชี้ปัจจัยเสี่ยงที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดของ กระบวนการจัดซื้อ

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษากระบวนการจัดซื้อของบริษัทรับเหมาก่อสร้างขนาดเล็กพร้อมวิเคราะห์ ข้อดี ข้อเสีย ของกระบวนการแต่ละรูปแบบและออกแบบกระบวนการสั่งซื้อรูปแบบใหม่เพื่อเป็นแนวทางแก้ไข ปัญหาจากกระบวนการสั่งซื้อเดิมโดยขอบเขตการศึกษาภายใต้หัวข้อ การปรับปรุงประสิทธิภาพ ของกระบวนการสั่งซื้อวัสดุก่อสร้าง ของบริษัทผู้รับเหมาก่อสร้างขนาดเล็กนี้ คือทำการศึกษา เฉพาะ กลุ่มตัวอย่างบริษัทผู้รับเหมาก่อสร้างขนาดเล็ก ที่รับงานโครงการก่อสร้างที่มีมูลค่าสัญญา โครงการอยู่ระหว่าง 50 ล้านบาท ถึง 400 ล้านบาท และมีบุคลากรภายในบริษัทไม่เกิน 50 คนและ ทำการศึกษาจากบริษัทรับเหมาก่อสร้างขนาดเล็กจำนวน 18 บริษัท บริษัทละ 3 ตัวอย่าง ซึ่งตั้งอยู่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

3. แนวคิดทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 จัดซื้อ

Leenders M, Johnson PF, Flynn A, Fearon H [2] ได้กล่าวถึงความหมายของจัดซื้อจัดหา เป็นกระบวนการโดยการศึกษาความต้องการหาแหล่งซื้อและคัดเลือกผู้ส่งมอบ เปรียบเทียบราคา และเงื่อนไขให้ตรงกับความต้องการรวมถึงติดตามการจัดส่งสินค้าเพื่อให้ได้สินค้าที่ตรงเวลาและ ติดตามการชำระค่าสินค้าหรือบริการให้กับผู้ส่งมอบ ทวีศักดิ์ เทพพิทักษ์ [3] ได้กล่าวถึงความหมาย ของการจัดซื้อจัดหาว่า เป็นกิจกรรมที่มีขอบเขตกว้างกว่า กระบวนการจัดซื้อ ซึ่งครอบคลุมการ จัดการพัสดุของสินค้าและบริการเพื่อให้ได้สินค้าและบริการที่เป็นไปตามข้อกำหนด วิทยา สุฤทธิ ดำรง [4] ได้กล่าวถึงความหมายของการจัดซื้อจัดหาว่า เป็นส่วนที่เชื่อมต่อการปฏิบัติงานระหว่างผู้ จัดส่งวัตถุดิบและการดำเนินงานของระบบองค์กร การจัดซื้อจึงเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการ ปฏิบัติงาน ที่สอดคล้องประสานกันต่อเป้าหมายการดำเนินงานโดยรวมขององค์กร

3.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธิดา แก่นจันทร์ [5] ศึกษาสภาพปัจจุบันของการจัดซื้อจัดหาวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วน อุปกรณ์ยานยนต์ กรณีศึกษา บริษัท เอสเค ออโต้ อินทีเรีย จำกัด เพื่อทำการสร้างรูปแบบการ จัดซื้อจัดหาที่เหมาะสมกับองค์กร โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลการสั่งซื้อวัตถุดิบภายในองค์กร ย้อนหลังเป็นเวลา 1 ปี เพื่อศึกษารูปแบบการจัดซื้อในปัจจุบัน พบว่ามี 3 รูปแบบที่เหมาะสมกับองค์กร

คือ 1.การให้ความสำคัญกับวัตถุประสงค์โดยแบ่งวัตถุประสงค์ออกเป็นกลุ่ม 2.การกำหนดเวลาการรับวัตถุประสงค์ 3.การกำหนดจุดสั่งซื้อใหม่ แจ่มจิต ศรีวงษ์ [6] ศึกษาการจัดซื้อจัดหาวัสดุด้วยการจัดแบ่งกลุ่ม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุน กรณีศึกษา บริษัท ผู้ผลิตแก้วจำกัด ผู้ศึกษาได้ใช้แผนผังก้างปลาในการแก้ปัญหาและแนวทางแก้ไข ผลการวิเคราะห์พบว่าบริษัทที่เป็นกรณีศึกษานี้รูปแบบการจัดซื้อจัดหาในปัจจุบันไม่ได้มีการควบคุมการใช้งาน ไม่มีการจดบันทึกข้อมูลสินค้าคงคลัง ขาดการวางแผนการจัดซื้อสินค้า จากปัญหาดังกล่าวผู้ศึกษาได้ใช้เครื่องมือการจัดการและกลยุทธ์ทางการจัดซื้อแก้ไขปัญหา โดยการใช้ทฤษฎี ABC Analysis ทำให้สามารถบริหารงานด้านจัดซื้อได้อย่างชัดเจนว่าสินค้าแต่ละกลุ่มควรบริหารอย่างไรและมีกำหนดวิธีการและขั้นตอนในกระบวนการจัดซื้อจัดหาใหม่ซึ่งสามารถวัดประสิทธิภาพด้วยการลดระยะเวลาการออกเอกสารใบสั่งซื้อได้ถึง 83.29 ชั่วโมง และลดต้นทุนการสั่งซื้อได้ 1,580,792.92 บาท

4. ระเบียบวิธีวิจัย

แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

4.1 การเลือกกลุ่มตัวอย่าง การจำแนกประชากร การแบ่งกลุ่ม

การปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการสั่งซื้อวัสดุก่อสร้าง ของบริษัทผู้รับเหมาก่อสร้างขนาดเล็ก ในการศึกษาครั้งนี้ จะเลือกกลุ่มตัวอย่างบริษัทรับเหมาก่อสร้างขนาดเล็ก โดยมีตัวชี้วัดจากจำนวนพนักงานที่มีจำนวนไม่น้อยกว่า 10 คนแต่ไม่เกิน 50 คน ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล และทำการเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างเป็นจำนวน 54 ตัวอย่างจาก 18 บริษัท

4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

แบบสอบถาม (Questionnaire) แบ่งออกเป็น 2 ส่วน เพื่อสำรวจกระบวนการจัดซื้อของกลุ่มตัวอย่างในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล โดยส่วนที่ 1 เป็นข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ได้แก่ เพศ อายุ ระดับการศึกษา ตำแหน่งหน้าที่ ประสบการณ์ทำงาน และส่วนที่ 2 เป็นแบบสอบถามเปิดถามเกี่ยวกับกระบวนการสั่งซื้อในปัจจุบัน รวมถึงปัญหาและอุปสรรคในกระบวนการสั่งซื้อ

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

จากแบบสอบถามที่ได้รับกลับมา ทำการวิเคราะห์โดยเทคนิคเดลฟาย (Delphi method) [7] โดยทำการรวบรวมกระบวนการจัดซื้อทุกรูปแบบและทำสถิติการยอมรับข้อดีและข้อเสียจากกลุ่มตัวอย่าง จากนั้นนำมาปรับแก้ไขกระบวนการแล้วนำกลับไปสอบถามกลุ่มตัวอย่างเดิมซ้ำและทำ

สถิติแบบเดิมอีกครั้ง ทำซ้ำจนกว่ากลุ่มตัวอย่างจะยอมรับข้อเสียได้ไม่เกินร้อยละ 30 ของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด

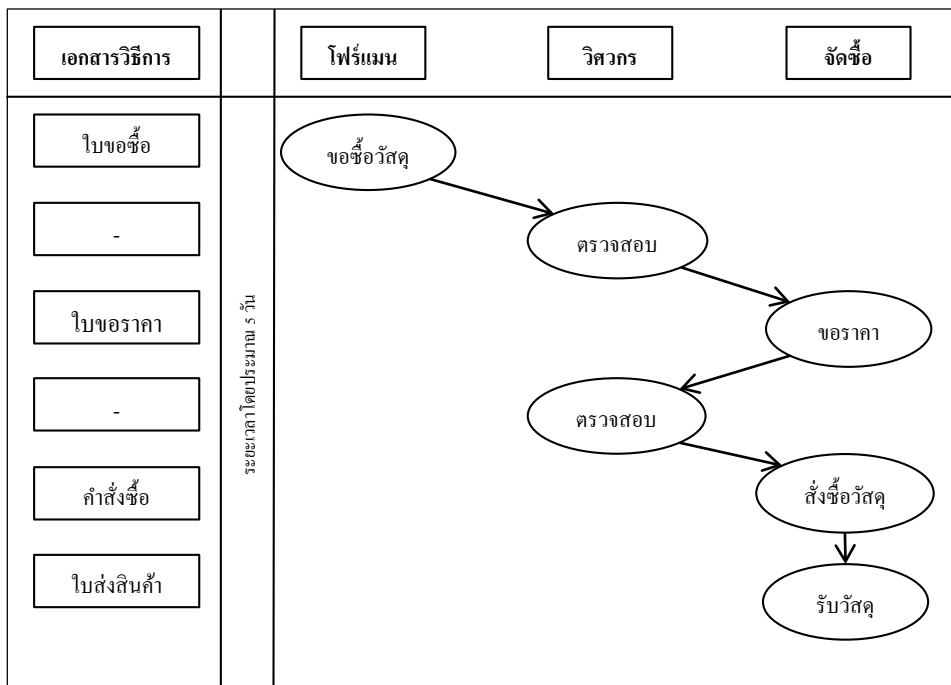
5. ผลการศึกษา

5.1 กระบวนการจัดซื้อที่ได้จากการสำรวจ

จากการสำรวจข้อมูลพบรูปแบบกระบวนการจัดซื้อทั้งหมด 3 รูปแบบ ดังนี้

5.1.1 กระบวนการจัดซื้อที่พบในแบบสำรวจ รูปแบบที่ 1

รูปแบบที่ 1 กระบวนการจัดซื้อจาก 8 ใน 18 บริษัท (24 ตัวอย่าง) ซึ่งมีลักษณะบริษัทที่มีบุคลากร 10-50 คนและภายในบริษัท มีตำแหน่งงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดซื้อ 3-5 ตำแหน่ง ได้ให้คำตอบกระบวนการจัดซื้อว่า บุคลากรจากหน่วยงานวิศวกรรมและโปรแกรมสามารถทำการขอซื้อโดยส่งคำขอซื้อให้วิศวกรสำรวจปริมาณตรวจสอบปริมาณงานแล้วจึงส่งให้จัดซื้อทำการขอราคาแล้วส่งกลับวิศวกรสำรวจปริมาณงานตรวจสอบงบประมาณอีกครั้งจัดซื้อจึงออกคำสั่งซื้อ (Purchase Order) ให้ทางร้านค้าแล้วร้านค้าจึงทำการส่งของ จากข้อความดังกล่าวสามารถเขียนแผนผังเป็นกระบวนการสั่งซื้อดังรูปที่ 1

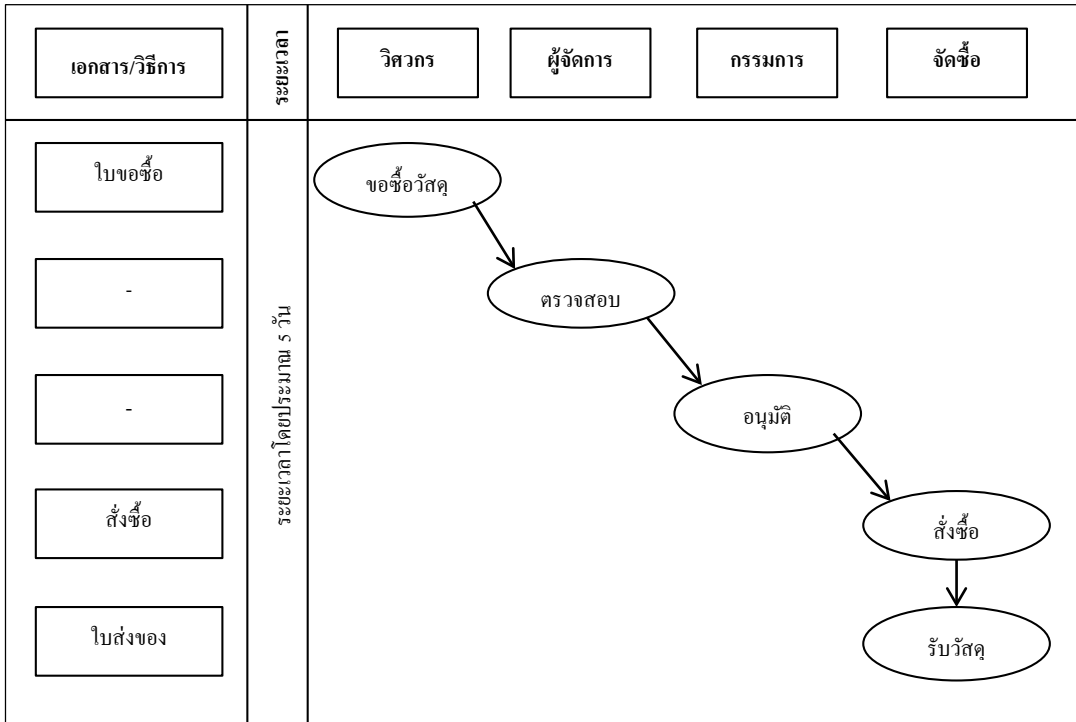


รูปที่ 1 แผนภาพประกอบรูปแบบกระบวนการจัดซื้อรูปแบบที่ 1

จากแผนภาพกระบวนการจัดซื้อรูปแบบที่ 1 จำนวนกลุ่มตัวอย่าง 24 คนมีอัตราความคิดเห็นในด้านข้อดีคือ 1) มีการแบ่งขอบเขตการรับผิดชอบอย่างชัดเจน จากกลุ่มตัวอย่างเห็นด้วย 16 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 66.67 และไม่เห็นด้วยจำนวน 8 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 33.33 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง 2) มีการตรวจสอบหลายชั้นตอนช่วยลดความผิดพลาดในกระบวนการจัดซื้อ จากกลุ่มตัวอย่างเห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 20 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 83.33 และไม่เห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 4 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 16.67 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง และมีอัตราความคิดเห็นด้านข้อเสีย เป็นดังนี้ คือ 1) เวลาในกระบวนการจัดซื้อมีเวลานาน จากกลุ่มตัวอย่างที่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้มีจำนวน 17 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 70.83 และไม่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้จำนวน 7 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 29.67 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 2) คนที่ทำหน้าที่ส่งวัสดุไม่มีส่วนร่วมในการตรวจสอบอีก จากกลุ่มตัวอย่างที่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้มีจำนวน 19 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 79.17 และไม่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้จำนวน 5 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 20.83 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 3) มีตำแหน่งที่สามารถทำการสั่งซื้อได้มากกว่า 1 ตำแหน่งทำให้เกิดความซ้ำซ้อนในการส่งวัสดุ จากกลุ่มตัวอย่างที่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้มีจำนวน 15 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 62.50 และไม่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้จำนวน 9 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 37.50 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 4) ไม่มีเอกสารควบคุมในทุกขั้นตอน จากกลุ่มตัวอย่างที่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้มีจำนวน 12 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 50 และไม่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้จำนวน 12 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 50 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด ซึ่งยังมีข้อเสียบางประการที่ยังไม่สามารถยอมรับได้มากกว่าร้อยละ 30 จึงต้องทำการปรับแก้เป็นแนวทางกระบวนการจัดซื้อใหม่

5.1.2 กระบวนการจัดซื้อที่พบในแบบสำรวจ รูปแบบที่ 2

รูปแบบที่ 2 กระบวนการจัดซื้อจาก 6 ใน 18 บริษัท (18 ตัวอย่าง) บริษัทซึ่งมีลักษณะบริษัทที่มีบุคลากร 10-50 คนและภายในบริษัท มีตำแหน่งงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดซื้อ 3-5 ตำแหน่ง ให้คำตอบกระบวนการจัดซื้อว่า วิศวกรสนามทำการขอซื้อโดยส่งคำขอซื้อให้ผู้จัดการโครงการตรวจสอบหลังจากนั้นจัดส่งให้กรรมการผู้จัดการอนุมัติซื้อแล้วจึงจัดซื้อจึงออกคำสั่งซื้อ (Purchase Order) ให้ทางร้านค้าแล้วร้านค้าจึงทำการส่งของ จากข้อความดังกล่าวสามารถเขียนแผนผังเป็นกระบวนการสั่งซื้อดังรูปที่ 2



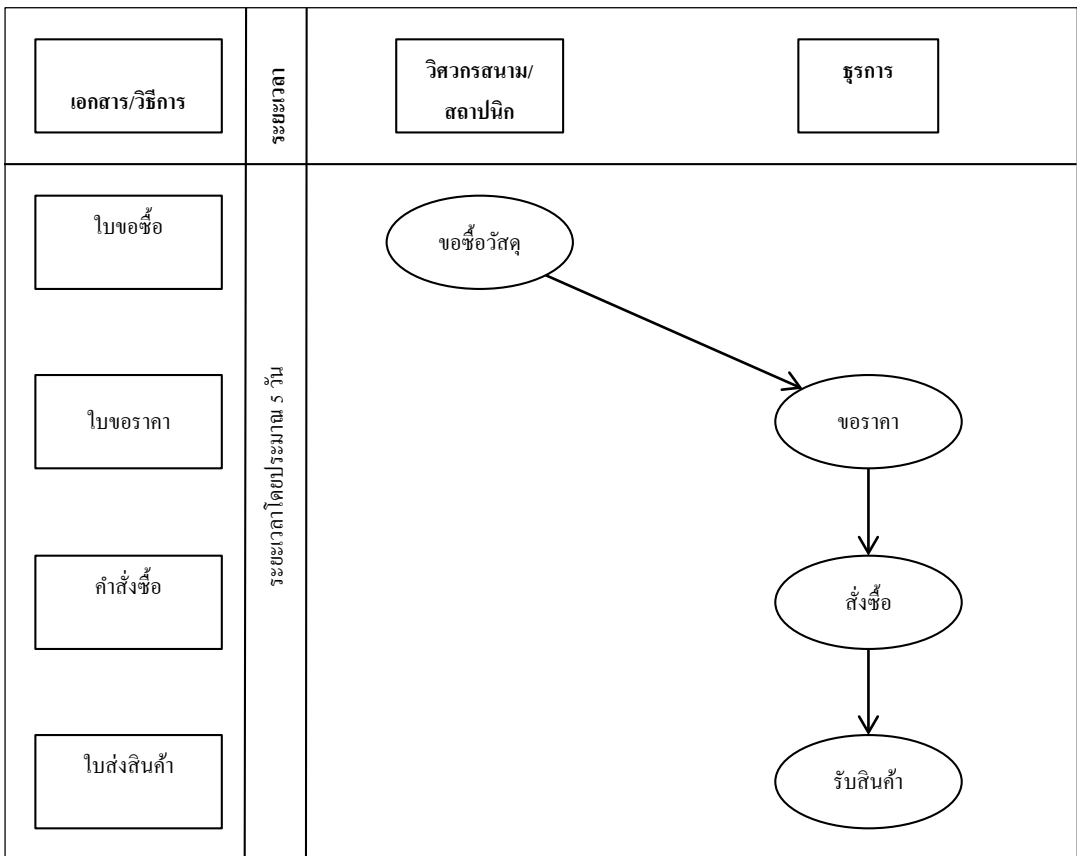
รูปที่ 2 แผนภาพประกอบรูปแบบกระบวนการจัดซื้อรูปแบบที่ 2

จากแผนภาพกระบวนการจัดซื้อรูปแบบที่ 2 จำนวนกลุ่มตัวอย่าง 18 คน มีอัตราความคิดเห็นในด้านข้อดีคือ 1) มีการแบ่งขอบเขตการรับผิดชอบอย่างชัดเจน จากกลุ่มตัวอย่างเห็นด้วย 12 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 66.67 และไม่เห็นด้วยจำนวน 6 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 33.33 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง 2) มีการตรวจสอบหลายขั้นตอนช่วยลดความผิดพลาดในกระบวนการจัดซื้อ จากกลุ่มตัวอย่างเห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 14 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 77.78 และไม่เห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 4 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 22.22 ตัวอย่าง 3) มีการสั่งวัสดุจากบุคคลเพียงตำแหน่งเดียวสามารถลดความซ้ำซ้อน จากกลุ่มตัวอย่างเห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 12 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 66.67 และไม่เห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 6 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 33.33 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง และมีอัตราความคิดเห็นด้านข้อเสีย เป็นดังนี้ คือ 1) เวลาในกระบวนการจัดซื้อมีเวลานาน จากกลุ่มตัวอย่างที่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้มีจำนวน 13 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 72.22 และไม่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้จำนวน 5 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 27.78 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 2) คนที่ทำหน้าที่สั่งวัสดุไม่มีส่วนร่วมในการตรวจสอบอีก จากกลุ่มตัวอย่างที่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้มีจำนวน 17 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 94.44 และไม่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้จำนวน 1 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 5.56 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 3) ไม่มีการขอราคาและข้อมูลวัสดุทำให้ยากต่อการควบคุมต้นทุน จากกลุ่มตัวอย่างที่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้มีจำนวน 5 คน หรือคิดเป็นร้อยละ

27.78 และไม่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้จำนวน 13 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 72.22 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 4) ไม่มีเอกสารควบคุมในทุกขั้นตอน จากกลุ่มตัวอย่างที่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้มีจำนวน 9 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 50 และไม่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้จำนวน 9 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 50 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด ซึ่งยังมีข้อเสียบางประการที่ยังไม่สามารถยอมรับได้มากกว่าร้อยละ 30 จึงต้องทำการปรับแก้เป็นแนวทางกระบวนการจัดซื้อใหม่

5.1.3 กระบวนการจัดซื้อที่พบในแบบสำรวจ รูปแบบที่ 3

รูปแบบที่ 3 กระบวนการจัดซื้อจาก 4 ใน 18 บริษัท(12 ตัวอย่าง) บริษัทซึ่งมีลักษณะบริษัทที่มีบุคลากร น้อยกว่า 10 คนและภายในบริษัท มีตำแหน่งงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดซื้อ 1-3 ตำแหน่งได้ ให้คำตอบกระบวนการจัดซื้อว่า สถาปนิกหรือวิศวกรสนามเป็นผู้สั่งสินค้า ให้ธุรการดำเนินการออกเอกสารคำสั่งซื้อ (Purchase Order) ให้กับร้านค้า จากข้อความดังกล่าวสามารถเขียนแผนผังเป็นกระบวนการสั่งซื้อดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพประกอบรูปแบบกระบวนการจัดซื้อรูปแบบที่ 3

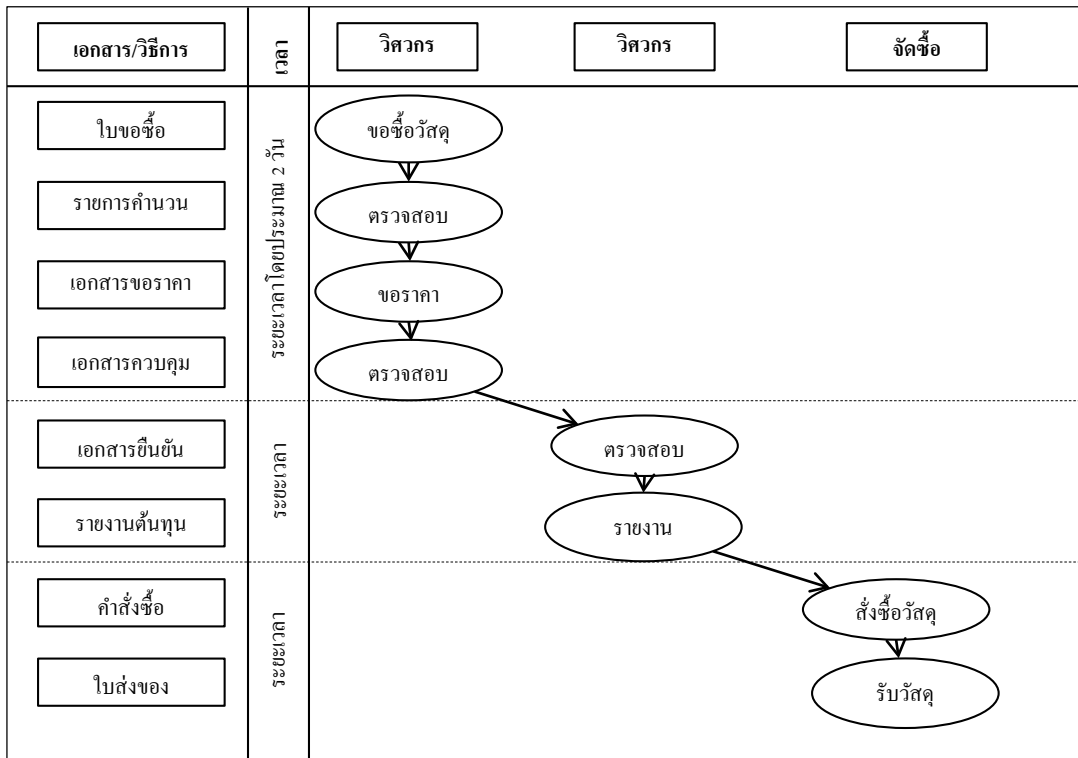
จากแผนภาพกระบวนการจัดซื้อรูปแบบที่ 3 จำนวนกลุ่มตัวอย่าง 12 คนมีอัตราความคิดเห็นในด้านข้อดีคือ 1) มีขั้นตอนการจัดซื้อน้อยลดเวลาของกระบวนการ จากกลุ่มตัวอย่างเห็นด้วย 8 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 66.67 และไม่เห็นด้วยจำนวน 4 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 33.33 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง 2) ใช้บุคลากรน้อย จากกลุ่มตัวอย่างเห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 10 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 83.33 และไม่เห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 2 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 16.67 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง และมีอัตราความคิดเห็นด้านข้อเสีย เป็นดังนี้ คือ 1) ไม่มีการตรวจสอบปริมาณและข้อคุณสมบัติ จากกลุ่มตัวอย่างที่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้มีจำนวน 7 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 58.33 และไม่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้จำนวน 5 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 41.67 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง 2) ไม่มีการตรวจสอบงบประมาณ จากกลุ่มตัวอย่างที่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้มีจำนวน 9 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 75 และไม่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้จำนวน 3 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 25 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง 3) การขาดความรู้ความสามารถเฉพาะทางด้านวัสดุของบุคลากร จากกลุ่มตัวอย่างที่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้มีจำนวน 2 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 16.67 และไม่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้จำนวน 10 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 83.33 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่างซึ่งยังมีข้อเสียบางประการที่ยังไม่สามารถยอมรับได้มากกว่าร้อยละ 30 จึงต้องทำการปรับแก้เป็นแนวทางกระบวนการจัดซื้อใหม่

5.2 กระบวนการจัดซื้อที่ได้จากการวิเคราะห์เพื่อนำเสนอแนวทาง

จากการวิเคราะห์รูปแบบกระบวนการจัดซื้อจากแบบสอบถามทั้งหมด 3 รูปแบบ สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างรูปแบบกระบวนการจัดซื้อเพื่อเป็นแนวทาง 2 แนวทาง ดังนี้

5.2.1 กระบวนการจัดซื้อแนวทางที่ 1

แนวทางที่ 1 ซึ่งเป็นแนวทางเหมาะสมกับบริษัทที่มีบุคลากร 10-50 คนและภายในบริษัท มีตำแหน่งงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดซื้อ 3-5 (ตรงตามคุณลักษณะกระบวนการจัดซื้อรูปแบบที่ 1 และ 2) กำหนดให้หน่วยงานมีวิศวกรสำนักงานสนามเพื่อให้วิศวกรสำนักงานสนามตรวจสอบข้อคุณสมบัติของวัสดุตามที่เจ้าของโครงการกำหนด ตรวจสอบปริมาณ จัดหาแหล่งวัสดุรวมถึงขอราคาวัสดุ เพื่อตรวจสอบงบประมาณ หลังจากนั้นส่งเอกสารขอซื้อเข้าทางวิศวกรตรวจสอบปริมาณ เพื่อตรวจสอบปริมาณและงบประมาณอีกครั้งหนึ่งเพื่อป้องกันความผิดพลาด แล้วจึงส่งให้ทางฝ่ายจัดซื้อดำเนินการออกคำสั่งซื้อและติดตามวัสดุเข้าโครงการต่อไป จากข้อความดังกล่าวสามารถเขียนแผนผังเป็นกระบวนการสั่งซื้อดังรูปที่ 4



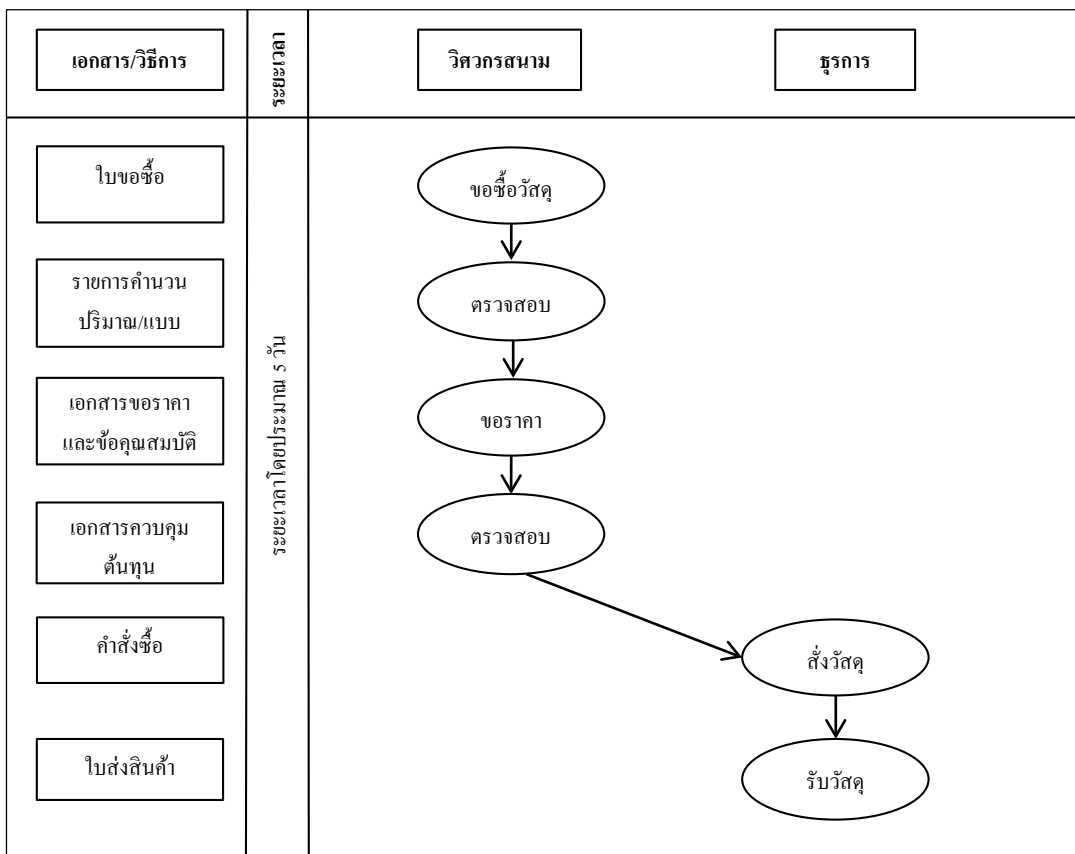
รูปที่ 4 แผนภาพประกอบรูปแบบกระบวนการจัดซื้อแนวทางที่ 1

จากแผนภาพกระบวนการจัดซื้อแนวทางที่ 1 จำนวนกลุ่มตัวอย่าง 42 คนมีอัตราความคิดเห็นในด้านข้อดีคือ 1) มีการแบ่งขอบเขตการรับผิดชอบอย่างชัดเจน จากกลุ่มตัวอย่างเห็นด้วย 37 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 88.10 และไม่เห็นด้วยจำนวน 5 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 11.90 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง 2) มีการตรวจสอบหลายชั้นตอนช่วยลดความผิดพลาดในกระบวนการจัดซื้อ จากกลุ่มตัวอย่างเห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 36 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 85.71 และไม่เห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 6 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 4.76 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง 3) มีขอบเขตการดำเนินงานอย่างชัดเจน จากกลุ่มตัวอย่างเห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 37 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 88.10 และไม่เห็นด้วยจำนวน 5 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 11.90 จากกลุ่มตัวอย่าง 4) มีเพียงตำแหน่งเดียวที่สามารถสั่งสินค้าได้ทำให้ลดความซ้ำซ้อนของการสั่งวัสดุ จากกลุ่มตัวอย่างเห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 39 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 92.86 และไม่เห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 3 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 7.14 จากจากกลุ่มตัวอย่าง และมีอัตราความคิดเห็นด้านข้อเสีย เป็นดังนี้ คือ 1) คนที่ทำหน้าที่สั่งวัสดุไม่มีส่วนร่วมในการตรวจสอบอีก จากกลุ่มตัวอย่างที่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้มีจำนวน 35 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 83.33 และไม่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้จำนวน 7 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 16.67 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง 2) วิศวกรสำนักงานสนามมีหน้าที่หลายอย่างอาจเกิดทัศนคติที่ไม่ดีในการ

ทำงาน จากกลุ่มตัวอย่างที่สามารถ ยอมรับข้อเสียนี้ได้ มีจำนวน 38 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 90.48 และไม่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้จำนวน 4 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 9.52 จากแผนภาพดังกล่าว มีการไม่ยอมรับข้อเสียของกระบวนการน้อยกว่าร้อยละ 30 ถือว่ากระบวนการนี้เป็นที่ยอมรับในบริษัทรับเหมาก่อสร้างขนาดเล็กที่เป็นตัวอย่างที่เป็นกลุ่มตัวอย่าง

5.2.2 กระบวนการจัดซื้อแนวทางที่ 2

แนวทางที่ 2 ซึ่งเป็นแนวทางเหมาะสมกับบริษัทที่มีบุคลากร ซึ่งมีลักษณะบริษัทที่มีบุคลากรน้อยกว่า 10 คนและภายในบริษัท มีตำแหน่งงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดซื้อ 1-3 ตำแหน่ง วิศวกรสนามหรือสถาปนิกตรวจสอบข้อคุณสมบัติของวัสดุตามที่เจ้าของโครงการกำหนด ตรวจสอบปริมาณ จัดหาแหล่งวัสดุรวมถึงขอราคาวัสดุ เพื่อตรวจสอบงบประมาณ เพื่อจัดส่งเอกสารต่างๆให้ธุรการดำเนินการออกเอกสารคำสั่งซื้อและติดตามการส่งวัสดุต่อไป จากข้อความดังกล่าวสามารถเขียนแผนผังเป็นกระบวนการสั่งซื้อดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพประกอบรูปแบบกระบวนการจัดซื้อแนวทางที่ 2

จากแผนภาพกระบวนการจัดซื้อแนวทางที่ 2 จำนวนกลุ่มตัวอย่าง 12 คน มีอัตราความคิดเห็นในด้านข้อดีคือ 1) มีขั้นตอนการจัดซื้อน้อยลดเวลาของกระบวนการ จากกลุ่มตัวอย่างเห็นด้วย 8 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 66.67 และไม่เห็นด้วยจำนวน 4 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 33.33 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง 2) ใช้บุคลากรน้อย จากกลุ่มตัวอย่างเห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 10 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 83.33 และไม่เห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 2 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 16.67 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง 3) มีเอกสารควบคุมทุกขั้นตอนจากกลุ่มตัวอย่างเห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 10 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 83.33 และไม่เห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 2 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 16.67 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง 4) มีกระบวนการตรวจสอบจากกลุ่มตัวอย่างเห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 9 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 75 และไม่เห็นด้วยกับข้อดีนี้จำนวน 3 คนหรือคิดเป็นร้อยละ 25 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง และมีอัตราความคิดเห็นด้านข้อเสีย เป็นดังนี้ คือ 1) วิศวกรมีหน้าที่หลากหลายอาจก่อทัศนคติที่ไม่ดีในการทำงาน จากกลุ่มตัวอย่างที่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้มีจำนวน 11 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 91.67 และไม่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้จำนวน 1 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 8.33 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง 2) ไม่มีการตรวจสอบปริมาณและข้อคุณสมบัติ จากกลุ่มตัวอย่างที่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้มีจำนวน 9 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 75 และไม่สามารถยอมรับข้อเสียนี้ได้จำนวน 3 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 25 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง จากแผนภาพดังกล่าว มีการไม่ยอมรับข้อเสียของกระบวนการน้อยกว่าร้อยละ 30 ถือว่ากระบวนการนี้เป็นที่ยอมรับในบริษัทรับเหมาก่อสร้างขนาดเล็กที่เป็นตัวอย่างที่เป็นกลุ่มตัวอย่าง

6. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพบว่ากระบวนการจัดซื้อจาก 18 บริษัท มี 3 รูปแบบดังนี้ รูปแบบที่ 1 กระบวนการจัดซื้อจาก 8 ใน 18 บริษัทซึ่งมีลักษณะบริษัทที่มีบุคลากร 10-50 คนและภายในบริษัทมีตำแหน่งงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดซื้อ 3-5 ตำแหน่งได้ให้คำตอบกระบวนการจัดซื้อว่า บุคลากรจากหน่วยงานวิศวกรสนามและโพรแมนสามารถทำการขอซื้อโดยส่งคำขอซื้อให้วิศวกรสำรวจปริมาณตรวจสอบปริมาณงานแล้วจึงส่งให้จัดซื้อทำการขอราคาแล้วส่งกลับวิศวกรสำรวจปริมาณงานตรวจสอบงบประมาณอีกครั้งจัดซื้อจึงออกคำสั่งซื้อให้ทางร้านค้าแล้วร้านค้าจึงทำการส่งของ รูปแบบที่ 2 กระบวนการจัดซื้อจาก 6 ใน 18 บริษัทซึ่งมีลักษณะบริษัทที่มีบุคลากร 10-50 คนและภายในบริษัท มีตำแหน่งงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดซื้อ 3-5 ตำแหน่ง ให้คำตอบกระบวนการจัดซื้อว่า วิศวกรสนามทำการขอซื้อโดยส่งคำขอซื้อให้ผู้จัดการโครงการตรวจสอบหลังจากนั้นจัดส่งให้กรรมการผู้จัดการอนุมัติซื้อแล้วจึงจัดซื้อจึงออกคำสั่งซื้อให้ทางร้านค้าแล้วร้านค้าจึงทำการส่งของ รูปแบบที่ 3 กระบวนการจัดซื้อจาก 4 ใน 18 บริษัทซึ่งมีลักษณะบริษัทที่มีบุคลากร น้อยกว่า 10 คนและภายในบริษัท มีตำแหน่งงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดซื้อ 1-3 ตำแหน่งได้ ให้คำตอบกระบวนการจัดซื้อว่า สถาปนิกหรือวิศวกรสนามเป็นผู้สั่งสินค้า ให้ธุรการ

ดำเนินการออกเอกสารคำสั่งซื้อให้กับร้านค้า จากรูปแบบทั้งหมดนี้ วิเคราะห์ด้วยเทคนิคเดลฟาย (delphi) จะได้กระบวนการจัดซื้อที่เป็นแนวทาง 2 แนวทาง คือ แนวทางที่ 1 ซึ่งเป็นแนวทางเหมาะสมกับบริษัทที่มีบุคลากร 10-50 คนและภายในบริษัท มีตำแหน่งงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดซื้อ 3-5 (ตรงตามคุณลักษณะกระบวนการจัดซื้อรูปแบบที่ 1 และ 2) กำหนดให้หน่วยงานมีวิศวกรสำนักงานสนามเพื่อให้วิศวกรสนามตรวจสอบข้อคุณสมบัติของวัสดุตามที่เจ้าของโครงการกำหนด ตรวจสอบปริมาณ จัดหาแหล่งวัสดุรวมถึงขอราคาวัสดุ เพื่อตรวจสอบงบประมาณ หลังจากนั้นส่งเอกสารขอซื้อเข้าทางวิศวกรตรวจสอบปริมาณเพื่อตรวจสอบปริมาณและงบประมาณอีกครั้งหนึ่งเพื่อป้องกันความผิดพลาด แล้วจึงส่งให้ทางฝ่ายจัดซื้อดำเนินการออกคำสั่งซื้อและติดตามวัสดุเข้าโครงการต่อไป แนวทางที่ 2 ซึ่งเป็นแนวทางเหมาะสมกับบริษัทที่มีบุคลากร ซึ่งมีลักษณะบริษัทที่มีบุคลากร น้อยกว่า 10 คนและภายในบริษัท มีตำแหน่งงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดซื้อ 1-3 ตำแหน่ง วิศวกรสนามหรือสถาปนิกตรวจสอบข้อคุณสมบัติของวัสดุตามที่เจ้าของโครงการกำหนด ตรวจสอบปริมาณ จัดหาแหล่งวัสดุรวมถึงขอราคาวัสดุ เพื่อตรวจสอบงบประมาณ เพื่อจัดส่งเอกสารต่าง ๆ ให้ธุรการดำเนินการออกเอกสารคำสั่งซื้อและติดตามการส่งวัสดุต่อไป ซึ่งกระบวนการที่เป็นแนวทางนี้ได้ผ่านการยอมรับข้อเสีย มากกว่าร้อยละ 70 จึงเลือกใช้รูปแบบการจัดซื้อรูปแบบที่ 1 เปรียบเทียบกับกระบวนการจัดซื้อแนวทางที่ 1 ไปประยุกต์ใช้จริงเป็นเวลา 1 เดือนพบว่า กระบวนการจัดซื้อเดิม (รูปแบบที่ 1) ในการส่งวัสดุ 16 ครั้งของอาคาร A นั้นมีความเสียหายที่สามารถคำนวณเป็นเงินได้จำนวน 236,320.00 บาท ความเสียหายเป็นวันจำนวน 22 วัน และกระบวนการจัดซื้อแนวทางที่ 1 ในการส่งวัสดุ 16 ครั้งของอาคาร B นั้นมีความเสียหายที่สามารถคำนวณเป็นเงินได้จำนวน 26,895.00 บาท และความเสียหายเป็นวันจำนวน 14 วัน

References

- [1] Weele, van AJ. Purchasing and supply chain management: analysis, strategy, planning and practice. 4th ed. ed. London: Thomson Learning, 2005.
- [2] Leenders M, Johnson PF, Flynn A, Fearon H. Purchasing and supply management with 50 supply chain cases. 13th ed. Singapore: McGraw-Hill; 2006.
- [3] Taweesak Theppitak. Logistics and supply chain management. Bangkok: Expernetbooks; 2007. (In Thai)
- [4] Wittaya Suharitdamrong. Supply chain management. Bangkok: Pearson Education Indochina; 2003. (In Thai)
- [5] Tida Kaenchan. Study on the current state of procurement of raw materials used in the manufacture of parts automotive equipment case study: SK Auto Interior Co., Ltd.

- [Master of Industrial Management]. Bangkok: King Mongkut's University of Technology North Bangkok; 2009. (In Thai)
- [6] Jamjit Sriwong. Purchasing method by product classification in order to increasing efficiency and cost reduction case study: glass manufacturing co., ltd. [Master of Science in Logistics and Supply Chain Management]. Chonburi: Burapa University; 2015. (In Thai)
- [7] College of Innovation Management, Rajamangala University of Technology Rattanakosin. Knowledge about the Delphi Technique. College of Innovation Management Rajamangala University of Technology Rattanakosin; 2013. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



วราภรณ์ ตาลประไพ นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 1761 ถ. พัฒนาการ แขวง/เขต สวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250 โทรศัพท์ 082-363-1173 Email: tanprapai.war@outlook.com



ดร.อภิชาติ ประสิทธิ์สม อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 1761 ถ. พัฒนาการ แขวง/เขต สวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250 โทรศัพท์ 081-828-0225 Email: apichart.w@outlook.com

การศึกษาเชื้อเพลิงอัดแท่งจากใบสนประดิพัทธ์ผสมถ่านหินลิกไนต์
**A STUDY OF FUEL BRIQUETTES FROM CASUARINA JUNGHUANIANA
MIQ. LEAF - LIGNITE BLENDS**

อนุวัตร ศรีนวล¹ และ อัมพวัลย์ ชัยนาวา²

¹อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300, Srinoun2006@gmail.com

²นักวิจัย, สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300, Yam.ampawan@gmail.com

Anuwat Srinoun¹ and Ampawan Chainawa²

¹Lecturer, Department of Mechanical Technology., Faculty of Engineering, Rajamangala
University of Technology Lanna 128 Huaykaew Rd, Tambon Chang Phueak,
Amphoe Mueang Chiang Mai, Chiang Mai 50300, Thailand, Srinoun2006@gmail.com.

²Researcher, Department of Mining Engineering., Faculty of Engineering, Rajamangala
University of Technology Lanna 128 Huaykaew Rd, Tambon Chang Phueak,
Amphoe Mueang Chiang Mai, Chiang Mai 50300, Thailand, Yam.ampawan@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของสัดส่วนผสมระหว่างถ่านหินลิกไนต์และใบสนประดิพัทธ์ สำหรับการทำเชื้อเพลิงอัดแท่งรูปทรงกระบอกกลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3.5 ซม ภายใน 10 ซม. และยาว 10 ซม. โดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 0%, 1%, 3%, 5% และ 7% w/v เป็นตัวประสานระหว่างถ่านหินลิกไนต์และใบสนที่มีอัตราส่วน 100:0, 90:10, 70:30 และ 50:50 w/w โดยการศึกษาครั้งนี้คำนึงถึงสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความทนแรงอัด ค่าความหนาแน่น ค่าอัตราการแตกตัว ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง และประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อน ผลการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งตามสัดส่วน 70:30 และตัวประสานความเข้มข้น 1% มีคุณสมบัติตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ที่ให้ค่าความร้อน 5,322.25 แคลอรีต่อกรัม ค่าความหนาแน่น 0.78 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าอัตราการแตกตัว 0.46 และค่าความทนแรงอัด 0.83 เมกะปาสคาล นอกจากนี้ยังพบว่า เชื้อเพลิงอัดแท่งในสัดส่วนดังกล่าวมีความสามารถในการติดไฟง่ายกว่าส่วนผสมที่สัดส่วน 90:10 และ 50:50 และให้เปลวไฟสูงปานกลางสีส้มที่ลุกไหม้เร็ว โดยใช้เวลาในการเผาไหม้ทั้งหมด 74 นาที ให้ค่าความร้อนจากการ

เผาไหม้หรือจากการใช้งาน 643.01 แคลอรีต่อกรัม มีปริมาณเถ้า 31.44 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อน 34.62 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : เชื้อเพลิงอัดแท่ง, โซเดียมไฮดรอกไซด์

ABSTRACT

This research aims to study the optimistic ratio between lignite powder and dried casuarina junghuhniana miq. leaf to make compound briquettes. The briquettes were made to have 3.5 cm outside diameter, 10 cm inside diameter and 10 cm long. Lignite powder and dried casuarinas leaf were blended using sodium hydroxide solvent with concentration of 0%, 1%, 3%, 5% and 7% w/v respectively. The ratios between lignite power and dried casuarina junghuhniana miq. leaf implemented in this study were 100:0, 90:10, 70:30 and 50:50 w/w. The physical properties of the briquettes focused in this study are compressive strength, density, shatter index, calorific value and thermal efficiency. The results showed that the ratio of 70:30 with 1% concentrate solvent was found to produce output corresponding to the Thai Community Product Standard. It gives 5,322.25 cal/gram calorific value, density of 0.78 gram/cm³, 0.46 shatter index and compressive strength of 0.83 Mpa. In addition, it was found that the briquettes obtained from this ratio were set on fire easier than those with the ratios of 90:10 and 50:50. It was found to produce the medium high orange flame with burning period of 74 minutes and burning calorific value of 643.01 cal/gram. After burning, ash content was found to be 31.44% and thermal efficiency of 34.62 %

KEYWORDS: Fuel Briquettes, Sodium Hydroxide

1. บทนำ

การไฟฟ้าฝ่ายผลิต อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ที่เป็นหน่วยงานผลิตไฟฟ้าให้กับเขตภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งโรงไฟฟ้าได้มีขั้นตอนการผลิตไฟฟ้า โดยนำถ่านหินผ่านกระบวนการต่างๆ จนกระทั่งนำไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนกับหม้อไอน้ำ [1] สำหรับกระบวนการเตรียมผงถ่านหิน โดยเฉพาะในขั้นตอนการบดถ่านให้เป็นผงก่อนเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ เพื่อนำความร้อนไปต้มน้ำให้กลายเป็นไอน้ำ แต่มีถ่านหินลิกไนต์บางส่วนที่ไม่สามารถบดย่อยได้ หรือที่เรียกว่า Coal Reject และเป็นถ่านหินลิกไนต์ที่ไม่สามารถนำผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าได้

สำหรับต้นสนที่มีอยู่ใน อ.แม่เมาะและในพื้นที่ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ซึ่งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตที่เหมืองแม่เมาะได้ปลูกทดแทนจากการทำเหมือง เพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่สีเขียวให้มากยิ่งขึ้น ประกอบกับ

ไบสนประดิพัทธ์ที่มีจำนวนมากขึ้นและเริ่มเป็นปัญหาให้การไฟฟ้าฝ่ายผลิตที่เหมืองแม่เมาะ เพราะไบสนที่ร่วงหล่นทุกวันที่มีจำนวนมาก ทำให้การไฟฟ้าต้องนำไปทำลายโดยเปล่าประโยชน์

ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำ Coal Reject หรือถ่านลิกไนต์ที่ไม่สามารถใช้ผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า และไบสนประดิพัทธ์ที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก นำมาศึกษาและผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากไบสนประดิพัทธ์ผสมถ่านหินลิกไนต์ในอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการย่อยไบสนประดิพัทธ์ เพื่อให้องค์ประกอบในชีวมวลของไบสนประดิพัทธ์ ทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้ส่วนผสมจับตัวกัน [2-5] ซึ่งใช้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นตัวจับซัลเฟอร์ในถ่านหินลิกไนต์ [6] และใช้โซเดียมไนเตรท (NaNO₃) ในการช่วยทำให้ติดไฟง่ายขึ้น เนื่องจากถ่านหินลิกไนต์ติดไฟยาก [7] จากนั้นนำเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ เพื่อที่จะทราบถึงผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้ในการเตรียมตัวประสานไบสนประดิพัทธ์ต่อสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง อัตราส่วนของถ่านหินลิกไนต์ต่อตัวประสานไบสนประดิพัทธ์ที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ให้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช. 238/2557) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัย เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของสัดส่วนผสมระหว่าง ถ่านหินลิกไนต์และไบสนประดิพัทธ์ สำหรับการทำเชื้อเพลิงอัดแท่งรูป ให้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.238/2557) อีกทั้งในอนาคตอาจจะนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งในครัวเรือนอาจขยายผลไปในเชิงพาณิชย์ อีกทั้งเป็นการนำไบสนและถ่านหินมาใช้ให้เกิดประโยชน์ รวมไปถึงการลดปริมาณในการใช้ถ่านหินจากการใช้ไบสนร่วมเป็นเชื้อเพลิงทดแทนการใช้เชื้อเพลิงจากถ่านไม้ ต่อไป

2. วิธีการดำเนินการ

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำถ่านหินและไบสนมาตากแดดไล่ความชื้นประมาณ 1 สัปดาห์ จากนั้นนำถ่านหินมาบดด้วยเครื่องบดหยาบแบบ Jaw Crusher ยี่ห้อ FRITSCH รุ่น: 01.703 ปรับได้ 5 ระดับ (รูปที่ 1) เครื่องบดละเอียดแบบจาน (Disc Pulverizer) ยี่ห้อ BICO UA Pulverizer 3 HP รุ่น UA 53 (รูปที่ 2) ส่วนไบสนนำมาบดด้วยเครื่องบดแบบ Powder Crusher Machine ยี่ห้อ Saint Donkey รุ่น F-19ZS III ขนาด 100 kg/h (รูปที่ 3) จากนั้น คัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด -18 เมช เพื่อนำไปอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง และคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด - 60 เมช เพื่อนำไปวิเคราะห์แบบ Proximate Analysis และหาค่าความร้อนของถ่านหินและไบสน

ในการเลือกใช้ถ่านหินลิกไนต์และไบสสนประดิพัทธ์ ที่มีขนาด -18 เมช เนื่องจากถ้าใช้ถ่านหินและไบสสนที่มีขนาดเล็กกว่านี้ จะทำให้เกิดการฟุ้งกระจายเป็นผงฝุ่นง่าย แต่ถ่านหินใหญ่เกินไปก็จะทำให้การผสมกันของถ่านหินและไบสสนได้ไม่ดี ซึ่งจะมีผลต่อการอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง



รูปที่ 1 Jaw Crusher



รูปที่ 2 Disc Pulverizer



รูปที่ 3 Powder Crusher Machine

2.2 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีแบบประมาณ (Proximate Analysis) [8, 9]

ความชื้น (ASTM D 3173) นำถั่วยูครูซิเบิลไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ BLUE M รุ่น OV-484A ความสามารถของตู้ 250 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4) ใช้อบถั่ว

เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปทำให้เย็นโดยใส่ในโถดูดความชื้น 15 นาที ใส่ตัวอย่าง 1 กรัม บันทึกค่าเป็น W ลงในถ้วยครุชเชิลแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าเป็น W_1 นำไปอบในที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นในโถดูดความชื้น 20 นาที จึงนำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าเป็น W_2 นำค่าที่ได้ไปหาร้อยละปริมาณความชื้น ได้จากสมการที่ 1

$$M = \frac{(W_1 - W_2) * 100}{W} \quad (1)$$

ถ้า (ASTM D 3174) นำถ้วยครุชเชิลไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปทำให้เย็นโดยใส่ในโถดูดความชื้น 15 นาที จึงนำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าเป็น W_4 ใส่ตัวอย่าง 1 กรัม บันทึกค่าเป็น W ลงในถ้วยครุชเชิล จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ด้วยเตาเผาไฟฟ้า ขนาด 1500 องศาเซลเซียส (รูปที่ 6) แล้วทำให้เย็นในโถดูดความชื้น 20 นาที จึงนำไปชั่งน้ำหนักพร้อมถ้วยครุชเชิล บันทึกค่าเป็น W_3 นำค่าที่ได้ไปหาร้อยละปริมาณถ้า ได้จากสมการที่ 2

$$A = \frac{(W_3 - W_4) * 100}{W} \quad (2)$$

สารระเหย (ASTM D 3175) นำถ้วยครุชเชิลพร้อมฝาปิดไปเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปทำให้เย็นโดยใส่ในโถดูดความชื้น 15 นาที จึงนำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าเป็น W_5 ใส่ตัวอย่าง 1 กรัม บันทึกค่าเป็น W ลงในถ้วยครุชเชิลแล้วนำไปเผาที่ตู้เผาไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นในเตาเผาต่ออีก 7 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น 30 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าเป็น W_6 นำค่าที่ได้ไปหาร้อยละปริมาณสารระเหย ได้จากสมการที่ 3

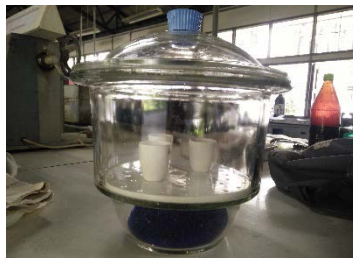
$$V = \frac{(W_5 - W_6) * 100}{W} \quad (3)$$

คาร์บอนคงตัว (ASTM D 3172) นำค่าร้อยละปริมาณความชื้น ร้อยละปริมาณถ้า และร้อยละปริมาณสารระเหยที่ได้ ไปหาร้อยละหาปริมาณคาร์บอนคงตัว ได้จากสมการที่ 4

$$C = 100 - (M + V + A) \quad (4)$$



รูปที่ 4 ตู้อบลมร้อน



รูปที่ 5 โถดูดความชื้นและถ้วยครุชีเบิล



รูปที่ 6 เตาเผาไฟฟ้า

2.3 การเตรียมเชื้อเพลิงแข็งกับตัวประสาน

ทำการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้มีความเข้มข้น 1%, 3%, 5% และ 7% โดยมวลต่อปริมาตร เตรียมโดยการนำโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 กรัม, 30 กรัม, 50 กรัม และ 70 กรัม มาละลายกับน้ำกลั่น 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วใช้แท่งแก้วคนจนโซเดียมไฮดรอกไซด์ละลาย [10] จากนั้นนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แต่ละความเข้มข้น มาผสมกับไบสนขนาด -18 เมช

ในอัตราส่วนสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ต่อไบสน 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อ 250 กรัม และนำมาให้ความร้อนหรือต้มกับของผสมที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที แล้วนำมาตากแดดประมาณ 3 วัน (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 ไบสนที่ผ่านการต้มนาน 1 ชั่วโมง 30 นาที

2.4 การอัดแท่งเชื้อเพลิง

นำถ่านหินขนาด -18 เมช ผสมกับตัวประสานไบสน ในอัตราส่วนถ่านหินต่อไบสน 100:0, 90:10, 70:30 และ 50:50 เติมน้ำเปล่า 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร ไซเตียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 ของน้ำหนักถ่านหิน และแคลเซียมออกไซด์ 2.5 เท่าของจำนวนซัลเฟอร์ในถ่านหิน ผสมให้เข้ากัน (รูปที่ 8) นำเชื้อเพลิงผสม 100 กรัม มาอัดเป็นรูปทรงกระบอกกลวงด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ขนาด 1500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยถ่านมีขนาดความสูง 10.5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3.5 เซนติเมตร โดยใช้แรงอัดจากเครื่องอัดไฮดรอลิกอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ 1,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (รูปที่ 9) ตากแดดประมาณ 1 สัปดาห์



รูปที่ 8 เชื้อเพลิงผสมก่อนทำการอัดแท่ง



รูปที่ 9 เครื่องอัดถ่านแบบไฮดรอลิก

2.5 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง [11, 12]

การหาค่าความทนแรงอัด (Compressive Strength) [13] นำตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้มาทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ยี่ห้อ Compact รุ่น 1500 (รูปที่ 10) บันทึกค่าแรงกดที่ได้ นำมาหาค่าความทนแรงอัดได้จากสมการที่ 5

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (5)$$

เมื่อ σ_c คือ ความทนแรงอัดของถ่านอัดแท่ง (ปาสคาล)

F คือ แรงกดที่กระทำตัวอย่างจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการแตก (นิวตัน)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของถ่านอัดแท่ง (ตารางเมตร)



รูปที่ 10 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine

การหาค่าอัตราการแตกตัว (Shatter Index) นำตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดแท่ง 1 ก้อน ไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าเป็น W_b ใส่ลงไปในถุงพลาสติก ปล่อยลงสู่พื้นคอนกรีตที่ความสูง 1.8 เมตร นำไปร่อนด้วยตะแกรงขนาด 3/4 นิ้ว นำส่วนที่ค้างตะแกรงและลอดตะแกรงไปชั่งน้ำหนัก โดยที่บันทึกค่าน้ำหนักของส่วนที่ลอดตะแกรงเป็น W_a จากนั้นหาค่าอัตราการแตกตัวได้จากสมการที่ 6

$$R = \frac{W_a}{W_b} \quad (6)$$

เมื่อ R คือ อัตราการแตกตัว

W_a คือ น้ำหนักของเชื้อเพลิงในส่วนที่ลอดผ่านตะแกรง

W_b คือ น้ำหนักของเชื้อเพลิงอัดแท่งก่อนการทดลอง

การหาค่าความหนาแน่น (Density) นำตัวอย่างเชื้อเพลิงมาชั่งน้ำหนักและวัดปริมาตร นำมาหาค่าความหนาแน่นได้จากสมการที่ 7

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (7)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของถ่านอัดแท่ง (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

m คือ มวลของถ่านอัดแท่ง (กรัม)

V คือ ปริมาตรของถ่านอัดแท่ง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.6 การทดสอบสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

การหาค่าความร้อน (Heating Value) [14] นำตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้มาหาค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter (รูปที่ 11) คำนวณหาค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงได้จากสมการที่ 8

$$Q = \frac{TW - C_1 - C_2 - C_3}{m} \quad (8)$$

เมื่อ Q คือ ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงรวม (แคลอรีต่อกรัม)

W คือ ค่าสมมูลย์ทางพลังงานของแคลอรีมิเตอร์ (2,426 แคลอรีต่อองศาเซลเซียส)

m คือ มวลของเชื้อเพลิงตัวอย่าง (กรัม)

- T คือ ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (องศาเซลเซียส)
- C₁ คือ ค่าความร้อนที่เกิดจากกรดไนตริก (แคลอรีต่อเซนติเมตร)
- C₂ คือ ค่าความร้อนที่เกิดจากกรดซัลฟูริก (แคลอรีต่อเซนติเมตร)
- C₃ คือ ค่าความร้อนที่เกิดจากขดลวดไฟฟ้า (แคลอรีต่อเซนติเมตร)



รูปที่ 11 บอมบ์แคลอรีมิเตอร์

การหาประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อน (หุงต้ม) [15] นำตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดแท่งมา 4 ก้อน ไปชั่งน้ำหนัก เติมน้ำเปล่า 750 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงไปในหม้ออะลูมิเนียม แล้ววัดอุณหภูมิของน้ำที่อุณหภูมิเริ่มต้น ทำการเผาเชื้อเพลิงอัดแท่งโดยใช้ไม้ก๊วยช้อนนำ เริ่มจับเวลาเมื่อติดไฟ จากนั้นให้ทำการต้มน้ำอ่านอุณหภูมิจนอุณหภูมิสูงสุด พร้อมกับบันทึกเวลาที่น้ำมีอุณหภูมิสูงสุด และเวลาที่เชื้อเพลิงเผาไหม้จนกลายเป็นเถ้า ยกหม้อน้ำลงจากเตาอังโล่ทิ้งไว้ในเย็น แล้วชั่งน้ำหนัก น้ำที่เหลือและชั่งน้ำหนักเถ้า นำข้อมูลที่ได้อ่านค่าหาประสิทธิภาพการใช้งาน ได้จากสมการที่ 9

$$HU = \frac{[m_1 c(T_2 - T_1)] + (m_1 - m_2)L}{MH} * 100 \quad (9)$$

- เมื่อ HU คือ ร้อยละประสิทธิภาพการใช้งาน
- m₁ คือ น้ำหนักเริ่มต้นของน้ำ (กรัม)
- m₂ คือ น้ำหนักน้ำที่เหลือ (กรัม)
- C คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (1 แคลอรีต่อกรัมองศาเซลเซียส)
- L คือ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (540 แคลอรีต่อกรัม)
- M คือ มวลของเชื้อเพลิงอัดแท่งเริ่มต้น (กรัม)
- T₁ คือ อุณหภูมิของน้ำเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)
- T₂ คือ อุณหภูมิของน้ำสุดท้าย (องศาเซลเซียส)
- H คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (แคลอรีต่อกรัม)

3. ผลการทดลอง

ผลของการทดลอง ได้แบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่

1. ผลการวิเคราะห์สมบัติสารตัวอย่าง
2. ผลของอัตราส่วนของถ่านหินต่อไบส่นที่เหมาะสมกับการอัดแท่งเชื้อเพลิง และการหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมในการเตรียมตัวประสานไบส่นต่อการขึ้นรูปของแท่งเชื้อเพลิง
3. ผลการศึกษาอัตราส่วนของถ่านหินต่อตัวประสานไบส่น และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เตรียมตัวประสานไบส่นต่อสมบัติทางกายภาพ
4. ผลการศึกษาอัตราส่วนของถ่านหินต่อตัวประสานไบส่น และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เตรียมตัวประสานไบส่นต่อสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง

โดยให้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.238/ 2557) [16] ซึ่งมาตรฐานมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้ คือ ค่าความทนแรงอัดต้องอยู่ในเกณฑ์ที่เชิงพาณิชย์ยอมรับตั้งแต่ 0.375 เมกะปาสคาลขึ้นไป ค่าความหนาแน่นต้องอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าอัตราการแตกต้องอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 1 และ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งต้องไม่น้อยกว่า 5,000 แคลอรีต่อกรัม

3.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติสารตัวอย่าง

ผลการวิเคราะห์สมบัติสารตัวอย่างของถ่านหินและไบส่นประติพัทธ์ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์แบบ Proximate Analysis และผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน

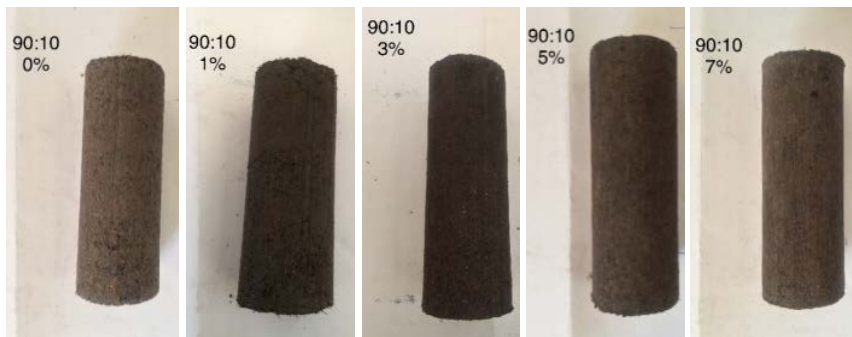
รายการ		ถ่านหินลิกไนต์	ไบส่นประติพัทธ์
Proximate Analysis (เปอร์เซ็นต์, %)	ความชื้น (Moisture)	31.98	4.6
	สารระเหย (Volatile Matter)	27.44	69.55
	ขี้เถ้า (Ash)	16.46	6.55
	ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)	24.12	19.30
ค่าความร้อน	กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (kcal/ kg)	3,226	3,485
	กิโลจูลต่อกิโลกรัม (kJ/ kg)	13,507	14,591
ปริมาณกำมะถัน (เปอร์เซ็นต์, %)		4.69	0.8615

จากผลการทดลองตารางที่ 1 จะเห็นปริมาณความชื้นและสารระเหยได้ของถ่านหินที่นำมาใช้นั้นมีค่ามาก เนื่องจากตัวอย่างถ่านหินที่มีศักดิ์ค่อนข้างต่ำ จึงทำให้มีปริมาณคาร์บอนในถ่านหินมีค่าน้อยไปด้วย ส่วนการทดลองหาค่าความร้อน โดยใช้เครื่อง Bomb Calorimeter และหาร้อยละกำมะถันโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบธาตุ จะเห็นว่าค่าความร้อนของถ่านหินและไบสนมีความร้อนใกล้เคียงกัน ซึ่งไบสนมีค่าความร้อนมากกว่าถ่านหินเล็กน้อย จากข้อมูลดังกล่าวสามารถที่จะใช้ไบสนแทนถ่านหินได้ ซึ่งเป็นการลดปริมาณการใช้ถ่านหินลงได้ สำหรับร้อยละกำมะถันในถ่านหินมีปริมาณร้อยละ 4.69 ส่วนไบสนพบปริมาณกำมะถันเล็กน้อย ในการศึกษาทดลองนี้ได้กำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) และก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ซึ่งเกิดจากสารประกอบกำมะถันในถ่านหินโดยเติมแคลเซียมออกไซด์ จากการสังเกตการใช้งานพบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งมีกลิ่นฉุนของก๊าซซัลเฟอร์น้อยมากถึงไม่มี

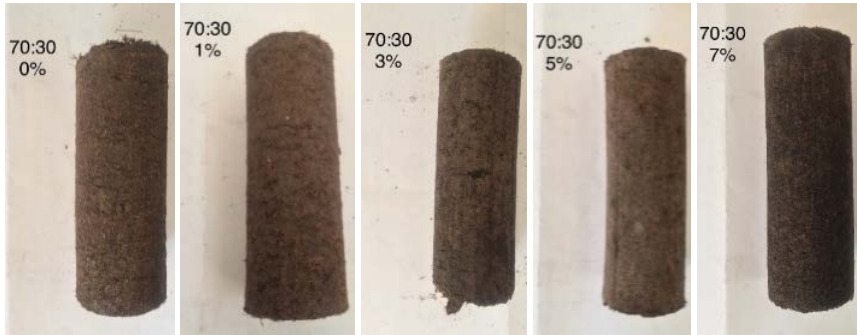
3.2 ผลของอัตราส่วนของถ่านหินต่อไบสนที่เหมาะสมกับการอัดแท่งเชื้อเพลิง และการหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสม

การขึ้นรูปของการอัดแท่งเชื้อเพลิงนั้น เพื่อหาผลของอัตราส่วนของถ่านหินต่อไบสนที่เหมาะสมกับการอัดแท่งเชื้อเพลิง และการหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสม สำหรับใช้ในการเตรียมตัวประสานไบสนต่อการขึ้นรูปของแท่งเชื้อเพลิง โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 0, 1, 3, 5 และ 7% อัตราส่วนถ่านหินต่อไบสน 90:10, 70:30, 50:50

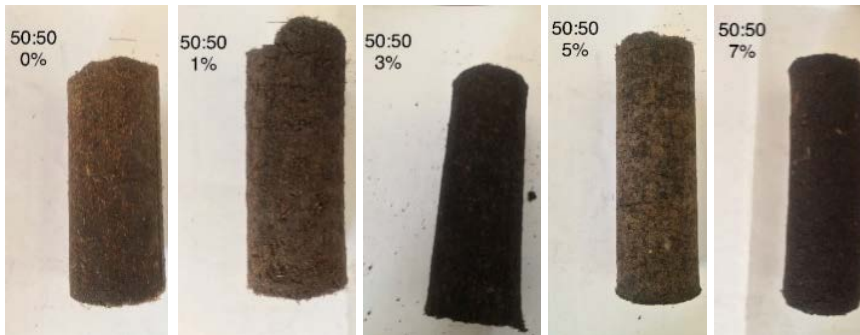
จากผลการขึ้นรูปของการอัดแท่งเชื้อเพลิงในอัตราส่วนถ่านหินต่อไบสน ทั้ง 3 อัตราส่วนพบว่า เมื่อปริมาณถ่านหินเพิ่มขึ้นจะทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีความแข็ง มีลักษณะคงรูปดีขึ้น ลักษณะการบวมและแตกบริเวณขอบลดลง ดังแสดงในรูปที่ 12 ถึง 14



รูปที่ 12 เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีส่วนผสมของตัวประสานไบสนที่ย่อยหรือต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในอัตราส่วนถ่านหินต่อไบสน 90:10



รูปที่ 13 เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีส่วนผสมของตัวประสานไบสนที่ย่อยหรือต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในอัตราส่วนถ่านหินต่อไบสน 70:30



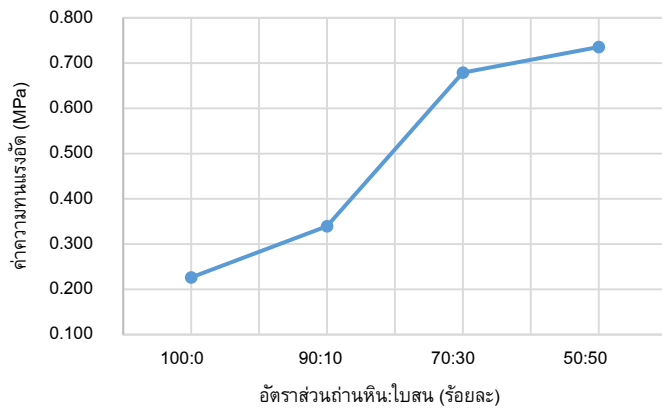
รูปที่ 14 เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีส่วนผสมของตัวประสานไบสนที่ย่อยหรือต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในอัตราส่วนถ่านหินต่อไบสน 50:50

จากรูปที่ 12 ถึง รูปที่ 14 จะเห็นได้ว่าทุกอัตราส่วนสามารถขึ้นรูปได้แท่งอัดที่แข็งแรง แต่ที่อัตราส่วน 90:10 สามารถขึ้นรูปได้แท่งอัดที่แข็งแรงกว่า เมื่อสังเกตพบว่าตัวถ่านขอบถ่านไม่แตกไม่บวม ส่วนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เมื่อพิจารณาลักษณะการคงตัวและรูปร่างเชื้อเพลิงอัดแท่ง พบว่าที่อัตราส่วนของถ่านหินต่อตัวประสานไบสนเดียวกัน เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น จะทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งมีลักษณะคงตัวดีขึ้น แต่ถ้าหากความเข้มข้นน้อยเกินไป จะทำให้ไบสนไม่สามารถแสดงคุณสมบัติการเป็นตัวประสานออกมาได้ แต่ถ้าหากความเข้มข้นมากเกินไป จะทำให้เกิดการทำลายคุณสมบัติของสารประกอบในชีวมวลที่ถูกย่อยออกมาเป็นตัวประสานได้ ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการย่อยชีวมวล เพื่อจะช่วยให้แท่งเชื้อเพลิงมีความแข็งแรงมากขึ้น จากการสังเกตลักษณะของเชื้อเพลิงอัดแท่งผสมตัวประสานชีวมวลที่เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของต่างที่ใช้ย่อยต่างๆ ไม่สามารถระบุการเปรียบเทียบได้แน่ชัด ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

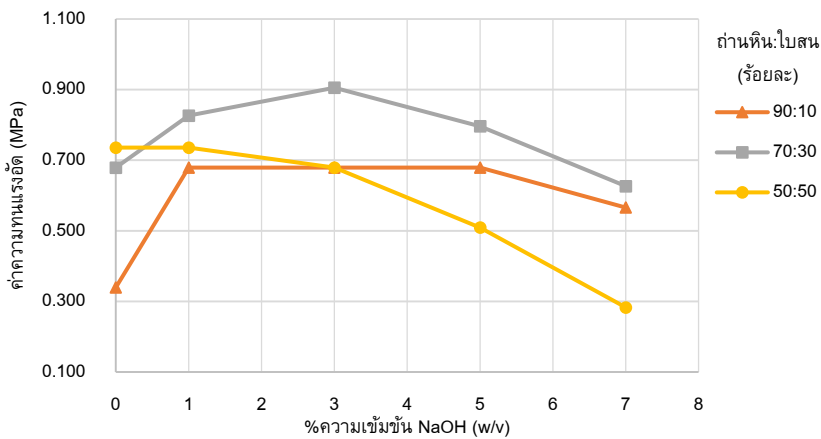
3.3 ผลการศึกษาอัตราส่วนของถ่านหินต่อตัวประสานไบสน และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เตรียมตัวประสานไบสนต่อสมบัติทางกายภาพ

3.3.1 ผลการทดลองค่าความทนแรงอัด (Compressive Strength)

ผลการทดลองค่าความทนแรงอัด (Compressive Strength) ดังแสดงในกราฟรูปที่ 15 และ 16



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีส่วนผสมของไบสนที่ไม่ได้ย่อยหรือต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับค่าความทนแรงอัด



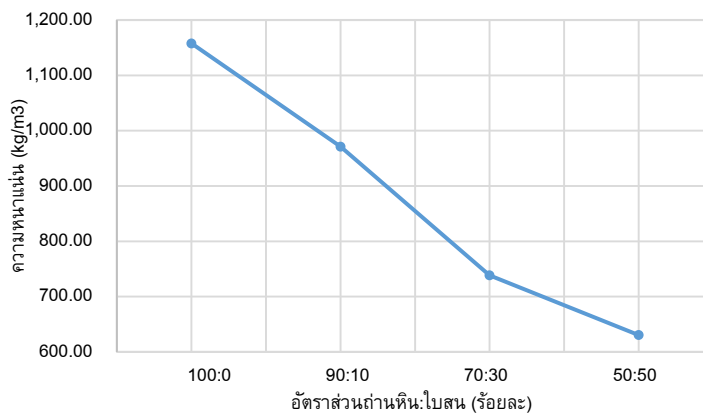
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ย่อยหรือต้มไบสนกับค่าความทนแรงอัด

จากกราฟรูปที่ 15 พบว่าเมื่อปริมาณของตัวประสานไบสนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความทนแรงอัดของเชื้อเพลิงอัดแท่งดีขึ้น จากกราฟรูปที่ 16 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3% โดยมวลต่อปริมาตร ของอัตราส่วน 70:30 ให้ค่าความทนแรงอัดสูงสุด สรุปได้ว่า

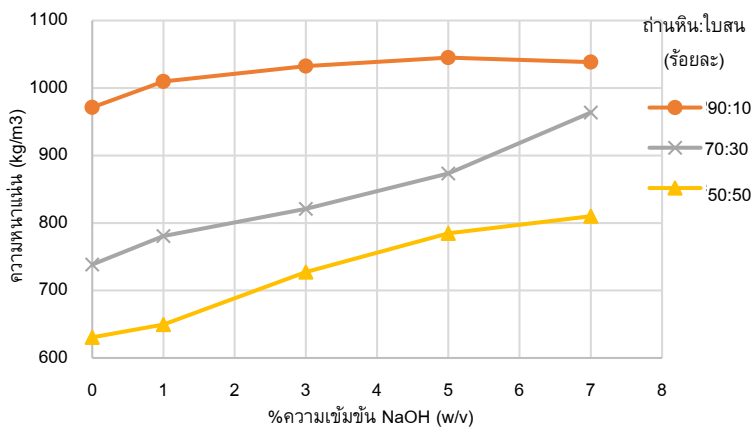
ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ย่อยมีผลต่อความแข็งแรงของเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นก็จะทำให้เพิ่มความแข็งแรง แต่เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงเกินไปจะทำให้ค่าความทนแรงอัดของเชื้อเพลิงอัดแท่งลดลง ดังนั้นต้องเลือกใช้ความเข้มข้นที่เหมาะสม

3.3.2 ผลการทดลองความหนาแน่น (Density)

ผลการทดลองความหนาแน่น (Density) ดังแสดงในกราฟรูปที่ 17 และ 18



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีส่วนผสมของไบสนที่ไม่ได้ย่อยหรือต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับค่าความหนาแน่น

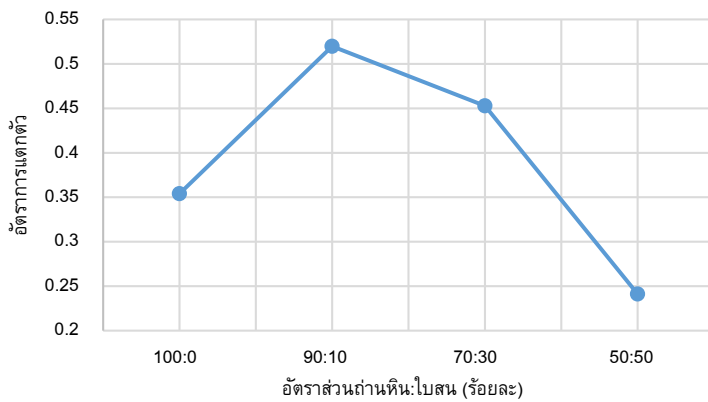


รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ย่อยหรือต้มไบสนกับค่าความหนาแน่น

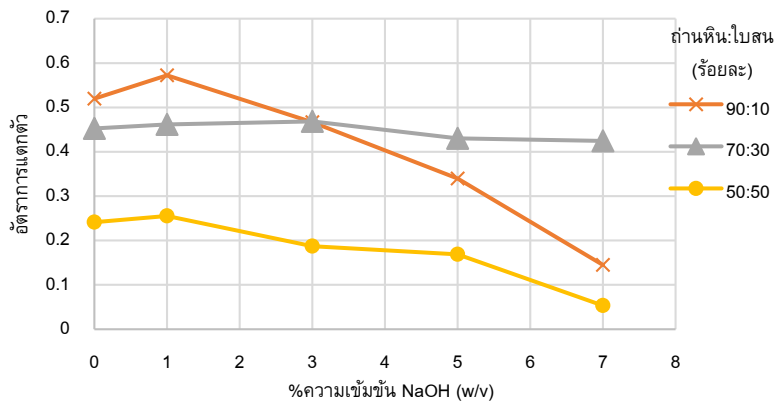
จากกราฟรูปที่ 17 พบว่าเมื่อปริมาณของถ่านหินเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่งดีขึ้น จากกราฟรูปที่ 18 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนถ่านหินต่อตัวประสานไบสนเดียวกัน ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 7% โดยมวลต่อปริมาตร ให้ผลค่าความหนาแน่นสูงสุด สรุปได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อความหนาแน่น โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นก็จะทำให้เพิ่มความหนาแน่นไปด้วย

3.3.3 ผลการทดลองอัตราการแตกตัว (Shatter Index)

ผลการทดลองอัตราการแตกตัว (Shatter Index) ดังแสดงในกราฟรูปที่ 19 และ 20



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีส่วนผสมของไบสนที่ไม่ได้ย่อยหรือต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับค่าอัตราการแตกตัว



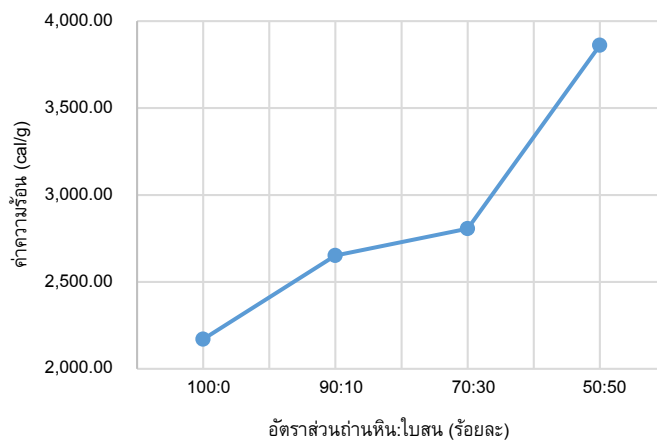
รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ย่อยหรือต้มไบสนกับค่าอัตราการแตกตัว

จากกราฟรูปที่ 19 พบว่าเมื่อปริมาณของถ่านหินเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าอัตราการแตกตัวของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ที่ 90:10 จากกราฟรูปที่ 20 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3% โดยมวลต่อปริมาตร ให้ค่าอัตราการแตกตัวสูงสุด ของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีส่วนผสมของไบสนที่ 70 : 30 เหมาะสมที่สุด ซึ่งทุกความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าใกล้เคียงกัน และสรุปได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อความสามารถของเชื้อเพลิงอัดแท่งในการนำไปใช้งาน ทำให้มีความทนทานระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษา

3.4 ผลการศึกษาอัตราส่วนของถ่านหินต่อตัวประสานไบสน และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เตรียมตัวประสานไบสนต่อสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง

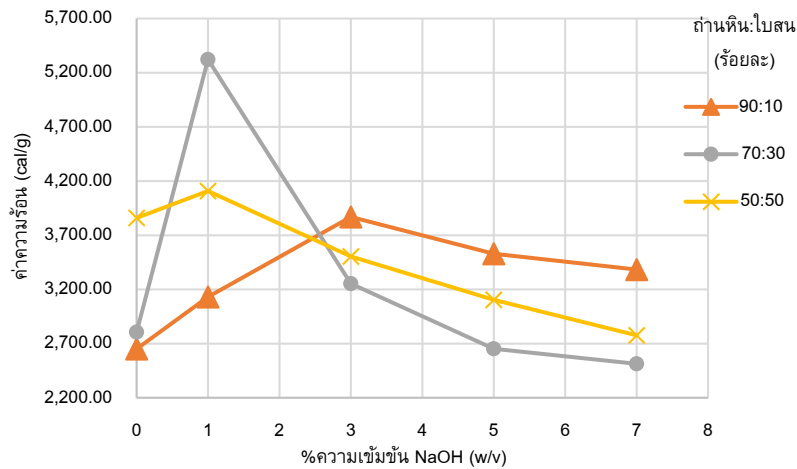
3.4.1 ผลของการค่าความร้อน (Heating Value) ด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter

ผลของการค่าความร้อนด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter ดังแสดงในกราฟรูปที่ 21 และ 22



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีส่วนผสมของไบสนที่ไม่ได้ย่อยหรือต้ม ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับค่าความร้อน

จากกราฟรูปที่ 21 อัตราส่วนเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีส่วนผสมของไบสนที่ไม่ได้ย่อยหรือต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับค่าความร้อน จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของตัวประสานไบสนเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น จากกราฟรูปที่ 22 พบว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% โดยมวลต่อปริมาตร ให้ค่าความร้อนสูงสุด ที่ 70:30 สรุปได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อความร้อน แต่ถ้าความเข้มข้นมากไปจะทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งลดลง



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ย่อยหรือต้มไบสนกับค่าความร้อน

3.4.2 ผลของการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดแท่ง

ผลของการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดแท่ง อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและเวลาในการต้มน้ำที่ให้ อุณหภูมิสูงสุด และลักษณะเชื้อเพลิงอัดแท่งขณะเผาไหม้ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิและเวลาในการต้มน้ำ และลักษณะเชื้อเพลิงอัดแท่งขณะเผาไหม้ ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิของน้ำเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิของน้ำสูงสุด

ถ่านหิน :ไบสน (w/w)	% NaOH (w/v)	อุณหภูมิสูงสุด (°C)	เวลาในการต้มน้ำ (นาที)	อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (°C/min)	ลักษณะเชื้อเพลิงอัดแท่งขณะเผาไหม้
100:0	0	82.5	35.13	1.90	ติดไฟยาก ลูกไหม้ช้า
90:10	0	88	28.46	1.91	ติดไฟยาก มีเปลวไฟสูงสีส้ม ลูกไหม้ช้า
	1	82	31.08	1.95	
	3	90	34.22	2.27	
	5	94	21.34	3.19	
	7	82	19.44	3.30	

ตารางที่ 2 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิและเวลาในการต้มน้ำ และลักษณะเชื้อเพลิงอัดแท่งขณะเผาไหม้ ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิของน้ำเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิของน้ำสูงสุด (ต่อ)

ถ่านหิน : ไบสน (w/w)	% NaOH (w/v)	อุณหภูมิสูงสุด (°C)	เวลาในการต้มน้ำ (นาที)	อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (°C/min)	ลักษณะเชื้อเพลิงอัดแท่งขณะเผาไหม้
70:30	0	86	19.58	1.55	ติดไฟง่ายกว่า 90:10 มีเปลวไฟสูงปานกลาง สีส้ม ลูกไหม้เร็วกว่า 90:10 ก้อนถ่านจะแตกและร่วงออกเล็กน้อย
	1	84	20.09	1.85	
	3	77	19.52	2.39	
	5	83	16.20	2.90	
	7	75.5	29.19	3.56	
50:50	0	83	12.30	1.50	ติดไฟง่ายกว่า 70:30 มีเปลวไฟต่ำสีส้ม ลูกไหม้เร็ว ก้อนถ่านจะแตกและร่วงออกเล็กน้อย
	1	73	13.55	2.96	
	3	74	15.58	3.23	
	5	89	20.33	3.71	
	7	86	21.33	3.63	

จากผลการทดลองตารางที่ 2 พบว่า ในทุกๆ ของส่วนผสมของถ่านหิน เมื่อปริมาณของตัวประสานไบสน (%NaOH) เพิ่มขึ้น จะทำให้เวลาในการต้มน้ำไปจนถึงอุณหภูมิสูงสุดเร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการติดไฟของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ที่จะติดไฟจะดีขึ้นง่ายขึ้นเมื่อปริมาณของไบสนเพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงแรกจะติดไฟค่อนข้างยาก แต่เมื่อติดไฟแล้วจะเผาไหม้ค่อนข้างดี และจากการสังเกตการลุกไหม้ของอัตราส่วนของถ่านหินต่อไบสนที่ 70:30 จะเหมาะสมที่สุด คือ ลูกไหม้เร็วกว่าที่อัตราส่วน 90:10 และเปลวไฟสูงปานกลางสูงกว่าอัตราส่วนที่ 50:50 สำหรับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อเวลาในการต้มน้ำให้อุณหภูมิสูงสุด จึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนของถ่านหินต่อไบสนที่ 70:30 จะเหมาะสมที่สุด

3.4.3 ผลของเวลาในการเผาไหม้ ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ และปริมาณเถ้า

ผลของเวลา ค่าความร้อน และปริมาณเถ้าจากการเผาไหม้ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เวลาในการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดแท่ง ค่าความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอัดแท่ง และปริมาณเถ้าหลังการเผาไหม้ จากการใช้งานจริง

ถ่านหิน : ไบสน (w/w)	% NaOH (w/v)	เวลา (นาที)	ค่าความร้อน (cal/g)	ปริมาณเถ้า (%)
100:0	0	80	593.60	21.77
90:10	0	87	786.13	22.97
	1	88	680.43	18.51
	3	90	729.43	30.97
	5	94	781.39	30.78
	7	96	578.75	29.88
70:30	0	70	643.01	18.64
	1	71	696.10	31.44
	3	74	723.27	26.43
	5	76	785.04	33.99
	7	79	832.7	25.75
50:50	0	62	642.30	10.74
	1	68	621.52	29.43
	3	68	538.70	32.37
	5	75	698.50	24.22
	7	77	710.16	24.06

จากผลการทดลองตารางที่ 3 จะเห็นว่าอัตราส่วนของถ่านกับไบสนที่ให้ค่าความร้อนสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วน 70:30 ส่วนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลต่อค่าความร้อนจากการเผาไหม้ ส่วนเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมด พบว่าเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้เพิ่มขึ้นตามปริมาณของถ่านหินที่เติมลงไป เพราะปกติแล้วถ่านหินจะเผาไหม้ช้ากว่าไบสน เช่นเดียวกับความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ก็จะนานขึ้นเหมือนกัน สำหรับปริมาณเถ้าพบว่า ปริมาณเถ้าขึ้นอยู่กับอัตราส่วน คือ ถ้าปริมาณไบสนเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณเถ้าลดลง ลักษณะของเถ้าที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอัดแท่งจะมีลักษณะคงตัว มีความแข็งแรงพอสมควร และสามารถเอามือหยิบจับออกมาได้ ดังแสดงในรูปที่ 23 จึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนของถ่านหินต่อไบสนที่ 70:30 จะเหมาะสมที่สุด



รูปที่ 23 ลักษณะเก่าของเชื้อเพลิงอัดแท่งหลังจากการเผาไหม้

3.4.4 ผลของการหาค่าประสิทธิภาพการใช้งานจริงของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ผลของการหาค่าประสิทธิภาพการใช้งานจริงของเชื้อเพลิงอัดแท่งดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อน (Heat Utilization Efficiency)

ถ่านหิน : ไบโสน (w/w)	% NaOH (w/v)	ประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อน (%)
100:0	0	27.36
90:10	0	17.11
	1	18.85
	3	21.73
	5	25.65
	7	30.88
	70:30	0
1		18.02
3		20.66
5		27.80
7		34.62
50:50	0	15.13
	1	15.37
	3	16.64
	5	17.02
	7	25.58

จากผลการทดลองตารางที่ 4 ถ้าปริมาณของไบสนที่มากไปหรือน้อยไป จะทำให้ประสิทธิภาพในการใช้งานของเชื้อเพลิงแห้งลดลง สรุปได้ว่า พบว่าภาพรวมของประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุดซึ่งในอัตราส่วนที่ 70:30 จะทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อน (%) สูงสุด 34.62 %

4. สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของสัดส่วนผสมระหว่าง ถ่านหินลิกไนต์ และไบสนประดิษฐ์ สำหรับการเผาเชื้อเพลิงอัดแท่ง จากผลการทดลองอัตราส่วนของถ่านหินและไบสน และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ซึ่งเห็นว่าสามารถนำเชื้อเพลิงอัดแท่งทุกสัดส่วนทั้งหมดที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ แต่เมื่อพิจารณาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.238/2557) ซึ่งมาตรฐานมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้ คือ ค่าความทนแรงอัดต้องอยู่ในเกณฑ์ที่เชิงพาณิชย์ยอมรับตั้งแต่ 0.375 เมกะปาสคาลขึ้นไป, ค่าความหนาแน่นต้องอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, ค่าอัตราการแตกต้องอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 1 และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งต้องไม่น้อยกว่า 5,000 แคลอรีต่อกรัม

ดังนั้นพบว่าคุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผ่านมาตรฐานตามที่กำหนด คือ เชื้อเพลิงอัดแท่งที่อัตราส่วนถ่านหินต่อตัวประสานไบสน 70:30 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% โดยมวลต่อปริมาตร ซึ่งผลการทดลองมีคุณสมบัติ คือ ค่าความทนแรงอัด 0.83 เมกะปาสคาล ค่าความหนาแน่น 0.78 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าอัตราการแตกตัว 0.46 มีค่าความร้อน 5,322.25 แคลอรีต่อกรัม

สำหรับส่วนประกอบอื่นๆ ที่นอกเหนือจากค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ตารางที่ 2 3 4 นำประกอบการพิจารณาตามความเหมาะสม คือ มีอุณหภูมิน้ำสูงสุด 84 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 20.09 นาที, อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 2.39 องศาเซลเซียสต่ออนาที, เวลาในการเผาไหม้ทั้งหมด 74 นาที ได้ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ 643.01 แคลอรีต่อกรัม มีปริมาณถ่าน 31.44 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อน 34.62 เปอร์เซ็นต์

References

- [1] Knowledge powerplant [Internet]. Bangkok: Electricity Generating Authority of Thailand; 2016 [cited 2018 January 10]. Available from: <http://maemoh.egat.com/index.php/knowledge>
- [2] Suwit S, Prattana K. Briquetting of coal combined with rice husk and saw dusk by

- compression [Special Problems Report]. Chaingmai: Department of Industrial Chemistry, Faculty of Science, Chiang Mai University; 2004. (In Thai)
- [3] Prathum P, Pimpapon T. Dietary fiber a substance that is not valuable but interesting. Department of Science Service Journal 1997;145:26-32. (In Thai)
- [4] Prapasri P, Uruwan V, Ratchanee K. Dietary fiber in Thai food. Journal of Nutrition 1990;24:43-53. (In Thai)
- [5] Gallaher D and Schneeman. BO. Dietary fiber In Ziegler, E.E. and Fiber. L.J. Present Knowledge in nutrition 7th ed. Ilsi Press, Wassington DC 1996;87-89.
- [6] Daungporn T.Coal briquette desulfurization by lime [dissertation]. Bangkok: Chulalongkorn University; 1987. (In Thai)
- [7] Nipa S. Briquetting of coal fines for household uses [dissertation]. Bangkok: Chulalongkorn University; 1985. (In Thai)
- [8] Proximate Analysis [Internet]. Lampang: Mae Moh Mine; 2008 [cited 2017 March 4]. Available from: http://maemohmine.egat.co.th/mining_technology/coal_analysis1.html
- [9] Rungroj P. The production of charcoal briquette by coconut shell and cassava rhizome [dissertation]. Bangkok: Srinakharinwirot University; 2010. (In Thai)
- [10] General Chemistry Laboratory [Internet]. Ubon Ratchathani: Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University; 2014. [cited 2017 March 4]. Available from: http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Combution_and_Cogeneration/content/content
- [11] Supachai T.The study production of briquette by Pennisetum purpureum.The 6th National and International. April 28-29, 2015. Suan Sunandha Rajabhat University Bangkok: 2015; 502-12. (In Thai)
- [12] Yaman S, Sahan M, Haykiri-Acma H, Sesen K. and Kucukbayrak S. Fuel briquette from biomass-lignite blends Fuel Processing Technology 2001;1-8.
- [13] Fuel [Internet]. Bangkok: Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi; (cited 2017 March 4). Available from: http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Combution_and_Cogeneration/content/
- [14] Fuel Calorimetry Test. Department of Mechanical Engineering. Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Mai; 2013 (In Thai)
- [15] Thanapol T. Community-Based Renewable Energy from Biomass Briquettes Fuel from Coconut Leaf. Journal of Science and Technology 2015;23(3):418-31. (In Thai)

[16] Community Product Standards for Fuel Briquette 238/2547 [Internet]. 2004 [cited 2017 March 4]. Available from: <https://www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/standard.php>

ประวัติผู้เขียนบทความ



อหุวัตร ศรีนวล ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300 หมายเลขโทรศัพท์ 0895559432 E-Mail: Srinoun2006@gmail.com จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ปริญญาโท สาขาอาชีวศึกษา และสาขาวิศวกรรมเกษตร สนใจงานวิจัยด้านเครื่องจักรกลเกษตร และพลังงานทดแทน



อัมพัลย์ ชัยหาวา นักวิจัยสาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 128 ถนนห้วยแก้ว อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300 หมายเลขโทรศัพท์ 0832017417 E-Mail: Yam.ampawan@gmail.com

**การประเมินความต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัว
ในเนื้อเชื่อมภายใต้เส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูง**

**EVALUATION OF WELD SOLIDIFICATION CRACKING RESISTANCE
BASED ON HIGH TEMPERATURE DUCTILITY CURVE**

ฤทธิชัย เภาเนียม¹ ไพศาล อินประจง² และ เจษฎา แก้ววิชิต³

¹อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ, 2 ถ.นางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120, rittichai.p@mail.rmutk.ac.th

^{2,3}นักวิจัย, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ, 2 ถ.นางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120, ²paisan_20@hotmail.com, ³Jesada.kt@hotmail.com

Rittichai Phaoniam¹, Paisan Inprachong² and Jesada Kaewwichit³

¹Lecturer, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, 2 Nanglinchee Rd. Thungmahamek, Sathorn, Bangkok 10120, Thailand, rittichai.p@mail.rmutk.ac.th

^{2,3}Researcher, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, 2 Nanglinchee Rd. Thungmahamek, Sathorn, Bangkok 10120, Thailand, ²paisan_20@hotmail.com, ³Jesada.kt@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการประเมินความต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัวของเนื้อเชื่อม โดยพิจารณาภายใต้ค่าขอบเขตของเส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูง (High Temperature Ductility Curve) ซึ่งแนวทางนี้สามารถอธิบายถึงปัจจัยสำคัญด้านช่วงอุณหภูมิการแตกร้าว (SCTR) ระดับความเครียดวิกฤต และความไวต่อการแตกร้าวขณะเชื่อมด้วย เนื้อเชื่อมที่ศึกษามี 2 ชนิด ได้แก่ พอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 และความแข็งแรงสูง AWS ER70S-6 ในการทดลองประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบทรานส์วาเรสแตนต์ (Trans-Varestraint Test) เพื่อหาความยาวรอยแตกสูงสุดในช่วงอุณหภูมิการแข็งตัวของเนื้อเชื่อมซึ่งถูกกระตุ้นจากการตัดโค้งทันทีที่ทันใดขณะเชื่อมด้วยทั้งสแตนเลสเนื้อย่นปกคลุม ณ ระดับความเครียด 0.7-4.1 % และส่วนต่อมาเป็นการวัด

อัตราเป็นตัวของบ่อหลอมขณะเชื่อมเพื่อประมาณค่าอุณหภูมิสิ้นสุดการแตกร้า จากผลทดลองได้ความสัมพันธ์ระหว่างการแตกร้าสูงสุดในช่วงอุณหภูมิการแข็งตัว ณ ระดับความเครียดต่างๆ ซึ่งสามารถประเมินค่าขอบเขตความต้านทานการแตกร้า ณ อุณหภูมิสูง หรือเส้นโค้งความเหนียวได้ ผลการทดลองพบว่าที่ระดับความเครียดเท่ากันเนื้อเชื่อม MSG 6 GZ-60 มีความยาวรอยแตกร้า สูงสุดมากกว่า ในขณะที่เนื้อเชื่อม AWS ER70S-6 มีการกระจายตัวของจำนวนรอยแตกมากกว่าในทุกระดับความเครียด เมื่อพิจารณาความไวต่อการแตกร้าขณะแข็งตัวภายใต้เส้นโค้งความเหนียว จากช่วงอุณหภูมิ SCTR และอัตราความเครียดวิกฤต ผลบ่งชี้ว่าเนื้อเชื่อม MSG 6 GZ-60 มีโอกาสเกิดการแตกร้ามากกว่าเนื้อเชื่อม AWS ER70S-6 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างทางโลหะวิทยา

คำสำคัญ: ความต้านทานการแตกร้าขณะแข็งตัว, วิธีการทดสอบทรานส์วาเรสเตรนธ์, เส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูง

ABSTRACT

This research aims to evaluate weld solidification cracking resistance based on high temperature ductility curve. This approach is able to elucidate the essential factors, namely solidification cracking temperature range (SCTR), critical strain, solidification cracking susceptibility during welding. Two (2) kinds of the weld metals were investigated as a hardfacing MSG 6 GZ-60 and a high strength AWS ER70S-6. Experiments were divided into two (2) parts. Firstly, trans-varestraint test was carried out in order to determine maximum crack length in SCTR. Solidification cracking were stimulated through immediately bending during GTAW welding. Bending strain levels of 0.7-4.1% were employed. Secondly, cooling rate during welding was measured so as to estimate a certain temperature value at the cracking tip. From the relationships between maximum cracking during SCTR and critical strain levels could establish the high temperature ductility curve. It was found that the hardfacing weld metal MSG 6 GZ-60 produced the longest crack. In addition, the high strength weld metal AWS ER70S-6 induced more cracking distributions on entire strain levels. Based on high temperature ductility curve, cracking susceptibility considered through the extensive SCTR, as well as the critical strain, it indicated the most susceptibility, namely MSG 6 GZ-60 and AWS ER70S-6 respectively. Those results was reasonably related to their metallurgical weld morphology.

KEYWORDS: solidification cracking resistance, trans-varestraint test, high temperature ductility curve

1. บทนำ

การแตกร้าวขณะแข็งตัวในรอยเชื่อม (Weld Solidification Cracking) เป็นปัญหาสำคัญส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเชื่อมด้านความสมบูรณ์แข็งแรงของชิ้นส่วนโครงสร้างต่างๆ [1-3] โดยจะเกิดขึ้นในระหว่างช่วงสุดท้ายของการแข็งตัว (Final Stages of Solidification) หรือในสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Mushy Zone) ซึ่งปัจจัยกระตุ้นสำคัญคือการสะสมพลังงานความเครียดและการเกิดฟิล์มของเหลวอยู่ตามขอบเกรน รอยแตกร้าวจะเกิดบริเวณตามขอบเกรน (Intergranular Cracking) หรือ ขอบเดนไดรต์ [4-7] จากการวิจัยที่ผ่านมา [8-12] สามารถแบ่งการทดสอบหาความไว (Susceptibility) ในการแตกร้าวขณะแข็งตัวได้เป็น การแตกร้าวขณะร้อนเนื่องจากแรงกระตุ้นของรูปร่างชิ้นงานทดสอบเอง (Self-Restraint Hot Cracking Test) เช่น วิธี Houldcroft ซึ่งมักถูกใช้ในอลูมิเนียม วิธี Double Fillet Weld Test ในงานเชื่อมฟิลเลท วิธี Sigmajig Test สามารถทราบอิทธิพลระดับการจับยึดขณะเชื่อมได้ เป็นต้น อีกประเภทเป็นการแตกร้าวขณะร้อนเนื่องจากแรงกระตุ้นจากภายนอก (Externally Loaded Hot Cracking Test) เช่น วิธี Programmed Deformation Rate Test (PVR-Test) วิธี Hot Deformation Rate (HDR)-Test และการทดสอบทรานส์ วาเรสเตรนต (Trans-Varestraint Test) [13, 14] เป็นต้น อย่างไรก็ตามผลการศึกษาซึ่งประยุกต์ใช้วิธีดังกล่าวเป็นเพียงการเปรียบเทียบระดับความเสี่ยงในแต่ละวัสดุเท่านั้น โดยพิจารณาความยาวรอยแตกร้าวสูงสุด จำนวนรอยแตกทั้งหมด เป็นต้น ในขณะที่ทฤษฎีของ Prokhorov และ Matsuda [5, 15] ซึ่งเน้นการทำนายการแตกร้าวขณะเชื่อมในทางปฏิบัติ โดยได้อธิบายถึงช่วงอุณหภูมิการแตกร้าวขณะแข็งตัว (Solidification Cracking Temperature Range, SCTR) ที่ระดับความเครียดวิกฤตต่างๆ ซึ่งประกอบขึ้นเป็นขอบเขตการต้านทานการแตกร้าวที่อุณหภูมิสูง หรือ เส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูง (High Temperature Ductility Curve) โดยถ้ามีการสะสมพลังงานความเครียดขณะเชื่อมมากกว่าขอบเขตเส้นโค้งความเหนียวนี้ก็จะทำให้เกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัวขึ้นนั่นเอง จากงานวิจัยของ Matsuda ประยุกต์ใช้วิธี "Means of In-Situ Observation, MISO" ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สังเกตการแตกร้าวขณะแข็งตัวของโลหะเชื่อมจากวิดีโอความเร็วสูง ซึ่งทำให้สามารถหาค่าความเครียดวิกฤตเฉพาะที่ (Local Strain) และวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งเริ่มการแตกร้าวได้ จึงส่งผลให้การประมาณเส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูงได้อย่างแม่นยำขึ้น อย่างไรก็ตามแนวทางดังกล่าวนี้ต้องใช้เครื่องมืออุปกรณ์ราคาแพงและวิธีการที่ซับซ้อนเช่น กล้องบันทึกความเร็วสูง (High Speed Camera) ซอฟต์แวร์ตรวจจับความเคลื่อนไหว เป็นต้น อีกทั้งข้อมูลศึกษาในเนื้อ

เชื่อมมีค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะเนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง และพอกผิวแข็ง ซึ่งใช้ในงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เป็นต้น

ดังนั้นจากปัญหาดังที่กล่าวมานี้ คณะผู้วิจัยจึงมีความมุ่งหมายศึกษาการประเมินการแตกร้าวขณะแข็งตัวของตัวภายใต้ขอบเขตช่วงอุณหภูมิของ SCTR และนำเสนอวิธีการทดสอบเพื่อประมาณค่าขอบเขตความต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัวของเนื้อเชื่อมภายใต้เส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูง ซึ่งข้อมูลนี้จะเป็นประโยชน์ในการประเมินปัจจัยสำคัญด้านช่วงอุณหภูมิการแตกร้าวขณะแข็งตัว ระดับความเครียดวิกฤต รวมทั้งความไวต่อการแตกร้าวด้วย เพื่อคาดการณ์การแตกร้าวขณะเชื่อมต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

การทดลองเชิงเปรียบเทียบประกอบด้วยเนื้อเชื่อม 2 ชนิดจากลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 ตามมาตรฐาน DIN 8555 เปรียบเทียบกับลวดเชื่อมความแข็งแรงสูง เกรด AWS ER70S-6 ซึ่งถูกเชื่อมลงบนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด A 36 ขนาด 200 x 75 x 6 mm เตรียมร่องบากมุม 60 องศา โดยกระบวนการเชื่อมแบบอาร์กโลหะแก๊สปกคลุม (GMAW) ด้วยอัตราการเจือจาง (Dilution Ratio) ระหว่าง 11-16 % และผิวหน้ารอยเชื่อมถูกตัดเรียบด้วยงานเครื่องมือกลอีกครั้ง ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานและเนื้อเชื่อมจาก เครื่องตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ (Emission Spectrometer) สำหรับงานวิจัยนี้

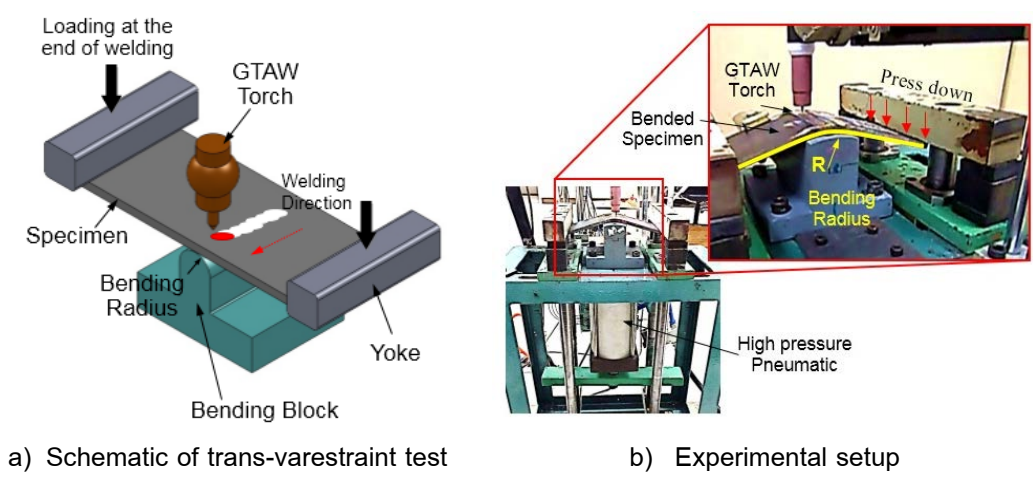
ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานและลวดเชื่อม (% โดยน้ำหนัก)

	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Cu	%Cr	%Ni	%Mo	%V	%N
Base Metal: Mild steel	0.141	0.450	0.016	0.001	0.006	0.005	0.012	0.022	0.001	0.002	0.003
Filler Wire: MSG 6 GZ-60	0.371	0.417	1.797	0.008	0.019	0.085	5.777	0.095	0.027	0.023	-
Filler Wire: ER70S-6	0.088	0.994	0.469	0.013	0.011	0.180	0.054	0.034	0.008	0.002	0.015

2.2 การทดสอบการแตกร้าวขณะแข็งตัว

เมื่อเตรียมชิ้นงานจากขั้นตอนที่แล้ว เนื้อเชื่อมดังกล่าวถูกกระตุ้นให้เกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัวด้วยวิธีการทดสอบทรานส์วาเรสเตรนธ์ ดังแสดงในรูปที่ 1 (a) กล่าวคือ เนื้อเชื่อมจะถูกเชื่อมซ้ำแบบไม่เติมลวดด้วยกระบวนการเชื่อมทั้งสแตนแก๊สเฉื่อยปกคลุม (Autogenous GTAW) เพื่อจำลองการเกิดสภาวะขณะแข็งตัว (Mushy Zone) ของบ่อหลอมเชื่อม จนกระทั่งปลายบ่อ

หลอมเคลื่อนที่อยู่ประมาณกึ่งกลางชิ้นงาน จากนั้นการแตกร้าวจะถูกทำให้เกิดด้วยความเครียดจากการดัดโค้งชิ้นงานอย่างทันทีทันใด แสดงในรูปที่ 1 (b) การทดลองใช้รัศมีการดัด (Bending Radius) แตกต่างกัน 5 รัศมีคือ R70 R120 R200 R300 และ R400 mm ซึ่งถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้เปอร์เซ็นต์ความเครียดเนื่องจากรัศมีการดัดโค้งครอบคลุมการทำให้เกิดจุดเริ่มแตกร้าวมและการแตกร้าวมสูงสุดในระหว่างบ่อหลอมเชื่อมแข็งตัวโดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1 ขณะที่ตัวแปรต้นหรือเปอร์เซ็นต์ความเครียด พารามิเตอร์การเชื่อมและเงื่อนไขการทดลอง ทรานส์วาเรสเตรนต์ แสดงดังตารางที่ 2 โดยเงื่อนไขการทดลองถูกทำซ้ำด้วยชิ้นงาน 3 ชิ้น แล้วใช้ค่าเฉลี่ยของรอยแตกร้าวมสูงสุด



รูปที่ 1 วิธีการทดสอบทรานส์ วาเรสเตรนต์ (Trans-Varestraint Test)

ความเครียดที่เกิดขึ้นจากรัศมีการดัดโค้ง (R) แตกต่างกัน สามารถคำนวณดังสมการที่ 1

$$\epsilon\% = \frac{t}{2R+t} \times 100 \tag{1}$$

โดย $\epsilon\%$ คือ เปอร์เซ็นต์ความเครียด t คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (mm) และ R คือ รัศมีการดัดโค้ง (Bending Block Radius) (mm)

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์การเชื่อมและการทดลอง Trans-Varestraint Test

เงื่อนไขการทดลอง Trans-Varestraint Test	
รัศมีดัดโค้ง (mm)	R70, R120, R200, R300, และ R400
ความเครียด (Augment Strain), %	4.1%, 2.3%, 1.5%, 1.0%, 0.7%
ทิศทางการกด	ขวางแนวเชื่อม (Transverse)
พารามิเตอร์การเชื่อม (Welding Parameters)	
กระบวนการเชื่อม	GTAW
อิเล็กโทรด	W-2ThO ₂ , ϕ 2.4 mm
กระแสไฟ (Current), แอมแปร์	150
ขั้วไฟฟ้า (Polarity)	DCEN
ความเร็วเชื่อม (Welding Speed), mm/sec	0.7
แก๊สปกคลุม (Shielding Gas)	อาร์กอน 99.9% อัตราการไหล 10 L/min

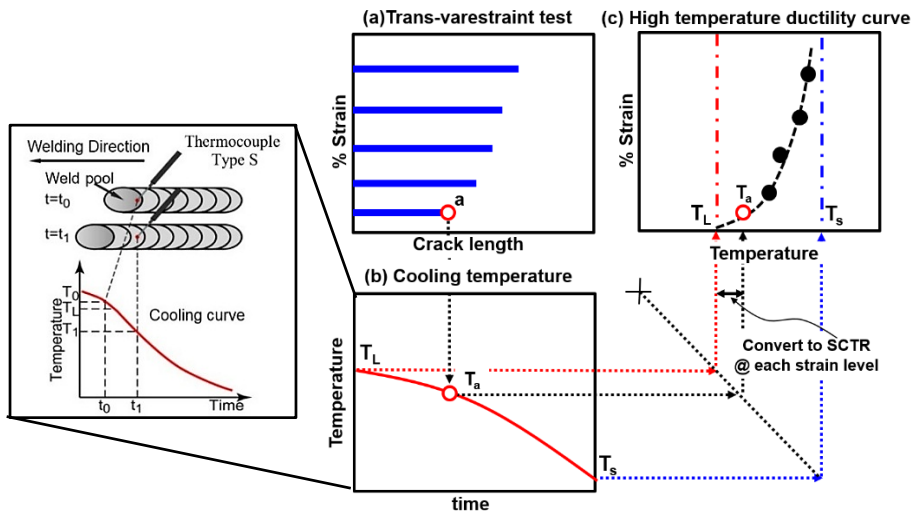
2.3 การหาค่าขอบเขตการแตกร้าว ณ อุณหภูมิสูง จากเส้นโค้งความเหนียว

หลังจากทดสอบทรานส์วาเรสเตรนจ์แล้ว ความยาวรอยแตกร้าวสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับความเครียดจะถูกวัดขนาดตามแนวยาวรอยเชื่อมด้วยกล้องไมโครสโคป (Optical Microscope) และโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Material Plus Image Analysis ต่อมาภายใต้พารามิเตอร์การเชื่อมเดียวกัน อุณหภูมิการเย็นตัวขณะเชื่อม (Cooling Curve) ณ ตำแหน่งกึ่งกลางแนวเชื่อมถูกวัดด้วยการจุ่มเทอร์โมคัปเปิล Type S ลงในบ่อหลอม (Weld Pool) อย่างทันทีทันใด และบันทึกในอุปกรณ์เก็บข้อมูล (Data Logger) ยี่ห้อ MIDI Logger รุ่น GL900 ดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนั้นจากความสัมพันธ์ระหว่างความยาวรอยแตกร้าวสูงสุดที่ระดับความเครียดใดๆและอุณหภูมิการเย็นตัวตลอดกึ่งกลางแนวเชื่อมจะสามารถนำมาประมาณค่าขอบเขตความต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัว ณ อุณหภูมิต่างๆได้ ยกตัวอย่างเช่น ที่ระดับความเครียดใดๆเกิดความยาวรอยแตกร้าวสูงสุดเท่ากับ a (รูปที่ 2a) จากนั้นประมาณค่าอุณหภูมิสิ้นสุดการขยายตัวของรอยแตกร้าวนี้จากเส้นโค้งการเย็นตัวของแนวเชื่อมได้เท่ากับ T_a (รูปที่ 2b) จากนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงอุณหภูมิเกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัว (SCTR) ณ ระดับความเครียดนั้นๆ ขณะเชื่อม (รูปที่ 2c) โดยจะทำซ้ำเช่นนี้ ณ ระดับความเครียดอื่นไปเรื่อยๆ ซึ่งจะสามารถสร้างเส้นโค้งความเหนียวของการแตกร้าวขณะแข็งตัวนั่นเอง

โดยความไวในการแตกร้าวขณะแข็งตัวเชิงปริมาณจะถูกประเมินผ่านเส้นโค้งความเหนียวนี้ ซึ่งสามารถอธิบายอิทธิพลทั้งด้านช่วงอุณหภูมิ SCTR ของเนื้อเชื่อมและขีดจำกัดความเครียดขณะ

เชื่อม เช่น ระดับการจับยึด การหดตัว การออกแบบรอยต่อที่เหมาะสม เป็นต้น ช่วงอุณหภูมิเกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัว (SCTR) สามารถคำนวณหาจากความสัมพันธ์ของอัตราการเย็นตัว (CR) ความยาวรอยแตกร้าว (CL) และความเร็วเชื่อม (Vw) ดังสมการที่ 2 ต่อไปนี้

$$SCTR = CR \times \frac{CL}{Vw} \tag{2}$$

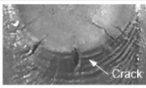
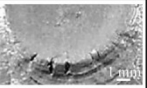
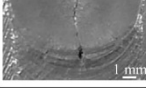

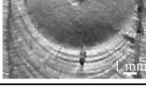
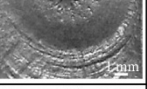
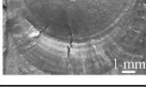
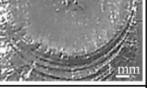
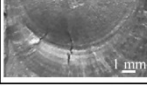
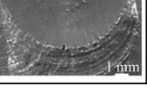


รูปที่ 2 การประมาณค่าขอบเขตความต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัว SCTR

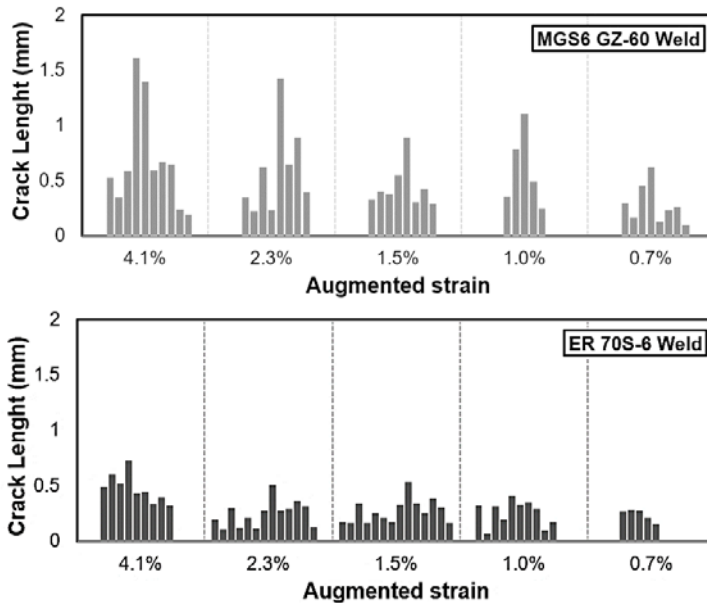
3. ผลการวิจัย

3.1 การประเมินการแตกร้าวขณะแข็งตัว

รูปที่ 3 แสดงลักษณะการกระจายตัวของรอยแตกร้าวของเนื้อเชื่อมทั้ง 2 ชนิด ณ ระดับความเครียด 0.7-4.1 % หลังการทดสอบด้วยทรานส์วาเรสเตรนจ์ พบว่าเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 ปรากฏรอยแตกร้าวขณะแข็งตัวอย่างชัดเจนในทุกระดับความเครียด รอยแตกร้าวมีขนาดยาวกว่าและขยายเข้าไปในบริเวณบ่อหลอมเชื่อม ซึ่งบ่งชี้ถึงความรุนแรงต่อการเกิดแตกร้าวขณะแข็ง อย่างไรก็ตามเนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง ER70S-6 รอยแตกร้าวปรากฏชัดเจนที่ระดับความเครียดสูงตั้งแต่ 2.3 % ขึ้นไปรวมทั้งมีขนาดที่สั้นกว่า

Augmented strain	Tested materials	
	Hard facing MSG 6 GZ-60	High strength ER70S-6
4.1%		
2.3%		
1.5%		
1.0%		
0.7%		

รูปที่ 3 เปรียบเทียบรอยแตกในตัวเชื่อม 2 ชนิด ณ ระดับความเครียดต่าง ๆ



รูปที่ 4 เปรียบเทียบการกระจายตัวของรอยแตกในตัวเชื่อม

เมื่อเปรียบเทียบเชิงปริมาณด้วยกล่องไมโครสโคปและโปรแกรมวิเคราะห์ภาพดังในรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนและความยาวรอยแตกที่ระดับความเครียดต่าง ๆ พบว่าเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 เผยลักษณะการแตกในตัวเชื่อมช่วงโลหะแข็งตัวหลังบ่อหลอม

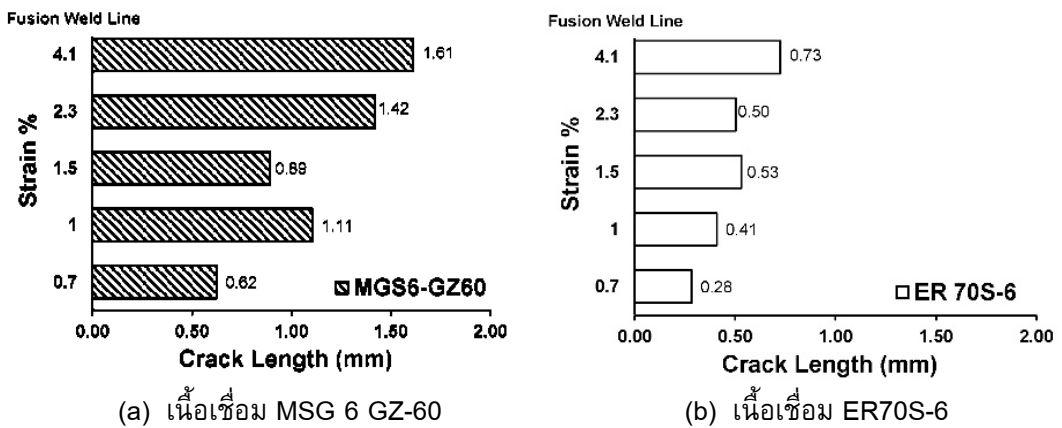
(Mushy Zone) มีจำนวนรอยแตกร้าวกระจายทั้งหมด 39 รอยแตก และมีความยาวสูงสุด 1.61 mm ที่ระดับความเครียด 4.1% โดยความยาวรอยแตกร้าวสูงสุดของแต่ละระดับความเครียดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระดับความเครียดที่สูงขึ้น ขณะที่เนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง ER70S-6 เกิดรอยแตกกระจายจำนวนมากกว่าคือ 51 รอยแตก แต่ความรอยแตกร้าวสูงสุดเพียง 0.73 mm สังเกตได้ว่าถึงแม้เนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 จะมีการแตกร้าวที่รุนแรงซึ่งขนาดยาวสูงสุดประมาณสองเท่าของเนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง ER70S-6 ในทางตรงกันข้ามเนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง ER70S-6 มีโอกาสเกิดรอยแตกกระจายตัวในปริมาณมากกว่าที่ระดับแรงกระตุ้นโดยการโค้งดัดขณะเชื่อมเท่ากัน

3.2 การประเมินขอบเขตความต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัวด้วยเส้นโค้งความเหนียว อุณหภูมิสูง

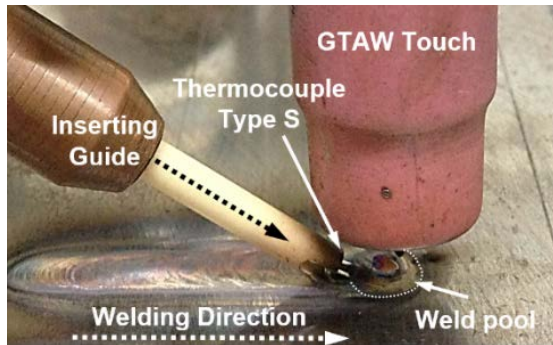
ดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อที่ 2.3 ความยาวรอยแตกร้าวสูงสุดในแต่ละระดับความเครียดตั้งแต่ 0.7-4.1% ถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5 สังเกตได้ว่าเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 มีการขยายตัวของรอยแตกร้าวมากกว่าในทุกะดับแรงกระตุ้น ขณะที่เนื้อเชื่อม ER70S-6 ขนาดรอยแตกร้าวค่อนข้างคงที่เมื่อระดับความเครียดสูงกว่า 1.0 % ขึ้นไป อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบความไวในการแตกร้าว (Cracking Susceptibility) โดยพิจารณาเฉพาะความยาวรอยแตกร้าวอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอ เนื่องจากการแตกร้าวจะขยายตัวสูงสุดภายในช่วงอุณหภูมิโลหะแข็งตัวซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเช่น สมบัติทางการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ขนาดของบ่อหลอมเชื่อม ช่วงอุณหภูมิที่แข็งกึ่งเหลว เป็นต้น ดังนั้นเพื่อพิจารณาปัจจัยต่างๆ นี้จึงได้ทดลองวัดอุณหภูมิการเย็นตัวหลังบ่อหลอมเชื่อมด้วยการจุ่มเทอร์โมคัปเปิลอย่างทันทีทันใด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางแนวเชื่อมดังในรูปที่ 6 ผลจากเส้นโค้งการเย็นตัว (Temperature History) ดังรูปที่ 7 ซึ่งเมื่ออาศัยความชันระหว่างผลต่างของอุณหภูมิต่อเวลา (Differential Temperature to Time) ทำให้ทราบตำแหน่งเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอิทธิพลความร้อนแฝง (Latent Heat) ซึ่งสามารถประมาณจุดหลอมเหลวของเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 เท่ากับ 1394 °C และเนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง ER70S-6 เท่ากับ 1476 °C โดยอุณหภูมิเย็นตัวภายหลังจุดหลอมเหลวนี้ถูกนำมาคาดการณ์ขอบเขตการขยายตัวของปลายรอยแตกร้าวต่างๆ หรือขอบเขตความต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัวนั่นเอง

จากรูปที่ 8 แสดงเส้นการประมาณค่าขอบเขตช่วงอุณหภูมิเกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัวที่ระดับความเครียดวิกฤติที่อุณหภูมิสูง หรือ เส้นโค้งความเหนียว พบว่าเส้นค่าขอบเขต SCTR ของเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG6 GZ-60 มีขอบเขตที่กว้างกว่าเนื้อเชื่อม ER70S-6 ขณะเดียวกันก็มีขอบเขตการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำด้วย ซึ่งส่งผลต่อโอกาสเกิดการแตกร้าวขณะแข็งตัวเนื่องจากค่า

ขอบเขต SCTR ที่กว้างขึ้นแสดงถึงช่วงสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่มากตามไปด้วยทำให้มีแนวโน้มที่ขอบเกรนจะแยกจากกันได้ง่ายขึ้นขณะกำลังแข็งตัว (Solidification) [16] ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาแรงกระตุ้นจากอัตราการความเครียดวิกฤติต่ำสุดที่จะเกิดการแตกร้าว (Critical strain for temperature drop, CST) พบว่าเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 มีค่าเท่ากับ 0.005 /°C ขณะที่เนื้อเชื่อม ER70S-6 ใช้แรงกระตุ้นมากกว่าคือ 0.006 /°C จากผลดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 มีค่าต้านทานการแตกร้าวขณะแข็งตัวที่ต่ำกว่าเนื่องจากช่วงอุณหภูมิการแข็งตัวที่กว้างและอัตราการความเครียดวิกฤติน้อย



รูปที่ 5 ความยาวรอยแตกร้าวสูงสุดที่ระดับความเครียดต่าง ๆ

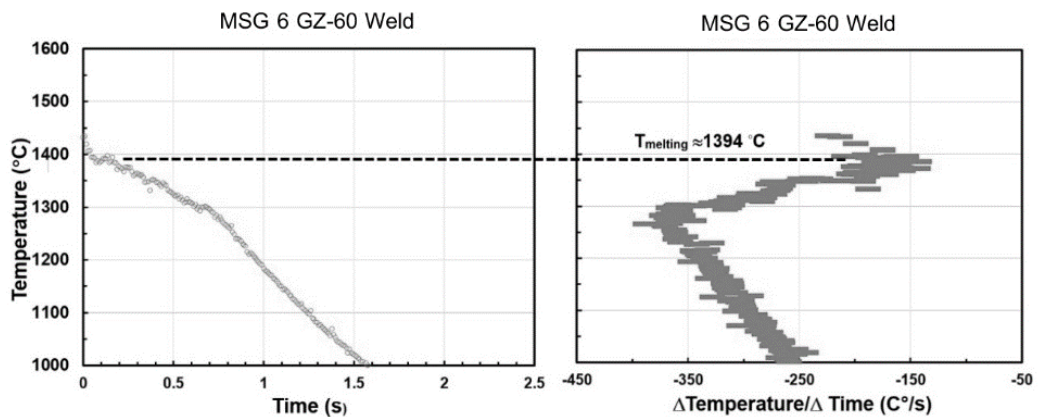


รูปที่ 6 การวัดอัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อม

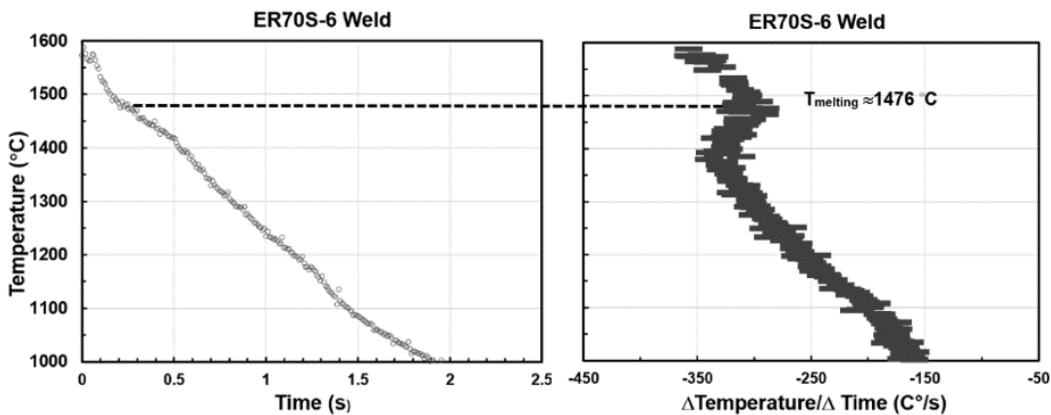
3.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค

ภายหลังทดสอบ Trans-Varestraint Test ผิวด้านบนรอยแตกร้าวถูกขัดลีกลงประมาณ 0.5 mm เพื่อตรวจพินิจทางจุลภาคดังรูปที่ 9 และ 10 แสดงโครงสร้างทางจุลภาครอยแตกร้าว ณ

ตำแหน่งประมาณกึ่งกลางเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 และ ER70S-6 ตามลำดับ ที่ระดับความเครียด 4.1 % ลักษณะเป็นการแตกร้าวตามขอบเกรน (Intergranular Cracking) และค่อนข้างโค้งมนตามขอบรอยแตกหัก จากหลักฐานดังกล่าวบ่งชี้ว่าการแตกร้าวนี้เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิขณะแข็งตัว (Solidification Temperature Range) เมื่อพิจารณาเนื้อเชื่อม MSG 6 GZ-60 พบว่าจะปรากฏขนาดเกรนที่ใหญ่กว่าและการขยายตัวของรอยแตกร้าวกะจายรอบขอบเกรน เมื่อเทียบกับเนื้อเชื่อม ER70S-6 ที่มีเกรนขนาดเล็กละเอียดกว่าซึ่งบ่งชี้ว่าเกรนละเอียดมีความต้านทานการแตกร้าวนั้นได้ดีกว่านั่นเอง [17]

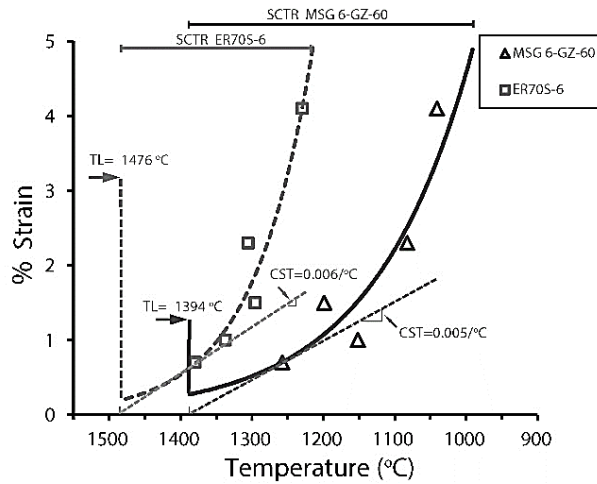


(a) เนื้อเชื่อม MSG 6 GZ-60

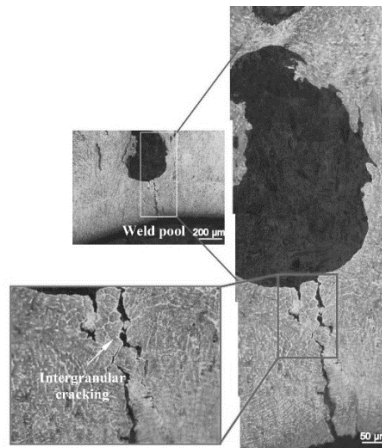


(b) เนื้อเชื่อม ER70S-6

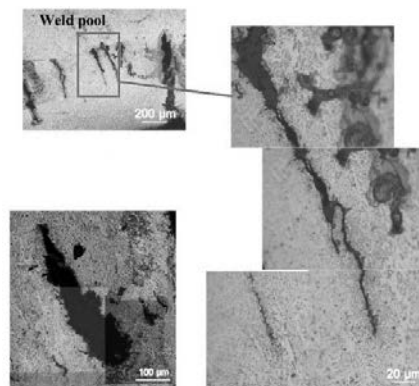
รูปที่ 7 อุณหภูมิการเย็นตัวของแนวเชื่อม (เนื้อเชื่อม MSG 6 GZ-60)



รูปที่ 8 ขอบเขตความต้านทานการแตกร้าขณะแข็งตัว



รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาค ณ บริเวณรอยแตกร้าในเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60



รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาค ณ บริเวณรอยแตกร้าในเนื้อเชื่อม ER70S-6

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการวิจัยการประเมินค่าขอบเขตความต้านทานการแตกร้าาวขณะแข็งตัวของเนื้อเชื่อม 2 ชนิด ภายใต้เส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูง สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการทดสอบทรานส์วาเรสเตรนธ์พบว่าเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 มีการขยายตัวของรอยแตกร้าาวสูงที่สุดมากกว่าเนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง ER70S-6 แต่ในทางกลับกันเนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง ER70S-6 มีการกระจายตัวของจำนวนรอยแตกร้าาวมากกว่าเกือบทุกระดับความเครียด

2. การประเมินค่าขอบเขตความต้านทานการแตกร้าาวขณะแข็งตัวของเนื้อเชื่อมภายใต้เส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูง บ่งชี้ว่า ขอบเขตเส้นโค้งความเหนียว ณ อุณหภูมิสูงของเนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 มีช่วงอุณหภูมิ SCTR ที่กว้างและอุณหภูมิต่ำกว่า รวมทั้งเมื่อพิจารณาแรงกระตุ้นจากอัตราความเครียดวิกฤติต่ำสุด (CST) บ่งชี้ถึงโอกาสที่จะเกิดการแตกร้าาวจากการแยกตัวตามขอบเกรนได้ง่ายกว่าขณะแนวเชื่อมเย็นตัว

3. ผลทางโครงสร้างทางจุลภาคของรอยแตกร้าาวของเนื้อเชื่อมบ่งชี้ว่าเป็นการแตกร้าาวขณะแข็งตัวเกิดขึ้นตามขอบเกรน เนื้อเชื่อมพอกผิวแข็ง MSG 6 GZ-60 มีเกรดโตและหยาบกว่าเนื้อเชื่อมความแข็งแรงสูง ER70S-6 มีผลทำให้การแตกร้าาวขยายตัวได้ง่ายกว่าขณะร้อนซึ่งสอดคล้องกับผลการประเมินค่าขอบเขตความต้านทานการแตกร้าาวขณะแข็งตัวหรือขอบเขตเส้นโค้งความเหนียว

ข้อมูลค่าขอบเขตความต้านทานการแตกร้าาวขณะแข็งตัวของการวิจัยนี้จะมีประโยชน์ในการคาดการณ์การแตกร้าาวขณะแข็งตัว เมื่อทราบค่าอัตราความเครียดขณะเชื่อม เช่น จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Computational Simulation) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ออกแบบรอยเชื่อมเพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าาวขณะเชื่อมต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาและสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมืออุปกรณ์และสนับสนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

References

- [1] Hashimoto T, Terasaki H, Komizo Y-i. Solidification cracking susceptibility of alloy tool steel under rapid solidification. Quarterly Journal of the Japan Welding Society 2009;27(2):126s-9s.

- [2] Liu W. Computational analysis and prediction of weld-solidification cracking. *Computational Materials Science* 1995;4(3):211-9.
- [3] Matsuda F et al. Quantitative evaluation of solidification brittleness of weld metal during solidification by means of In-Situ observation and measurement (Report I): Development of the MISO Technique (Materials, Metallurgy & Weldability). *Transactions of JWRI* 1983;12(1):65-72.
- [4] Lippold JC. *Welding metallurgy and weldability*. New Jersey: John Wiley & Sons; 2015.
- [5] Prokhorov NN. The technological strength of metals while crystallizing during welding. *Welding Production* 1962;9(4):1-8.
- [6] Liu R-p, Dong Z-j, Pan Y-m. Solidification crack susceptibility of aluminum alloy weld metals. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2006;16(1):110-6.
- [7] Pisan I, Jesada K, Sutham S, Rittichai P, editor *Evaluation of Solidification Cracking Susceptibility in S50C and SS400 Carbon Steels Based on Solidification Cracking Temperature Range The Conference of Thailand Welding and Inspection Thailand (TWIT2017)* 2017; 11-12 November 2017, Sand Dunes Chaolao Beach Resort, Chanthaburi, Thailand.
- [8] Houldcroft PT. A simple cracking test for use with argon-arc welding. *Brit Weld J* 1955;2: 471-5.
- [9] DIN EN ISO 17641 *Destructive tests on welds in metallic materials-hot cracking tests for weldments-arc welding processes part 1-3*; 2005.
- [10] Goodwin GM. Development of a new hot-cracking test - the Sigmajig. *Weld J* 1987;66: 33-8.
- [11] Kannengiesser T, Boellinghaus T. Hot cracking tests - an overview of present technologies and applications. *Welding in the World* 2014;58(3):397-421.
- [12] Phaoniam R, Shinozaki K, et al. Solidification cracking susceptibility of modified 9Cr1Mo steel weld metal during hot-wire laser welding with a narrow gap groove. *Welding in the World* 2014;58(4):469-76.
- [13] Lippold JC et al. Weld Solidification Cracking in Solid-Solution Strengthened Ni-Base Filler Metals. In: Böllinghaus T, Herold H, Cross CE, Lippold JC, editors. *Hot Cracking Phenomena in Welds II*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2008. p. 147-70.

- [14] Lippold JC. Recent Developments in Weldability Testing. In: Böllinghaus T, Herold H, editors. Hot Cracking Phenomena in Welds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2005. p. 271-90.
- [15] Matsuda F et al. Quantitative evaluation of solidification brittleness of weld metal during solidification by in-situ observation and measurement (Rpt. 3). Transactions JWRI 1986; 15(2).
- [16] Aucott L, et al. A Three-Stage Mechanistic Model for Solidification Cracking During Welding of Steel. Metallurgical and Materials Transactions A 2018;49(5):1674-82.
- [17] Lei Z, et al. Mechanism of the crack formation and suppression in laser-MAG hybrid welded 30CrMnSiA joints. Journal of Materials Processing Technology 2017;239:187-94.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ฤทธิชัย เปาเนียม ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ E-mail:
rittichai.p@mail.rmutk.ac.th



ไพศาล อินประจง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ E-mail:
paisan_20@hotmail.com



เจษฎา แก้ววิชิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ E-mail:
Jesada.kt@hotmail.com

การแก้ปัญหาจ่ายโหลดอย่างประหยัดของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน
โดยใช้เทคนิคการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีแมงช้าง
SOLVING ECONOMIC DISPATCH PROBLEM OF A THERMAL POWER
PLANT USING ANTLION OPTIMIZATION TECHNIQUE

จิรพันธ์ ทาแกง¹, วันไชย คำเสน² และ อภินันท์ อูร์โสภณ³

^{1,2}อาจารย์, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ลำปาง 200 หมู่ 17 ตำบลพิชัย อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง 52000,

¹chiraphon@rmutl.ac.th, ²wanchai_kh@rmutl.ac.th

³อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
41/20 ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150, aurasopon@yahoo.com

Chiraphon Takeang¹, Wanchai Khamseen² and Apinan Aurasopon³

^{1,2}Lecturer, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Lampang,
200 Moo 17, Phichai Sub-District, Muang District, Lampang 52000, Thailand,

¹chiraphon@rmutl.ac.th, ²wanchai_kh@rmutl.ac.th

³Lecturer, Faculty of Engineering, Maha Sarakham University, 41/20 Kham Rieng
Sub-District, Kantharawichai district, Maha sarakham 44150, Thailand, aurasopon@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดที่มีฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงเป็นแบบเรียบ ด้วยเทคนิคใหม่ที่เรียกว่า การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีแมงช้าง (ANTLION OPTIMIZATION TECHNIQUE: ALO) เป็นเทคนิคการค้นหาคำตอบที่เลียนแบบการหาอาหารของตัวอ่อนแมงช้างที่จะขุดหลุมทรงกรวยเป็นกับดักเพื่อหาอาหาร ในระบบทดสอบได้พิจารณาถึงความต้องการของระบบไฟฟ้า ค่าสูญเสียในสายส่ง และเงื่อนไขข้อบังคับต่างๆ ของระบบ การจำลองใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองการทำงาน และทดสอบกับกรณีศึกษาที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 6 หน่วย และระบบที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 15 หน่วย เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการที่ ALO ได้ทำการเปรียบเทียบผลกับวิธี SAO, PSO และวิธี HLBCO ในกรณีศึกษาที่ 1 และกรณีศึกษาที่ 2 ได้ทดสอบเปรียบเทียบกับวิธี BCO, MBCO และ PSO จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าวิธีการที่นำเสนอมีความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบที่ดี

และในแง่ของต้นทุนการผลิตรวมวิธีการที่นำเสนอมีค่าของต้นทุนการผลิตรวมต่ำกว่าวิธีที่นำมาเปรียบเทียบในทั้งสองกรณี ดังนั้นจึงเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่ง

คำสำคัญ: เทคนิคการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีแมงซ้าง, การจ่ายโหลดอย่างประหยัด, ฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงแบบเรียบ

ABSTRACT

This paper presents the optimization to solve the economical load problem with a smooth-cost function. With a new technique called ANTLION OPTIMIZATION TECHNIQUE: ALO. It is a technique to find the answers that mimic the feeding of the larvae of the antlion to dig a cone hole into a trap for food. In the test system, the system needs to be considered, losses in transmission line and conditions of the system. Use MATLAB program to simulate the operation. Experiment with a case study consisting of 3 generators and a system consisting of 6 generators. The evaluation of the efficiency of the method by ALO compared the results with the SAO, PSO and HLBCO methods in case study 1 and case study 2 compared with BCO, MBCO and PSO. Based on the test results, it can be concluded that the proposed method has convergent speed approaching good answers and in terms of total cost of production. The proposed method has a lower total cost of production than the comparison method in both cases. So it's an effective method.

KEYWORDS: antlion optimization technique, economic dispatch, smooth-cost function

1. บทนำ

ต้นทุนการดำเนินงานของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับต้นทุนเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจะลดลงโดยการวางแผนการผลิตและการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม การจัดส่งกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดจะสามารถกำหนดกำลังการผลิตของพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอกับความต้องการในขณะที่มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละหน่วยที่ผลิตกำลังไฟฟ้า ปัญหาดังกล่าว เรียกว่าปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch Problem: ED) ED กลายเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับการดำเนินงานและการวางแผนการผลิต วัตถุประสงค์หลักของปัญหา ED ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าคือการวางแผนการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อให้ได้ตามความต้องการของระบบสามารถรองรับความต้องการการใช้พลังไฟฟ้าได้ในราคาที่ต่ำที่สุด โดยจะต้องอยู่ในเงื่อนไข ขอบเขตและข้อจำกัดการทำงานของระบบและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในอดีตที่ผ่านมามีความพยายามในการแก้ไขปัญหา ED มากมายหลายวิธี ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์และวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Methods) เช่นวิธี Lamda Iteration [1], Lagrangian relaxation [2], gradient method [3], dynamic programming [4], linear programming [5] และ nonlinear programming [6] วิธีการเหล่านี้เป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้แก้ปัญหา ED ซึ่งได้ผลดีในระดับหนึ่ง แต่คำตอบที่ได้มักจะต้องติดอยู่กับคำตอบที่เป็น Local ซึ่งเป็นคำตอบที่อาจจะยังไม่ใช่อันดับที่ดีที่สุด นอกจากนี้วิธีการแบบดั้งเดิมยังขาดความสามารถในการคำนวณเมื่อระบบมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน เมื่อไม่นานมานี้มีวิธีที่ได้รับการคิดค้นและพัฒนาเพื่อแก้ปัญหา ED นั่นคือวิธีเมตาฮีริสติกส์ (meta-heuristics) เป็นวิธีที่เลียนแบบพฤติกรรมกรรมการหาอาหารของสิ่งมีชีวิตหรือระบบและกลไกตามธรรมชาติ เช่น วิธีการทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) [7] เป็นวิธีที่เลียนแบบการพัฒนาสายพันธุ์เพื่อคัดเลือกสายพันธุ์ที่ดีที่สุด วิธีอนุภาคกลุ่ม (Particle Swarm Optimization: PSO) [8] โดยศึกษาจากพฤติกรรมทางสังคม การหาอาหารของนกหรือปลา วิธีการอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization: ACO) [9] เป็นวิธีที่สังเกตเส้นทางในการหาอาหารของฝูงมด การค้นหาแบบตาบอด (Tabu Search: TS) [10] วิธีนี้จะจดจำคำตอบที่ผ่านมาและห้ามคำตอบใหม่ไม่ให้กลับไปคำตอบเดิมซึ่งด้อยกว่า วิธีการแบบนกกาเหว่า (Cuckoo Search Algorithm: CSA) [11] วิธีการนี้เลียนแบบพฤติกรรมของกาฝากบางสายพันธุ์และพฤติกรรมการบินของนกและแมลงบางชนิดเพื่อหาอาหาร การจำลองการอบเหนียวของโลหะ (simulation annealing: SA) [12] วิธีการนี้เป็นการจำลองการลดอุณหภูมิของโลหะคำตอบที่ได้จะเปลี่ยนไปหากค่าของคำตอบเป็นค่าที่ดีกว่าค่าเดิม วิธีอาณานิคมผึ้ง (Bee Colony Optimization: BCO) [13] เป็นการเลียนแบบพฤติกรรมกรรมการหาน้ำหวานของฝูงผึ้งและ วิธี Vortex Search Algorithm (VSA) [14] เป็นเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ได้รับแรงบันดาลใจจากการกวนวัสดุเหลว เมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีการพัฒนาอัลกอริทึมการค้นหา meta-heuristic วิธีใหม่มีนักเรียกเรียกว่า Ant Lion Optimization (ALO) ซึ่งได้รับการพัฒนาโดย Seyedali Mirjalili ในปี 2015 [15] ALO เป็นวิธีการใหม่ ขั้นตอนไม่ซับซ้อน และมีพารามิเตอร์ในการตั้งค่าไม่มาก โดยเลียนแบบพฤติกรรมที่ชาญฉลาดของแมงซ่างในการล่ามดซึ่งเป็นอาหารในธรรมชาติ ALO ใช้เป็นแนวทางและทางเลือกในการแก้ปัญหา ED โดยพิจารณาถึงเงื่อนไขข้อบังคับของระบบ ตลอดจนการสูญเสียในสายส่ง ความเป็นไปได้ของวิธีการที่น่าเสนอแสดงให้เห็นในระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิด 6 หน่วย และเครื่องกำเนิด 15 หน่วย ผลที่ได้รับจากอัลกอริทึมที่น่าเสนอถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับวิธี PSO, BCO และ VSA

2. ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัด

การจ่ายโหลดอย่างประหยัดแบบสเตติคส์ เป็นการวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ เวลาใดเวลาหนึ่งเท่านั้น ว่าเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องควรผลิตกำลังไฟฟ้าเท่าไรที่

ใช้ต้นทุนการผลิตน้อยที่สุด และสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับต่าง ๆ ของระบบ ซึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย [1] ดังสมการที่ 1

$$\text{Minimize : } TC = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (1)$$

โดยที่ TC คือ ต้นทุนรวมในการผลิตกำลังไฟฟ้า

i คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องที่ i

N คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบทั้งหมด

$F_i(P_i)$ คือ ต้นทุนของเชื้อเพลิงการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

2.1 ลักษณะของฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเรียบ (Smooth Cost) การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อน จึงได้มีการกำหนดฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันกำลังสอง [1] ดังสมการที่ 2

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2)$$

โดยที่ a , b และ c คือสัมประสิทธิ์ราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

2.2 เงื่อนไขบังคับ (Constraint) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1) ข้อจำกัดกำลังไฟฟ้าสมดุลของระบบ (Power Balance Constraint) คือ กำลังการผลิตไฟฟ้าทั้งหมดเท่ากับผลรวมของความต้องการปริมาณไฟฟ้า (Demand) กับกำลังสูญเสียรวมในระบบส่งจ่าย (Power Losses) ดังสมการที่ 3 และสมการที่ 4 [1]

$$\sum_{i=1}^N (P_i) = P_D + P_{loss} \quad (3)$$

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j + \sum_{j=1}^N B_{0i} P_i + B_{00} \quad (4)$$

โดยที่ P_i คือ กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

P_D คือ กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการ

P_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง

B_{ij} , B_{0i} และ B_{00} คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียของสายส่ง

2) ข้อจำกัดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [1] คือ กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละเครื่องต้องอยู่ในขีดจำกัดกำลังการผลิตต่ำสุดและสูงสุดดังสมการที่ 5

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (5)$$

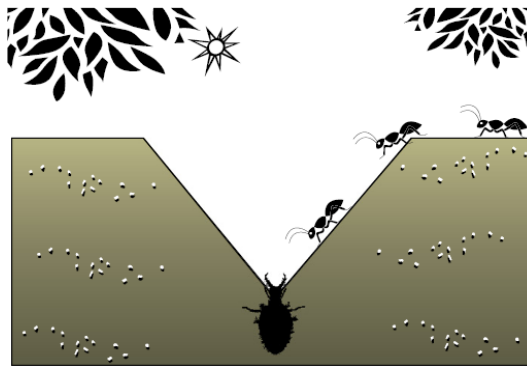
โดยที่ $P_{i,\min}$ และ $P_{i,\max}$ คือกำลังการผลิตต่ำสุดและสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า i

3. วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวิธีแมงช้าง (Ant Lion Optimization)

ALO เป็นแนวคิดใหม่ที่ได้รับแรงบันดาลใจจากธรรมชาติ คิดค้นโดย Sayedali Mirjalili ในปี 2015 อัลกอริทึม ALO เลียนแบบกลไกการล่าสัตว์ของแมงช้างในธรรมชาติ โดยวงจรชีวิตของแมงช้างประกอบด้วยสองช่วงชีวิตหลักคือช่วงตัวอ่อนและตัวเต็มวัย แมงช้างมีวงจรชีวิตอยู่ในธรรมชาติประมาณ 1-2 ปีซึ่งส่วนใหญ่จะล่าสัตว์ในขณะที่เป็นตัวอ่อนและช่วงวัยสำหรับการสืบพันธุ์ ตัวอ่อนของแมงช้างจะขุดหลุมรูปกรวยไว้ในทรายโดยมีการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางวงกลมและโยนทรายออกด้วยกรามขนาดใหญ่ตั้งรูปที่ 1 ซึ่งแสดงหลุมกรวยที่มีขนาดแตกต่างกัน



รูปที่ 1 กรวยทรายกับดักของแมงช้าง



รูปที่ 2 ตัวอ่อนซ่อนในตัวได้กรวย

หลังจากที่ซุกกับดักตัวอ่อนจะซ่อนตัวอยู่ใต้กันกรวยดังรูปที่ 2 [15] ขอบของกรวยมีความชันมากพอที่มดหรือแมลงจะหล่นลงไปด้านล่างของกับดักรูปกรวยได้อย่างง่ายดาย เมื่อแมงข้างรู้ตัวว่าเหยื่ออยู่ในกับดักมันจะใช้ขากรรไกรยึดตัวเหยื่อไว้ อย่างไรก็ตามเหยื่อมักไม่ติดทันทีและพยายามหลบหนีจากกับดัก ในกรณีนี้แมงข้างจะโยนทรายไปทางขอบหลุมเพื่อให้เหยื่อไหลลงไปที่ด้านล่างของหลุม เมื่อเหยื่อถูกหนีบด้วยขากรรไกรจะถูกดึงลงใต้พื้นดินทันทีและถูกฆ่า หลังจากกินเหยื่อแมงข้างจะโยนเศษเหยื่อทิ้งไว้ข้างนอกหลุมและแก้ไขหลุมสำหรับการล่าสัตว์ต่อไป แรงบันดาลใจหลักของอัลกอริทึม ALO มาจากพฤติกรรมกรรมการหาอาหารช่วงที่เป็นตัวอ่อนของแมงข้าง โดนจะแบ่งออกเป็นห้าขั้นตอนหลักคือ การสุ่มทางเดินของเหยื่อหรือมด (random walk of ants), โครงสร้างกับดักรูปกรวย (building traps), กักขังมดในกับดักรูปกรวย (entrapment of ants in traps), จับเหยื่อ (catching preys) และ สร้างกับดักรูปกรวยใหม่ (re-building traps) ในส่วนย่อยของพฤติกรรมของแมงข้างและเหยื่อของมันจะถูกอธิบายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และอธิบายได้ดังนี้

3.1 สุ่มทางเดินของมด (Random Walk of Ants)

อัลกอริทึม ALO เลียนแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างแมงข้างกับมดในกับดัก สำหรับรูปแบบการปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวมดจะต้องเคลื่อนที่หรือเดินผ่านกับดักและแมงข้างทำการล่าเหยื่อโดยใช้กับดักที่สร้างขึ้น เนื่องจากมดเคลื่อนที่ไปอย่างไม่เป็นระบบในธรรมชาติเพื่อค้นหาอาหารการเดินทางของมดจึงเกิดขึ้นแบบสุ่ม รูปแบบการเคลื่อนที่แบบสุ่มของมดแสดงดังสมการที่ 6

$$X(t) = [0, \text{cums}(2r(t_1) - 1), \text{cums}(2r(t_2) - 1), \dots, \text{cums}(2r(t_n) - 1)] \quad (6)$$

โดยที่ *cums* คือผลรวมสะสม, *n* คือจำนวนซ้ำสูงสุด, *t* คือสแต็ปของการเดินแบบสุ่ม และ *r(t)* เป็นฟังก์ชันแบบสุ่มที่กำหนดไว้ดังสมการที่ 7

$$r(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } \dots rand > 0.5 \\ 0, & \text{if } \dots rand \leq 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

เมื่อ t คือขั้นตอนของการเดินแบบสุ่ม และ $rand$ เป็นจำนวนสุ่มที่สร้างขึ้นโดยมีการกระจายสม่ำเสมออยู่ในช่วงของ $[0, 1]$ และตำแหน่งของมดจะถูกเก็บไว้ในเมตริกซ์ดังสมการที่ 8

$$M_{ant} = \begin{bmatrix} ant_{1,1} & ant_{1,2} & \dots & ant_{1,d} \\ ant_{2,1} & ant_{2,2} & \dots & ant_{2,d} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ ant_{n,1} & ant_{n,2} & \dots & ant_{n,d} \end{bmatrix} \quad (8)$$

เมื่อ M_{ant} คือเมตริกซ์เพื่อบันทึกตำแหน่งของมดแต่ละตัว, $ant_{i,j}$ คือค่าของตัวแปร i และ j คือมิติของตำแหน่งของมดในเมตริกซ์, n คือจำนวนมดและ d คือจำนวนตัวแปร

ในระหว่างกระบวนการสุ่มและเก็บค่าในเมตริกซ์ M_{ant} จะบันทึกตำแหน่งของมดทั้งหมด (ตัวแปรของโซลูชันทั้งหมด) การเดินสุ่มของมดจะถูกควบคุมให้อยู่ในขอบเขตภายในพื้นที่การค้นหาโดยใช้สมการที่ 9

$$X_i^t = \frac{(X_i^t - a_i) \times (d_i - c_i^t)}{(d_i - a_i)} + c_i \quad (9)$$

เมื่อ a_i คือค่าต่ำสุดของการเดินแบบสุ่มของตัวแปร i^{th} , d_i คือค่าสูงสุดของการเดินแบบสุ่มของตัวแปร i^{th} , c_i^t คือค่าต่ำสุดของตัวแปร i^{th} ที่การทำซ้ำจำนวน t ครั้ง และ d_i^t คือค่าสูงสุดของตัวแปร i^{th} ที่การทำซ้ำจำนวน t ครั้ง

3.2 หลุมกับดักของแมงช้าง (Trapping in AntLion's Pits)

สมการที่ใช้อธิบายรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของหลุมกับดักของแมงช้างแสดงดังสมการที่ 10 และสมการที่ 11

$$c_i^t = Antlion_j^t + c^t \quad (10)$$

$$d_i^t = Antlion_j^t + d^t \quad (11)$$

โดยที่ c^t เป็นค่าต่ำสุดของตัวแปรทั้งหมดของการทำซ้ำจำนวน t ครั้ง, d^t เป็นเวกเตอร์ที่เป็นค่าตัวแปรสูงสุดที่ของการทำซ้ำจำนวน t ครั้ง และ $Antlion^t_j$ แสดงตำแหน่งของแมงข้างที่เลือกไว้ j ตำแหน่งในการทำซ้ำจำนวน t ครั้ง

3.3 การสร้างของกับดัก (Building Trap)

เพื่อที่จะจำลองสถานการณ์ในการล่าเหยื่อของแมงข้างจะใช้การสุ่มหาตัวแมงข้างเริ่มต้นด้วยวิธีวงล้อรูเล็ต การสุ่มแบบวงล้อรูเล็ตเป็นกระบวนการสุ่มจากกลุ่มคำตอบที่มี โดยใช้การถ่วงน้ำหนัก (weight) มาเป็นนัยยะ โดยคำตอบที่มีค่าน้ำหนักสูงสุดจะเป็นคำตอบเริ่มต้นที่ดีที่สุดและมีโอกาสที่จะถูกเลือกมากที่สุด (มีความน่าจะเป็นสูงสุดที่จะถูกสุ่มเจอ) และคำตอบที่มีค่าน้ำหนักต่ำสุด มีโอกาสถูกเลือกน้อยสุด (มีความน่าจะเป็นต่ำสุดที่จะถูกสุ่มเจอ) มดที่ติดอยู่ในกับดักจะมีแมงข้างอยู่ในกับดักที่เลือกเพียงตัวเดียว ซึ่งก็คืออัลกอริทึม ALO จำเป็นต้องใช้ตัวดำเนินการแบบวงล้อรูเล็ตเพื่อเลือกแมงข้างตามฟังก์ชันที่เหมาะสมในระหว่างดำเนินการ กลไกนี้จะทำให้มีโอกาสสูงที่แมงข้างจะจับมดได้

3.4 การเลื่อนมดลงสู่ก้นหลุม (Sliding Ants Towards Ant Lion)

แมงข้างสามารถสร้างกับดักที่เทียบเคียงได้กับฟังก์ชันความเหมาะสม และมดที่มีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม เมื่อมดอยู่ในกับดักแมงข้างจะยิงทรายออกไปจากกลางของหลุมไปที่ขอบด้านข้างของหลุมกับดัก พฤติกรรมเช่นนี้จะทำให้มดที่อยู่ในกับดักเลื่อนลงไปที่ก้นหลุม รัศมีของการเดินแบบสุ่มของมดจะแสดงดังสมการที่ 12 และสมการที่ 13

$$c^{t(new)} = \frac{c^t}{I} \quad (12)$$

$$d^{t(new)} = \frac{d^t}{I} \quad (13)$$

โดยที่ I คือ อัตราส่วน มีค่าเท่ากับสมการที่ (14)

$$I = 10^w \times \frac{t}{T} \quad (14)$$

เมื่อ t คือจำนวนการวนซ้ำในรอบปัจจุบัน, T คือจำนวนสูงสุดของการทำซ้ำ และ w เป็นค่าคงที่ที่กำหนดจากการวนซ้ำครั้งปัจจุบัน ($w = 2$ เมื่อ $t > 0.1T$, $w = 3$ เมื่อ $t > 0.5T$, $w = 4$ เมื่อ

$t > 0.75T$, $w = 5$ เมื่อ $t > 0.9T$ และ $w = 6$ เมื่อ $t > 0.95T$) โดยทั่วไปค่าของ w จะเป็นค่าคงที่สามารถปรับค่าได้เพื่อให้เกิดความถูกต้องของคำตอบสมการเหล่านี้จะทำให้รัศมีของคำตอบหรือการแกว่งของคำตอบค่อย ๆ ลดลง ซึ่งจะเป็นการปรับปรุงตำแหน่งของมดและเลียนแบบกระบวนการเลื่อนไปในกับดักของมดภายในหลุม ทำให้สามารถประกันได้ว่าจะมีคำตอบที่ดีที่สุดอยู่ภายในพื้นที่การค้นหา

3.5 การจับเหยื่อและสร้างหลุมกับดักอีกครั้ง (Catching prey and re-building the pit)

ขั้นตอนสุดท้ายของการล่าคือเมื่อมดมาถึงกันหลุมและถูกจับด้วยกรามของแมงซ้าง หลังจากนั้นแมงซ้างจะดึงมดเข้าไปภายในทรายและกินเป็น จากนั้นแมงซ้างจะต้องมีการปรับปรุงกับดักหรือตำแหน่งให้เป็นตำแหน่งล่าสุดของการล่าเหยื่อเพื่อเพิ่มโอกาสในการจับเหยื่อใหม่ สมการที่ 15 ใช้อธิบายการปรับปรุงกับดักหรือปรับปรุงตำแหน่งใหม่

$$Antlion'_j = Ant'_i \text{ if } f(Ant'_i) > f(Antlion'_j) \quad (15)$$

โดยที่ t คือจำนวนการวนซ้ำในรอบปัจจุบัน $Antlion'_j$ จะแสดงตำแหน่งของแมงซ้างที่ j ที่เลือกไว้ในการซ้ำที่ t และ Ant'_i จะระบุตำแหน่งของมดตัวที่ i ในการทำซ้ำที่ t

3.6 แมงซ้างที่ดีที่สุด (The best ant lion)

แมงซ้างตัวที่ดีที่สุดจะเป็นลักษณะสำคัญของการวิวัฒนาการของอัลกอริทึมที่ช่วยให้สามารถรักษาโซลูชันที่ดีที่สุดได้ในขั้นตอนต่างๆ แมงซ้างตัวที่ดีที่สุดที่ได้รับในแต่ละรอบการคำนวณจะได้รับการบันทึกและถือว่าเป็นแมงซ้างที่มีคุณภาพดีที่สุด เนื่องจากแมงซ้างที่ดีที่สุดคือฟังก์ชันที่มีความเหมาะสมที่สุดซึ่งจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของมดทั้งหมดในระหว่างการทำซ้ำ ดังนั้นจึงสมมุติให้มดทุกตัวเดินสุ่มรอบ ๆ กับดักที่เลือกโดยวิธีวงล้อรูเล็ต และแมงซ้างพร้อมกันโดยใช้สมการที่ 16

$$Ant'_i = \frac{R'_A + R'_E}{2} \quad (16)$$

โดยที่ R'_A คือการเดินสุ่มรอบ ๆ ตัวแมงซ้างที่ถูกเลือกโดยวิธีวงล้อรูเล็ตในการทำซ้ำที่ t , R'_E คือการเดินสุ่มรอบ ๆ จุดยอดที่การทำซ้ำที่ t และ Ant'_i คือตำแหน่งของมดตัวที่ i ที่การทำซ้ำที่ t ขั้นตอนวิธีการของ ALO อัลกอริทึมสามารถเขียนเป็นลำดับขั้นได้ดังต่อไปนี้

- 1) เริ่มต้นการสุ่มตัวอย่างของมตและแมงข้างเริ่มแรก
- 2) คำนวณค่าที่เหมาะสมที่อยู่ในเงื่อนไขของระบบ ของมตและแมงข้าง (Objective Function, Power Balance Constraint, Power Losses and Generator Rating Constraint) ด้วยสมการที่ 1 ถึงสมการที่ 5
- 3) หาแมงข้างตัวที่ดีที่สุด และถือว่าเป็นแมงข้างที่มีคุณภาพดีที่สุด (ฟังก์ชันที่มีความเหมาะสมที่สุด)
- 4) เลือกแมงข้างด้วยวิธีวงล้อรูเล็ต
- 5) ปรับปรุงวิธีมีการเดินสุ่มของมต โดยใช้สมการที่ 11 และสมการที่ 12
- 6) สร้างการเดินแบบสุ่มและปรับตำแหน่งโดยใช้สมการที่ 9 ถึงสมการที่ 12
- 7) ปรับปรุงตำแหน่งของมตโดยใช้สมการที่ 15
- 8) ประเมินผลของคำตอบจากมตทั้งหมด
- 9) แทนที่แมงข้างด้วยคำตอบจากมตที่ได้จากการประเมินซึ่งมีฟังก์ชันที่เหมาะสมตรงกันโดยใช้สมการที่ 14
- 10) ปรับปรุงตำแหน่งของแมงข้างถ้าได้ฟังก์ชันที่เหมาะสมที่ดีกว่าเดิม
- 11) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดทำงาน
- 12) หยุดทำงานเมื่อได้คำตอบที่เหมาะสม หรือกลับไปยังกระบวนการแรกหากคำตอบไม่เป็นไปตามเงื่อนไข

4. ระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ทดสอบ

4.1 กรณีศึกษาที่ 1

ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อน 6 หน่วย 26 บัส และสายส่ง 46 เส้น มีความต้องการกำลังไฟฟ้า 1263 MW คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องแสดงดังตารางที่ 1 และมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียในสายส่งดัง [16]

ในกรณีที่ 1 เป็นการวางแผนการผลิตโดยเป็นการวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่ในระบบไฟฟ้า ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง เช่นเวลา 19.00 น. เครื่องกำเนิดแต่ละเครื่องควรผลิตกำลังไฟฟ้าเท่าไรที่ใช้ต้นทุนการผลิตน้อยที่สุด และโหลดต้องได้รับกำลังไฟฟ้าเพียงพอกับความต้องการด้วย

$$B_{ij} * 10^{-2} = \begin{bmatrix} 0.0017 & 0.0012 & 0.0007 & -0.0001 & -0.0005 & -0.0002 \\ 0.0012 & 0.0014 & 0.0009 & 0.0001 & -0.0006 & -0.0001 \\ 0.0007 & 0.0009 & 0.0031 & 0.0000 & -0.0010 & -0.0006 \\ -0.0001 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0024 & -0.0006 & -0.0008 \\ -0.0005 & -0.0006 & -0.0010 & -0.0006 & 0.0129 & -0.0002 \\ -0.0002 & -0.0001 & -0.0006 & -0.0008 & -0.0002 & 0.0150 \end{bmatrix}$$

$$B_{oi} * 10^{-2} = [-0.391 \quad -0.13 \quad 0.7047 \quad 0.0591 \quad 0.2161 \quad -0.664]$$

$$B_{oi} = 0.059$$

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 1

Unit no.	c_i	b_i	a_i	P_{min}	P_{max}
1	0.0070	7.00	240	100	500
2	0.0095	10.0	200	50	200
3	0.0090	8.50	220	80	300
4	0.0090	11.0	200	50	150
5	0.0080	10.5	220	50	200
6	0.0075	12.0	190	50	120

4.2 กรณีศึกษาที่ 2

ในกรณีศึกษานี้ได้ใช้วิธีเดียวกันกับกรณีศึกษาที่ 1 แต่ระบบที่ใช้ทดสอบมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดจำนวน 15 หน่วย ที่ความต้องการโหลดทั้งหมดของระบบคือ 2630 MW แต่ในกรณีศึกษาที่ 2 นี้ มีเงื่อนไขที่ต้องพิจารณาและมีความซับซ้อนมากขึ้น คือหน่วยการผลิต 2, 5, 6 และ 12 เป็นช่วงการปฏิบัติการที่ไม่ได้รับอนุญาต (Ramp rate limits and prohibited zone) การสูญเสียในสายส่งตั้ง [17] และคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องแสดงดังตารางที่ 2 และ 3 [17]

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากรณีศึกษาที่ 2

Unit no.	c_i	b_i	a_i	P_{min}	P_{max}
1	0.000299	10.1	671	150	455
2	0.000183	10.2	574	150	455
3	0.001126	8.8	374	20	130
4	0.001126	8.8	374	20	130
5	0.000205	10.4	461	150	470
6	0.000301	10.1	630	135	460
7	0.000364	9.8	548	135	465
8	0.000338	11.2	227	60	300
9	0.000807	11.2	173	25	162
10	0.001203	10.7	175	25	160
11	0.003586	10.2	186	20	80
12	0.005513	9.9	230	20	80
13	0.000371	13.1	225	25	85
14	0.001929	12.1	309	15	55
15	0.004447	12.4	323	15	55

ตารางที่ 3 ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงและช่วงเวลาต้องห้ามสำหรับกรณีศึกษาที่ 2

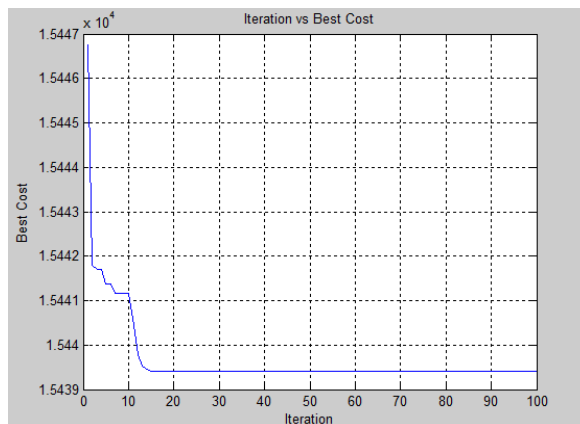
Unit	P_o	UR_i	DR_i	Prohibited zone		
				Zone 1	Zone 2	Zone 3
1	400	80	120			
2	300	80	120	[185-225]	[305-335]	[420-450]
3	105	130	130			
4	100	130	130			
5	90	80	120	[180-200]	[305-335]	[390-420]
6	400	80	120	[230-255]	[365-395]	[430-455]

ตารางที่ 3 ข้อจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงและช่วงเวลาต้องห้ามสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 (ต่อ)

Unit	P'_o	UR_i	DR_i	Prohibited zone		
				Zone 1	Zone 2	Zone 3
7	350	80	120			
8	95	65	100			
9	105	60	100			
10	110	60	100			
11	60	80	80			
12	40	80	80	[30-40]	[55-65]	
13	30	80	80			
14	20	55	55			
15	20	55	55			

5. ผลการจำลองสถานการณ์และการเปรียบเทียบผล

ในการจำลองใช้โปรแกรม MATLAB คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก Intel(R) Core(TM) i5 2.30 GHz แรม 8 GB บนระบบปฏิบัติการ Windows 7 ทำการทดสอบจำนวน 100 รอบ ความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบของวิธีการ ALO ในกรณีศึกษาที่ 1 แสดงในรูปที่ 3 และกรณีศึกษาที่ 2 แสดงในรูปที่ 4 ในส่วนของต้นทุนการผลิตค่าที่ดีที่สุดในแต่ละวิธี ในกรณีศึกษาที่ 1 ดังตารางที่ 4 และกรณีศึกษาที่ 2 ดังตารางที่ 5



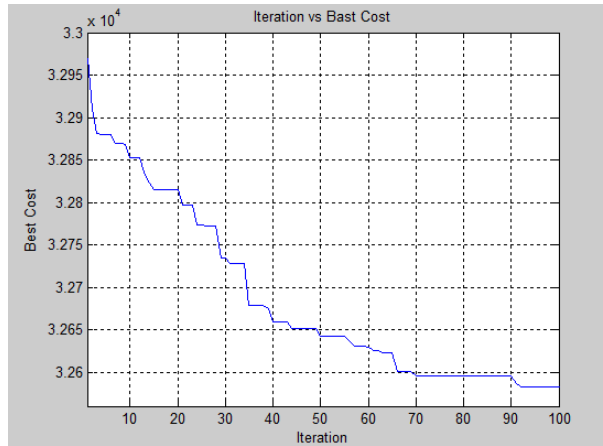
รูปที่ 3 ความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบในกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบการจัดสรรกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่อง กรณีศึกษาที่ 1

Units	MBCO [18]	BCO [18]	PSO [19]	ALO
P_1 (MW)	451.53	452.92	440.58	447.82
P_2 (MW)	173.14	172.57	167.44	172.98
P_3 (MW)	260.19	257.50	278.26	263.72
P_4 (MW)	136.07	140.04	150	138.85
P_5 (MW)	163.77	162.24	157.61	165.39
P_6 (MW)	90.47	89.80	81.22	86.42
P_T (MW)	1275.17	1275.07	1257.08	1275.17
P_L (MW)	12.17	12.07	12.08	12.17
TC (\$/h)	15439.57	15439.63	15445.49	15439.40

จากรูปที่ 3 เมื่อทำการทดสอบวิธีการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีแมงช้าง ผลการทดสอบจะเห็นว่าความเร็วในการลู่เข้าหาค่าตอบเป็นไปอย่างรวดเร็ว ค่าตอบที่ดีที่สุดที่วิธีการ ALO ค้นพบใช้ Iteration ในการค้นหาค่าตอบที่ประมาณ 15 ซึ่งนั่นคือค่าตอบที่วิธีการที่นำเสนอหาค่าตอบได้ จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการที่ 100 Iteration แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพที่ดี และคุณภาพของค่าตอบที่ตรงกับเงื่อนไขข้อบังคับของระบบ

ตารางที่ 4 เป็นตารางการเปรียบเทียบผลของการหาค่าตอบโดยได้นำผลของวิธีการ ALO เปรียบเทียบผลกับวิธีอนุภาคกลุ่ม (PSO) วิธีจำลองการอบเหนียวของโลหะ (SA) และ วิธีผสมผสานการทำซ้ำแบบแลมด้ากับวิธีการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบฟุ้งฝิ่ง (HLBCO) โดยวิธี PSO ให้ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการหรือค่าของค่าใช้จ่ายต่ำสุดที่ 3621.75 \$ โดยมีค่าสูญเสียในสายส่ง 9.9833 MW วิธีการ SA ให้ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการหรือค่าใช้จ่ายต่ำสุดที่ 3619.75 \$ ในขณะที่มีค่าสูญเสียในสายส่งที่ 9.92 MW วิธีการ HLBCO ให้ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดหรือค่าของค่าใช้จ่ายต่ำสุดที่ 3619.75 และมีค่าสูญเสียในสายส่งที่ 9.92 MW เมื่อนำทั้งสามวิธีมาเปรียบเทียบกับวิธีการ ALO ซึ่งให้ค่าใช้จ่ายต่ำสุดอยู่ที่ 3619.26 ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด



รูปที่ 4 ความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบในกรณีศึกษาที่ 2

จากรูปที่ 4 เมื่อทำการทดสอบวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีแมงช้าง เมื่อระบบมีความซับซ้อนมากขึ้น คือเมื่อนำช่วงเวลาต้องห้ามและขีดจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงเข้ามาเป็นเงื่อนไขของระบบ และขนาดของระบบใหญ่ขึ้น ผลการทดสอบจะเห็นว่าความเร็วในการลู่เข้าหาคำตอบเริ่มใช้เวลามากขึ้น คำตอบที่ดีที่สุดที่วิธีการ ALO ค้นพบ ใช้ Iteration ในการค้นหาคำตอบที่ประมาณ 93 แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอยังคงมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพที่ดี

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบการจัดสรรกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่อง กรณีศึกษาที่ 2

Units	DE [20]	CSO [21]	ALO
P_1 (MW)	454.99	454.70	372.44
P_2 (MW)	419.99	380.00	450.60
P_3 (MW)	129.99	130.00	125.83
P_4 (MW)	129.99	129.53	127.83
P_5 (MW)	269.92	170.00	253.85
P_6 (MW)	459.99	460.00	458.11
P_7 (MW)	429.99	429.71	462.44
P_8 (MW)	60.00	75.35	63.80
P_9 (MW)	25.00	34.96	25.62

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบการจัดสรรกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแต่ละเครื่อง กรณีศึกษาที่ 2 (ต่อ)

Units	DE [20]	CSO [21]	ALO
P_{10} (MW)	63.11	160.00	89.72
P_{11} (MW)	79.97	79.75	66.39
P_{12} (MW)	79.98	80.00	76.38
P_{13} (MW)	25.00	34.21	28.34
P_{14} (MW)	15.00	21.14	36.73
P_{15} (MW)	15.00	21.02	16.81
TP (MW)	2657.97	2660.36	2652.91
Total cost (\$/h)	32588.87	32732.95	32572.55
Power Loss	27.97	30.36	22.91

ตารางที่ 5 เป็นตารางการเปรียบเทียบผลของการหาคำตอบโดยได้นำผลของวิธีการ ALO เปรียบเทียบผลกับวิธี Optimization using civilized swarm (CSO) และวิธี differential evolution (DE) โดยวิธี CSO ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการหรือค่าของค่าใช้จ่ายต่ำสุดที่ 32732.95 \$ โดยมีค่าสูญเสียในสายส่ง 30.36 MW วิธีการ DE ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดของวิธีการหรือค่าใช้จ่ายต่ำสุดที่ 32588.87 \$ ในขณะที่มีค่าสูญเสียในสายส่งที่ 27.97 MW เมื่อนำทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกับวิธีการ ALO ซึ่งให้ค่าใช้จ่ายต่ำสุดอยู่ที่ 32572.55 ซึ่งเป็นวิธีการที่ให้ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด และเช่นเดียวกันกับค่ากำลังสูญเสียในสายส่งที่วิธี ALO ยังให้ค่าสูญเสียต่ำที่สุดด้วย

6 สรุปผล

การแก้ปัญหาการจ่ายโหลดอย่างประหยัดด้วยเทคนิคใหม่ที่เรียกว่า เทคนิคการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีแมงช้าง (ANTLION OPTIMIZATION TECHNIQUE: ALO) เป็นเทคนิคการค้นหาคำตอบที่เลียนแบบการหาอาหารของตัวอ่อนแมงช้างที่จะขุดหลุมทรงกรวยเป็นกับดักเพื่อหาอาหาร ได้ทำการทดสอบกับ 2 กรณีศึกษาที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิด 6 หน่วยที่พิจารณาถึงกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียจากสายส่งและฟังก์ชันราคาเชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังความร้อนที่มีสมการทางคณิตศาสตร์ของต้นทุนการผลิตที่เป็นแบบเรียบ และเครื่องกำเนิด 15 หน่วยที่มีความซับซ้อนของระบบคือขีดจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลง และช่วงเวลาต้องห้าม จะเห็นได้ว่าวิธีที่

นำเสนอแนะสามารถหาค่าตอบได้อย่างรวดเร็ว โดยในกรณีศึกษาที่ 1 หาค่าตอบที่ประมาณ 15 Iteration ในแง่ของต้นทุนการผลิตรวมเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับวิธี MBCO, BCO และ PSO จะเห็นว่าวิธีการที่นำเสนอแนะนี้ ให้ค่าของคำตอบที่ดีกว่า ส่วนในกรณีศึกษาที่ 2 ในแง่ของความเร็วในการหาค่าตอบ วิธีการที่นำเสนอแนะหาค่าตอบที่ประมาณ 93 Iteration อันเนื่องมาจากระบบมีขนาดใหญ่ และมีความซับซ้อนจากเงื่อนไขที่เพิ่มขึ้น ในแง่ของต้นทุนการผลิตรวมเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับวิธี DE และ CSO จะเห็นว่าวิธีการที่นำเสนอแนะนี้ ให้ค่าของคำตอบที่ดีกว่า จากการทดสอบ วิธีการที่นำเสนอแนะมีโอกาสได้ค่าที่เหมาะสมมากกว่าเดิม ค่าที่ได้นี้เป็นที่ยอมรับได้ และมีคำตอบที่ดีกว่า ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการผลิตกำลังงานไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพได้

References

- [1] Wood AJ and Wollenberg BF. Power Generation Operation and Control. New York: Wiley; 1984.
- [2] El-Keib AA, Ma H, and Hart JL. Environmentally Constrained Economic Dispatch Using the La Grangian Relaxation Method. IEEE Transactions on Power Systems 1994;9(4):1723-9.
- [3] Ramamoorthy M, Dhar RH, and Mukherjee PK. Reduced-gradient method for economic dispatch. In Electrical Engineers Proceedings of the Institution of Electrical Engineers 1973;120(11):1419-20.
- [4] Ringlee RJ and Williams DD. Economic dispatch operation considering valve throttling losses II-distribution of system loads by the method of dynamic programming. IEEE Trans. Power Appar. Syst. 1962;81(3):615-20.
- [5] Ahsan A and Akif ZK. (2014). Optimization of Economic Load Dispatch Problem by Linear Programming Modified Methodology. 2nd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET'2014). 2014 May 30-31. London; 2014. p.76-9.
- [6] Jizhong Z and James AM. Multi-area power systems economic dispatch using nonlinear convex network flow programming. Electric Power Systems Research 2001;59:13-20.
- [7] Samuel AO, Gabriel BI, Olatubosun O, Olusi O, and Akintoba EA. Genetic Algorithm-based Cost Optimization Model for Power Economic Dispatch Problem. British Journal of Applied Science & Technology 2016;15(6):1-10.

- [8] Srikanth K and HariVamsi V. Partical Swarm Optimization Technique for Dynamic Economic Dispatch. *International Journal of Research in Engineering and Technology* 2016;5(5):460-6.
- [9] Nwohu MN and Osaremwinda OP. Evaluation of Economic Load Dispatch Problem in Power Generating Stations by the Use of Ant Colony Search Algorithms. *International Journal of Research Studies in Electrical and Electronics Engineering (IJRSEEE)* 2016;3(1):20-9.
- [10] Vijay KJ. Optimization of Economic Load Dispatch Problem by using Tabu Search Algorithm. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology* 2017;8(4-1):182-7.
- [11] Thang TN, Dieu NV, and Bach HD. Cuckoo search algorithm for combined heat and power economic dispatch. *Electrical Power and Energy Systems* 2016;81:204-14.
- [12] Ziane I, Benhamida F, and Graa A. Simulated Annealing Optimization for Generation Scheduling with Cubic Fuel Cost Function. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications* 2017;14:64-9.
- [13] Wanchai K and Chiraphon T. Hybrid of Lamda and Bee Colony Optimization for Solving Economic Dispatch. *Przeglad Elektrotechniczny* 2016;9:220-3.
- [14] Saka M, Eke I, Tezcan SS. and Taplamacioglu MC. Vortex Search Algorithm for Solving Economic Load Dispatch Problem Including Ramp Rate Limits in Power Systems. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering* 2018;10:1-5.
- [15] Seyedali M. The Ant Lion Optimizer. *Advances in Engineering Software* 2015;83:80-98.
- [16] Worawat S, Saravuth P, Issarachai Ng. Multiple tabu search algorithm for economic dispatch problem considering valve-point effects. *Electrical Power and Energy Systems* 2011;33:846-54.
- [17] Chandram K, Subrahmanyam N and Sydulu M. Brent method for dynamic economic dispatch with transmission losses. In *IEEE 2008 Power Engineering Society Transmission Distribution Conference and Exposition Chicago*. 2008 April 21-24. IL, USA; 2008. p. 1-5.
- [18] Chiraphon T, Wanchai K and Apinan Au. Multiple Bee Colony Optimization Technique for Economic Dispatch Problem with Ramp Rate Limit and Prohibited Operating Zone. *Kasem Bundit Engineering Journal* 2017;7(2):29-44. (In Thai).

- [19] Jun S, Vasile P, Xiao-Jun W, Wei F and Zhenyu W. Solving the Power Economic Dispatch Problem with Generator Constraints by Random Drift Particle Swarm Optimization. IEEE Transactions on Industrial Informatics 2014;10(1):222-32.
- [20] Samir S and Abdellatif H. A hybrid differential evolution algorithm based on particle swarm optimization for non-convex economic dispatch problems. Applied Soft Computing 2013;13(4):1608-19.
- [21] Immanuel SA and Thanushkodi BK. Optimization using civilized swarm: Solution to economic dispatch with multiple minima. Electric Power Systems Research 2009; 79(1):8-16.

ประวัติผู้เขียนบทความ



จิรพนธ์ ทาแกง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ลำปาง เลขที่ 200 หมู่ 17 ต.พิชัย อ.เมือง จ.ลำปาง 52000 โทรศัพท์ 054 342547 โทรสาร 054 342549 E-mail: chiraphon@rmutl.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch) พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy)



วันไชย คำเสน อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ลำปาง เลขที่ 200 หมู่ 17 ต.พิชัย อ.เมือง จ.ลำปาง 52000 โทรศัพท์ 054 342547 โทรสาร 054 342549 E-mail: wanchai_kh@rmutl.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic) การจ่ายโหลดอย่างประหยัด (Economic Dispatch)



อภิพันธ์ อูรโสภณ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150 โทรศัพท์ 043754333 E-mail: aurasophon@yahoo.com
งานวิจัยที่สนใจ: อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic) อิเล็กทรอนิกส์เกษตรกรรม (Electronic Agriculture)

การเปรียบเทียบผลการออกแบบเสริมผิวทางโดย เครื่องมือทดสอบภาคสนาม

COMPARISON OF PAVEMENT DESIGN FROM FIELD TESTING

ธรรมมา เจียรธรวานิช¹ และ สุวิมล เจียรธรวานิช²

¹ผู้ช่วยอธิการบดี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120, Thamma.J@mail.rmutk.ac.th

²ประธานหลักสูตร, สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และนวัตกรรม วิทยาลัยศิลปวิทยาและ

วิทยาศาสตร์เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเซนต์จอห์น

1110/5 ถนนวิภาวดีรังสิต แขวงจอมพล เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900, Jsuwimol@gmail.com

Thamma Jairtalawanich¹ and Suwimol Jairtalawanich²

¹Assistant to the President, Rajamangala University of Technology Krungthep,

2 Nanglinchee Rd., Thungmahamek, Sathorn, Bangkok, 10120, Thamma.J@mail.rmutk.ac.th

²Head of Curriculum, Department of Logistics Management and Innovation,

College of Liberal Arts and Technological Sciences, Saint John's University,

1110/5 Vipawadee-Rangsit Rd., Chompon, Chatuchak, Bangkok, 10900, Jsuwimol@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบผลการออกแบบเสริมผิวทางโดยเครื่องมือทดสอบภาคสนาม โดยใช้เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) และ Falling Weight Deflectometer (FWD) ที่ใช้ใน งานทางเพื่อหาค่าการแอ่นตัว การทรุดตัว โดยการนำเครื่องมือทดสอบมาทำการทดสอบที่เส้นทาง หลวงหมายเลข 344 (ชลบุรี - บ้านบึง) ในการซ่อมบำรุงรักษาทางตามปกติจะต้องประเมินสภาพ โครงสร้างของทางด้วยเครื่องมือวัดการแอ่นตัวด้วยการตกกระทบ มีหลักการทำงานโดยการปล่อย ตุ่มน้ำหนักตกกระทบบนผิวทาง แล้วทำการวัดค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้น จากผลการศึกษาพบว่า จุดที่มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมีค่ามากที่สุดมีค่าเท่ากับ 56.78 เปอร์เซ็นต์ที่ตำแหน่งทดสอบที่ 8 และ จุดที่มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.19 ที่ตำแหน่งทดสอบที่ 11 ปัจจุบันที่ ส่งผลกระทบต่อการศึกษาการหาค่าการแอ่นตัวของถนน ได้แก่ น้ำหนักของแผ่นน้ำหนักที่ แตกต่างกัน เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) แผ่นน้ำหนักจะมีค่าเท่ากับ 750 KPa และ เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) แผ่นน้ำหนักจะมีค่าเท่ากับ 10 KPa

คำสำคัญ: Light Weight Deflectometer, Falling Weight Deflectometer

ABSTRACT

This research about comparison of pavement design from field testing by Light Weight Deflectometer (LWD) and Falling Weight Deflectometer (FWD). Used in road work to find the leaning of the road. It is part of the Royal Route Development. The test equipment was tested on Highway 344 (Chonburi - Banbung). In normal maintenance work, the structural condition of the track must be assessed with the impact crimp. It works by releasing the weight on the surface. The results are difference of percentage maximum is 56.78 % at station 8 and difference of percentage minimum is 0.19 % at station 11. Factors that effect the road test are: The weight loss pad deflectometer (FWD) is 750 KPa and the Light Weight Deflectometer (LWD) tool is 10 KPa.

KEYWORDS: Light Weight Deflectometer, Falling Weight Deflectometer

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

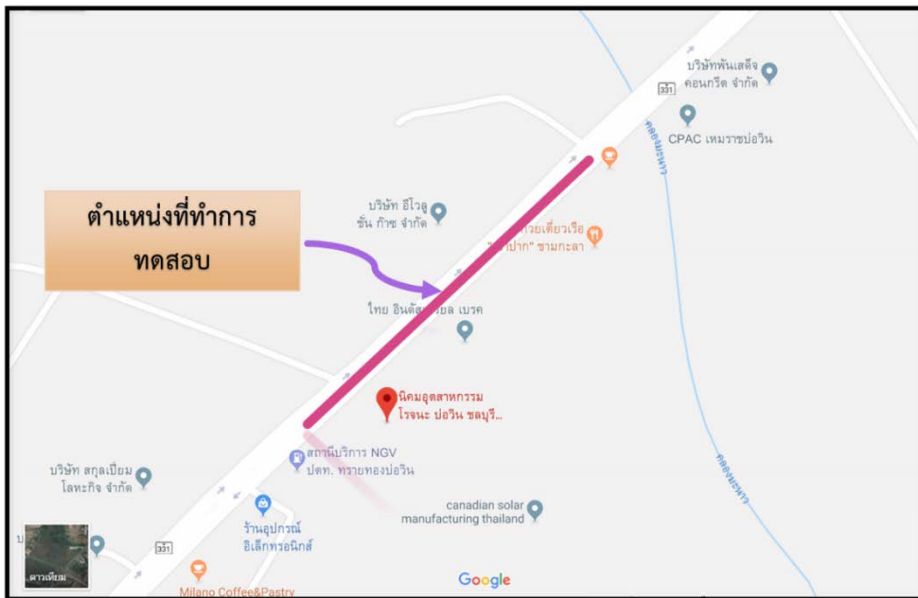
เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) และ Falling Weight Deflectometer (FWD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ทดสอบหาค่าการแอ่นตัวของถนน ซึ่งผลที่ได้จากเครื่องมือจะเป็นผลแบบตัวเลขซึ่งต้องนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ในโปรแกรม Elmod Four ให้เป็นกราฟแสดงค่า Deflection และนำกราฟที่ได้ไปวิเคราะห์และคำนวณเพื่อออกแบบวิธีการก่อสร้างหรือซ่อมแซมถนนต่อไป ซึ่งโปรแกรมนี้ทางกรมทางหลวงไม่สามารถนำมาเผยแพร่ได้เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่ใช้เฉพาะทาง และมีความซับซ้อนในวิธีการคำนวณ ของกรมทางหลวง เพื่อให้วิธีการซ่อมแซมถนนมีประสิทธิภาพ อย่างสูงที่สุดการตรวจวัดคุณภาพในการซ่อมหรือก่อนทำการซ่อมแซมจึงควรยืนยันเพื่อให้เกิดความแน่ใจก่อนทำการซ่อมแซม การศึกษาวิจัยนี้จึงได้นำเอาเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) และเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) ซึ่งสามารถทดสอบเพื่อวิเคราะห์ประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง เพื่อให้เห็นผลการทดลองและนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อซ่อมแซมและปรับปรุงทางต่อไป

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาวิธีการทดสอบหาค่าการแอ่นตัวของถนนโดยเครื่องมือ Light Weight Deflectometer และ Falling Weight Deflectometer และเพื่อหาข้อแตกต่างในการทดสอบของเครื่องมือที่ศึกษาเพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาและเพื่อพัฒนาต่อไป

3. ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือ Light Weight Deflectometer และ Falling Weight Deflectometer การศึกษานี้ได้ศึกษาที่เส้นทางหลวงหมายเลข 344 (ชลบุรี - บ้านบึง) ขาออก เป็นถนน 3 ช่องทาง ซึ่งทำการศึกษา 1 ช่องทาง ทางด้านริมฝั่งซ้าย ระยะทางที่ทำการศึกษา ทุกๆ 25 เมตร รวมระยะทางที่ทำการศึกษาทั้งสิ้น 125 เมตร และจากข้อมูลที่ทำการศึกษา สามารถนำค่าการทดสอบที่ได้จากเครื่องมือ Light Weight Deflectometer และ Falling Weight Deflectometer ก่อนที่จะนำไปคำนวณด้วยโปรแกรม Elmod Four เพื่อวิเคราะห์หาค่าการทรุดตัวของถนนต่อไปได้



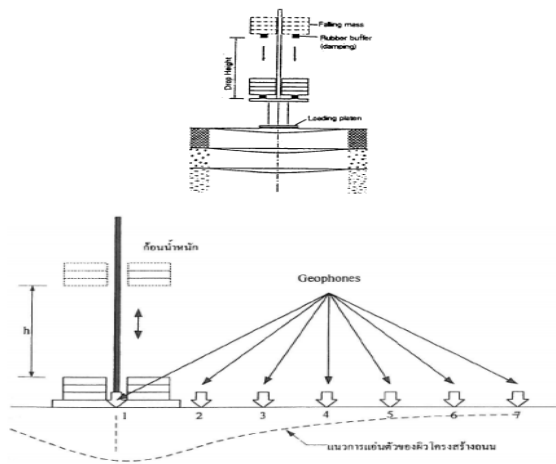
รูปที่ 1 แผนที่แสดงตำแหน่งเส้นทางที่ใช้ทดสอบ

4. ขั้นตอนการศึกษา

4.1 หลักการทำงานของเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) [1, 2]

การเกิดการแอ่นตัวของโครงสร้างถนนเมื่อล้อรถยนต์พาหนะวิ่งผ่าน หลังจากที่ได้ค่าการแอ่นตัวแล้วก็จะทำการคำนวณย้อนกลับ โดยใช้ค่าการแอ่นตัวนั้นเพื่อหาค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นทางแต่ละชั้น ซึ่งค่าโมดูลัสเหล่านี้จะเป็นข้อมูล สำคัญที่ใช้ในการคำนวณวิเคราะห์ถึงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของถนนและใช้ออกแบบการเสริมผิวต่อไป ในปัจจุบัน กรมทางหลวงใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer รุ่น Dynatest 8000 มีลักษณะเป็นรถพ่วงต่อเข้ากับรถตุ๊กตุ๊ก ไปขณะปฏิบัติงาน ซึ่งส่วนประกอบของเครื่องมือทดสอบประกอบไปด้วย ก้อนน้ำหนักระบบตรวจวัดแรง (Load Cell)

และระบบการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวที่เป็นผลจากแรงกระทำ โดยที่น้ำหนักจากก้อนน้ำหนักจะถ่ายลงสู่ถนนผ่านทาง แผ่นรอง (Plate) ขนาดน้ำหนักและระยะยกก้อนน้ำหนักสามารถควบคุมเพื่อให้เกิดแรงกระทำต่อถนนได้ตามที่ต้องการ ระบบตรวจวัดแรงจะทำการตรวจวัดแรงกระทำที่ตั้งฉากกับแผ่นรองน้ำหนักได้อย่างแม่นยำ เมื่อก้อนน้ำหนักกระแทก โครงสร้างถนนจะกระจายแรงออกไปจากจุดที่ทำการทดสอบโดยมี Geophone 1 ตัวจะตรวจวัดค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างถนนที่กึ่งกลางใต้จุดที่แรงกระทำ ส่วน Geophone ที่เหลือจะวัดค่าการแอ่นตัว (Deflection) ที่อ่านได้สามารถ นำไปคำนวณหาความแข็งแรงของถนน ซึ่งเป็นประโยชน์มากในการบูรณะปรับปรุงทาง



รูปที่ 2 หลักการทำงานของ Falling Weight Deflectometer [3]

การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ เครื่องมือการสำรวจ Falling Weight Deflectometer (FWD) ซึ่งประกอบด้วย

- 1) รถตู้ลากจูงและรถลากพ่วงทดสอบ Falling Weight Deflectometer ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 รถตู้ลากจูงและรถลากพ่วงทดสอบ

2) ชุดอุปกรณ์ทดสอบของรถลากพ่วง ได้แก่ แผงวงจรควบคุม, Geophone, แผ่น Plate, ป้อนลม และแผ่นน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชุดอุปกรณ์ทดสอบของรถลากพ่วง

3) ชุดอุปกรณ์ควบคุม (Control Unit) สำหรับเก็บบันทึกข้อมูลจากการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ชุดอุปกรณ์ควบคุม (Control Unit)

4) กล้องและจอแสดงภาพเพื่อช่วยให้ตรวจสอบตำแหน่งของ Sensor 2 ตัวท้าย โดยเครื่องวัดระยะทางอัตโนมัติ (Distance Measuring Instrument; DMI) สำหรับบอกและบันทึกที่กระยะทาง ณ จุดที่ทำการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 กล้องและจอแสดงภาพและเครื่องวัดระยะทางอัตโนมัติ

5) เครื่องวัดอุณหภูมิของอากาศบันทึกค่าอุณหภูมิโดยอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 เครื่องวัดอุณหภูมิ

สำหรับการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD การวางตำแหน่งของ Geophone ในการทดสอบเพื่อต้องการวัดพฤติกรรมการส่งถ่ายแรงจากการให้น้ำหนักบรรทุกทดสอบ โดยมีรายละเอียดของตำแหน่งดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตำแหน่งของ Geophone เครื่องมือทดสอบ Falling Weight Deflectometer (FWD) [3]

Geophone ตัวที่	ตำแหน่ง
1	ที่ระยะ 0 มิลลิเมตร
2	ที่ระยะ -200 มิลลิเมตร
3	ที่ระยะ -300 มิลลิเมตร
4	ที่ระยะ 450 มิลลิเมตร
5	ที่ระยะ 600 มิลลิเมตร
6	ที่ระยะ 900 มิลลิเมตร
7	ที่ระยะ 1200 มิลลิเมตร
8	ที่ระยะ 1500 มิลลิเมตร
9	ที่ระยะ 1800 มิลลิเมตร

4.2 เครื่องมือที่ใช้ทำการทดสอบด้วยวิธี Light Weight Deflectometer (LWD) [4]

เครื่องมือทดสอบ Light Weight Deflectometer (LWD) จะมีความคล่องตัวมากกว่าเครื่องมือทดสอบ Falling Weight Deflectometer (FWD) และมีราคาที่ถูกกว่ากันมากปัจจุบันทางกรมทางหลวงจึงนิยมใช้เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) ในการทดสอบควบคู่ไปกับเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 เครื่องทดสอบ Light Weight Deflectometer (LWD)

การดำเนินการทดสอบโดยใช้เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) จะมีความคล่องตัวมากกว่าเครื่องมือทดสอบ Falling Weight Deflectometer (FWD) และมีราคาที่ถูกกว่า ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน

1) เมื่อเครื่องทดสอบ Light Weight Deflectometer (LWD) พร้อมทั้งจะทำการเก็บบันทึกข้อมูลแล้ว ให้เริ่มตรวจสอบดูก่อนว่าเครื่อง วางตั้งตรงกับพื้นผิวราบเสมอกันตรวจเช็คให้มั่นใจว่า ไม่มีส่วนใดของร่างกาย หรือเครื่องมือใดๆ วางกีดขวางตุ้มน้ำหนัก (Drop Weight) และยางชັบแรงกระแทก (Rubber Buffers) ก่อนปล่อยตุ้มน้ำหนัก



รูปที่ 9 เครื่องทดสอบเมื่อพร้อมใช้งาน

- 2) ทำการเคลื่อนย้ายเครื่องมือไปยังจุดที่กำหนดตำแหน่งทดสอบไว้



รูปที่ 10 การย้ายเครื่องมือไปยังจุดที่ทำการทดสอบ

- 3) เริ่มทำการทดสอบด้วยการควบคุมด้วยรีโมท โดยเชื่อมต่อสัญญาณด้วยบลูทูธ (Bluetooth)



รูปที่ 11 การทดสอบ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ

- 4) เมื่อทำการทดสอบครบตามจุดที่กำหนดตำแหน่งไว้แล้วให้มาเริ่มทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่จุดแรกใหม่จนทำครบทั้งหมด 3 รอบ โดยเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) เมื่อจะทำการทดสอบต้องรอให้เครื่องมือทดสอบ Falling Weight Deflectometer (FWD) ทดสอบไปก่อนและ

ทั้งระยะห่างกันประมาณ 3-5 นาที จึงสามารถใช้เครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) ทดสอบตามต่อได้

5) เมื่อทำการทดสอบเสร็จสิ้นแล้ว จึงนำผลการทดสอบที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม RoSy Compaction อาศัยการประมาณค่า E จากผลการตรวจวัดจริง (ค่า Elastic Modulus (MPa) ดินเดิม 10 ร่องพื้นทาง 120 พื้นทาง 330) โดยใช้แผ่นจานโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มม. และกำหนดให้ร่องพื้นทาง (Subbase) หนา 30 ซม. พื้นทาง (Base) หนา 15 ซม. โปรแกรม RoSy Compaction เป็นส่วนหนึ่งของชุดอุปกรณ์เครื่อง PRIMA 100

ตารางที่ 2 ตัวอย่างผลการทดลองที่ได้เมื่อวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม RoSy Compaction

Station (km.)	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3	
	Deflection ($\mu\text{m.}$)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	Deflection ($\mu\text{m.}$)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	Deflection ($\mu\text{m.}$)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
170+750	44.2	42.1	57.9	45.2	60.4	48.9
170+775	24.9	42.1	26.2	45.3	28.3	48.9
170+800	75.1	42.5	72.1	46.3	72.4	49.0
170+825	16.6	43.2	22.1	46.4	16.9	48.9
170+850	28.7	43.2	35.3	45.8	51.7	48.9
170+875	44.5	43.5	39.3	46.0	62.4	48.9
170+900	49.1	43.7	51.1	46.3	58.0	48.9
170+925	50.7	44.3	58.9	46.6	65.3	48.8
170+950	32.1	44.3	30.0	46.8	29.7	48.7
170+975	45.1	44.5	38.4	46.7	52.0	48.6
171+000	32.0	44.6	40.1	46.7	31.8	48.6

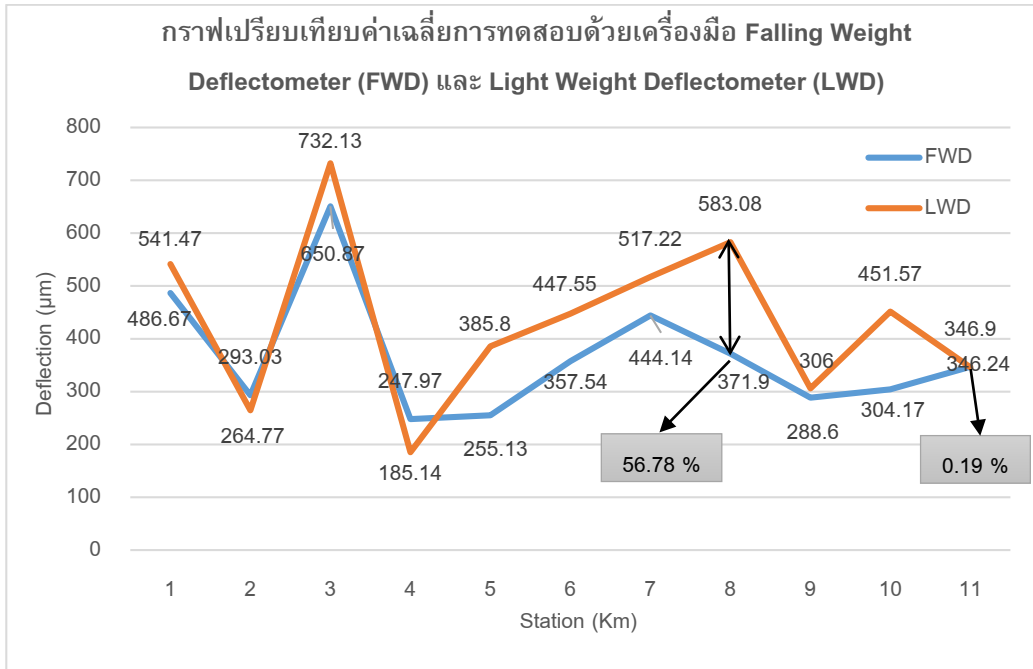
5. ผลการดำเนินงานวิจัย

จากการทดสอบหาค่าการแอ่นตัวของถนนโดยใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) และ Light Weight Deflectometer (LWD) ผลของการศึกษาเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) และ Light Weight Deflectometer (LWD) ในระยะทางที่ทำการศึกษาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยของการทดสอบและเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง

Station	ค่าเฉลี่ย FWD ($\mu\text{m.}$)	ค่าเฉลี่ย LWD ($\mu\text{m.}$)	% ความแตกต่าง
1	486.67	541.47	11.26
2	293.03	264.77	9.64
3	650.87	732.13	9.42
4	247.97	185.14	25.33
5	255.13	385.80	51.21
6	357.54	447.55	25.17
7	444.14	517.22	16.45
8	371.90	583.08	56.78
9	288.60	306.00	6.03
10	304.17	451.57	48.45
11	346.90	346.24	0.19

จากตารางที่ 3 ค่าที่ได้จากการทดสอบ ณ ตรงตำแหน่งเดียวกันด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) และ Light Weight Deflectometer (LWD) มีค่าที่ใกล้เคียงเป็นบางจุดและไม่ใกล้เคียงเป็นบางจุด โดยจากข้อมูลการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยางด้วยเครื่องมือ FWD ที่ผ่านมาของกรมทางหลวงพบว่า ทางหลวงซึ่งผ่านการใช้งานแล้วเป็นระยะหนึ่ง ค่าการแอ่นตัวโดยเฉลี่ยจะอยู่ระหว่าง 300 ถึง 500 ไมครอน ทำให้ผู้วิจัยนำผลการทดสอบมาเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 12 ซึ่งพบว่า เส้นกราฟที่ได้จากการทดสอบ ณ ตรงตำแหน่งเดียวกันด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) และ Light Weight Deflectometer (LWD) มีเส้นกราฟที่ใกล้เคียงเป็นบางจุดและไม่ใกล้เคียงเป็นบางจุด เมื่อนำผลเฉลี่ยที่ได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างพบว่าที่ตำแหน่งที่ 11 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 0.19 และที่ตำแหน่งที่ 8 มีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 56.78



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการทดสอบทั้งสองเครื่องมือ

6. สรุปผลการดำเนินงาน

การศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิจัยผลการออกแบบเสริมผิวทางแบบยึดหยุ่นที่ได้จากเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) และ Light Weight Deflectometer (LWD) โดยเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของผิวทางที่ได้ขณะทำการทดสอบด้วยเครื่องมือทั้งสองนี้ ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการแอ่นตัวที่ผิวภายใต้น้ำหนักกระทำของโครงสร้างทางที่ได้เปิดการจราจรแล้วเฉพาะผิวทางชนิดแอสฟัลต์คอนกรีต โดยมีการจัดแยกกลุ่ม Test Section ตามปริมาณการจราจร ความหนาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตและอายุการให้บริการ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบวัดค่าการแอ่นตัวของผิวทางภายใต้น้ำหนักกระทำในการศึกษานี้ ได้ใช้ Falling Weight Deflectometer (FWD) Model 8000 ของ DYNATEST ประเทศเดนมาร์ก และ Light Weight Deflectometer (LWD) ซึ่งสามารถนำข้อมูลต่างๆ เหล่านี้มาทำการวิเคราะห์โดยเครื่องมือ Light Weight Deflectometer (LWD) ใช้วิธีมาตรฐานของกรมทางหลวง (DOH Standard) และเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer ใช้วิธี Analytical Overlay Design โดยใช้โปรแกรม ELMOD (Evaluation of Layer Moduli and Design) ซึ่งใช้วิธีการคำนวณย้อนกลับ (Back-Calculation) ช่วยในการคำนวณ ดังนั้นสำหรับผิวทางแบบยึดหยุ่นที่ใช้ในการศึกษาพบว่าการใช้วิธี Falling Weight Deflectometer ออกแบบเสริมผิวทางจะช่วยให้ได้ค่าการแอ่นตัวและความหนาเสริมผิวทางมีการกระจายตัวและค่าผิดพลาดมาตรฐานน้อยลง ทำให้ผลการวิเคราะห์โครงสร้างชั้น

ทางและออกแบบถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น ถนนมีคุณภาพดี ลดความเสียหายของโครงสร้างชั้นทาง ช่วยประหยัดงบประมาณในการดูแลซ่อมแซมถนนของประเทศลงได้

References

- [1] Thamma J. Highway engineering. Bangkok: Rajamangala University of Technology Krungthep; 2013. (In Thai)
- [2] Thamma J. Comparison of flexible pavement overlay design from benkelman beam and falling weight deflectometer. [Thesis/Master of Civil Engineering]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2003. (In Thai)
- [3] Direk L, Thamma J. Comparison of flexible pavement overlay design from benkelman beam and falling weight deflectometer. Kasetart Engineering Journal 2005;57:46-59. (In Thai)
- [4] Department of Highways. Standard No. DH-S 327/2543. Standard sub sealing under concrete slab. Bangkok: Cabinet and Royal Gazette Publishing Office. Bangkok; 2000. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธรรมมา เจียรธรวาณิช ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยอธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ สังกัดภาควิชา วิศวกรรมโยธา สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาวิชาการจัดการงานก่อสร้าง มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช และ สาขาวิชาการวัดและประเมินผล การศึกษา มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช ที่อยู่ เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120 โทรศัพท์/โทรสาร 02 287 9638 E-Mail: Thamma.J@mail.rmutk.ac.th, Thamma.J@gmail.com งานวิจัยที่สนใจ คือ วิศวกรรมขนส่งและจราจร วิศวกรรมทาง การ ทดสอบวัสดุก่อสร้าง และงานวิจัยเชิงสำรวจ



อาจารย์ สุวิมล เจียรธรวานิช ปัจจุบันดำรงตำแหน่งประธานหลักสูตร สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และนวัตกรรม วิทยาลัยศิลปวิทยาและวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเซนต์จอห์น สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ สาขาวิชาการวัดและประเมินผลการศึกษา มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช ที่อยู่ เลขที่ 1110/5 ถนนวิภาวดีรังสิต แขวงจอมพล เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 หมายเลขโทรศัพท์ 02 938 7058-65 ต่อ 285 โทรสาร 02 938 7071 E-Mail: Jsuwimol@gmail.com

งานวิจัยที่สนใจ คือ การควบคุมคุณภาพการผลิต เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม และงานวิจัยเชิงสำรวจ

การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนจัดตั้งโรงงานผลิตเพชรสังเคราะห์:
กรณีศึกษา โรงงานผลิตเพชรสังเคราะห์

**FEASIBILITY STUDY ON THE INVESTMENT OF SYNTHETIC DIAMOND
FACTORY: A CASE STUDY OF SYNTHETIC DIAMOND FACTORY**

สรารัตน์ วิจิตรคุณวัฒน์¹, ศันสนีย์ สุภาภา² และพัชรภรณ์ ญาณภีร์³

¹สาขาการจัดการวิศวกรรม ภาคพิเศษ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

^{2,3}ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Saranrat Vijitkunnawat¹ Sansanee Supapa² and Patcharaporn Yanpirat³

¹The Special Graduate Program in Engineering Management,

Faculty of Engineering, Kasetsart University

50 Ngam Wong Wan Rd, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900

^{2,3}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

50 Ngam Wong Wan Rd, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900

บทคัดย่อ

บริษัทกรณีศึกษาและบริษัทคู่ค้า ณ ประเทศสิงคโปร์มีข้อตกลงร่วมกันในการศึกษาลู่ทางการลงทุนเพื่อจัดตั้งโรงงานผลิตเพชรสังเคราะห์ในประเทศ จึงได้มีการศึกษาและวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการในด้านการตลาด เทคนิคการผลิต การจัดการโครงการ การเงิน การวิเคราะห์ผลตอบแทนทางด้านเศรษฐกิจและสังคม ความไวในการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการตัดสินใจลงทุน รวมทั้งการวิเคราะห์ความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นความเสียหายและผลกระทบต่อกระบวนการผลิตผลจากการศึกษาโครงการด้านการตลาด โครงการจะจำหน่ายเพชรสังเคราะห์ขนาด 1 กระรัตให้กับลูกค้าซึ่งเป็นคู่ค้าผู้ผลิตและจำหน่ายเครื่องจักรหลักให้กับบริษัทกรณีศึกษาในประเทศสิงคโปร์ปริมาณปีละ 495 กระรัต ในราคากระรัตละ 80,000 บาท กระบวนการผลิตจะใช้หลักการตกสะสมของไอเชิงเคมี (MPCVD) และใช้เทคโนโลยี Sarin Technology ในการเจียรระไน ระยะเวลาในการก่อสร้างโรงงานประมาณ 1 ปี และจะใช้พนักงานทั้งสิ้น 27 คน ค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งสิ้น 92 ล้านบาท กำหนดระยะเวลาในการวิเคราะห์โครงการ 10 ปี ที่อัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ผู้ลงทุนพึงพอใจร้อยละ 17 คำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิของกระแสเงินสดสุทธิหลังหักภาษีได้ 10.40 ล้านบาท และ

ระยะเวลาการคืนทุน 7 ปี 11 เดือน โครงการมีอัตราผลตอบแทนภายในร้อยละ 20.20 สามารถเพิ่มมูลค่าเพิ่มคิดเป็นมูลค่าปัจจุบันที่ 33.41 ล้านบาทและมีผลตอบแทนทางสังคมคิดเป็นมูลค่าปัจจุบัน 3.45 ล้านบาท ในการวิเคราะห์ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปร พบว่า โครงการมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของราคาและปริมาณการจำหน่ายเพชรสังเคราะห์ที่ลดลงต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ของราคาที่กำหนด ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงของโครงการจะใช้รูปแบบของความเสียหายและผลกระทบ (FMEA) ที่เกิดขึ้นต่อกระบวนการที่อาจมีผลกระทบต่อปริมาณการผลิตและจำหน่าย พบว่า ค่า RPN ของระบบก๊าซมีค่าสูงที่สุดซึ่งจะต้องมีการตรวจสอบระบบอย่างสม่ำเสมอเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการผลิต และความเป็นไปได้ในการลงทุน

คำสำคัญ: การศึกษาความเป็นไปได้ หลักการตกสะสมของไอเชิงเคมีของเพชรสังเคราะห์ การวิเคราะห์ความเสี่ยงด้วยรูปแบบของความเสียหายและผลกระทบ

ABSTRACT

The case study company under the mutual agreement of the Singapore business partner were looking for the opportunity of the investment on synthetic diamond factory, the feasibility study analysis was conducted in detail of marketing, technic, project management, finance, and socio-economic benefit to the country. The sensitivity analysis including the failure mode and effects analysis of the production process were also assessed. The result of the study showed that at the first phase, under the mutual agreement of the Singapore business partner which was the machine supplier, all synthetic diamond at the size of one carat would be sold to the business partner at the volume of 495 carats per year and at the price of 80,000 baht per carat. The production process was based on Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition (MPCVD) and Sarin grinding technology. The factory required one year of construction period and the total man power requirements was at 27 employees. The total investment cost of the project was estimated at 92 million baht. Under 10 years of project evaluation period and at the minimum attractive rate of return of 17 percent, the net present value of the net cash flow after tax was at 10.40 million baht. and the payback period was at 7 years 11 months. The internal rate of return of the project was at 20.20 percent. For the socio-economic benefit of the project, the net present value of the value added was at 33.41 million baht and the social surplus was at 3.45 million baht. The project was sensitive to the changing of price and volume of product at less than 5 percent of the base price. For the failure mode and effects analysis (FMEA) of the process risk assessment, the RPN of gas

system was the highest, which required regular monitoring and strictly inspection to increase the production performance and the project feasibility for investment.

KEYWORDS: feasibility study, MPCVD, synthetic diamond, sensitivity analysis, FMEA

1. บทนำ

จากแนวโน้มการขยายตัวด้านการตลาดของเพชรสังเคราะห์ทั่วโลกที่กำลังเติบโต โดยในปี พ.ศ. 2559 มีมูลค่าประมาณ 16.83 พันล้านเหรียญสหรัฐ และคาดว่าจะถึง 23.8 พันล้านเหรียญสหรัฐภายในปี 2564 โดยมีอัตราการเติบโตเฉลี่ยอยู่ที่ปีละร้อยละ 7.14 ในช่วงระยะเวลา พ.ศ.2559-2564 [1] เนื่องจาก เพชรสังเคราะห์มีราคาต่ำกว่าเพชรแท้ อีกทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติด้านต่างๆ เทียบกับเพชรแท้ได้ เช่น ขนาด ความใส สีของเพชรสังเคราะห์ เป็นต้น อุปสรรคที่สำคัญสำหรับตลาดเพชรสังเคราะห์ คือ กระบวนการผลิตเพชรสังเคราะห์ที่ซับซ้อนซึ่งเป็นผลมาจากการที่สามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติได้นั้นเอง

บริษัทกรณีศึกษาเป็นบริษัทที่ร่วมลงทุนกับบริษัทคู่ค้าต่างประเทศในธุรกิจประเภทพลังงานทดแทนด้านพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในประเทศ และมีความต้องการที่จะขยายธุรกิจการลงทุนในอุตสาหกรรมอื่นๆ ประกอบกับได้รับข้อเสนอจากบริษัทผลิตเครื่องจักรและขายเครื่องจักรหลักในการผลิตเพชรสังเคราะห์ ที่ประเทศสิงคโปร์ซึ่งเป็นบริษัทที่มีความสัมพันธ์ทางการค้าร่วมกันกับบริษัทกรณีศึกษา ได้เสนอขายเครื่องจักรอุปกรณ์ในการผลิตเพชรสังเคราะห์ และบริษัทผลิตเครื่องจักรยี่ห้อที่จะรับซื้อเพชรสังเคราะห์เจียรไนแล้วที่ผลิตได้ทั้งหมดตามราคาและปริมาณที่ได้ตกลงกัน เนื่องจากผลิตได้ไม่ทันความต้องการของลูกค้าซึ่งส่วนใหญ่เป็นตลาดจากประเทศจีน บริษัทกรณีศึกษาจึงเกิดความคิดที่จะผลิตเพชรสังเคราะห์โดยในปี พ.ศ. 2558-2559 ได้มีการจัดส่งเครื่องจักรมาศึกษาวิจัยและทดลองผลิตเพื่อศึกษาสู่ทางความเป็นไปได้ในด้านเทคนิคกระบวนการผลิตเพชรสังเคราะห์ และจะมีโครงการร่วมกันในการศึกษาสู่ทางการขยายไปสู่ขั้นอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ต่อไป

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตการศึกษา

การวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการจัดตั้งโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเพชรสังเคราะห์ และวิเคราะห์ความไม่แน่นอนและความเสี่ยงที่มีผลกระทบต่อการตัดสินใจเพื่อการลงทุนในประเทศ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการจัดตั้งโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเพชรสังเคราะห์ในด้านการตลาด โดยเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย คือ วิธี SWOT Analysis และ ศึกษาแรงกดดันด้านการตลาด (Five Forces) [2] การศึกษาเทคนิควิศวกรรมพร้อมทั้งแสดงผลทดลองผลิตเพชรสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการตามสมภาวะการผลิตจากคู่มือการใช้งานของเครื่อง MPCVD และตรวจสอบวิเคราะห์คุณภาพด้วยเทคนิครามาสเปกโตรสโคปี การจัดการโครงการ วิเคราะห์โครงการด้านการเงินโดยใช้รูปแบบตารางทางการเงินตามองค์การพัฒนาอุตสาหกรรมแห่งสหประชาชาติ (The United Nations Industrial Development Organization ;UNIDO) [3] ผลตอบแทนด้านเศรษฐกิจและสังคมในด้านมูลค่าเพิ่มของโครงการ การประหยัดเงินตราต่างประเทศ ศึกษาวิเคราะห์ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อ การตัดสินใจในการลงทุน และวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านความเสียหายและผลกระทบของกระบวนการที่เกิดขึ้นในการผลิตและเจียรไนเพชรสังเคราะห์พร้อมเสนอแนะแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยขั้นตอนและวิธีการวิจัยแสดงตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนและวิธีการวิจัย

4. ผลการวิจัย

4.1 การวิเคราะห์โครงการด้านการตลาด

ผลิตภัณฑ์ที่จะผลิตในโครงการนี้คือ เพชรสังเคราะห์เจียระไน ขนาด 1 กะรัต เจียระไนและเหลี่ยมเกสร อยู่ในระดับสี E ถือว่าเป็นเกรดไร้สี (Colorless) ส่วนความใสของเพชรสังเคราะห์จะอยู่ในกลุ่ม FL/IF - VS1-2 (Flawless/Internal Flawless – Very Slightly Included 1-2) ซึ่งเป็นกลุ่มเพชรที่มีตำหนิหรือมลทินน้อยที่สุดจนถึงในระดับที่ไม่มีมลทินเมื่อมองภายใต้กล้องกำลังขยาย 10 เท่า ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

เพชรสังเคราะห์มีตลาดผู้บริโภคค่อนข้างกว้าง เนื่องจาก มีราคาต่ำกว่าเพชรแท้ถึงมากกว่าร้อยละ 30 ในอดีตนิยมนำเพชรสังเคราะห์ไปใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อเป็นอุปกรณ์หรือเครื่องมือตัดต่างๆ เช่น ใบเลื่อยที่ต้องการความแข็งมากๆ ตัวต้านทานความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ปัจจุบันนิยมนำมาทำเป็นเครื่องประดับ เพชรสังเคราะห์ยังตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่มีความหลากหลายได้ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของขนาด การเจียระไน ซึ่งเหมาะสมกับความต้องการของผู้บริโภคในปัจจุบันที่ต้องการในสิ่งที่ถูกใจและมีราคาย่อมเยา ในอนาคตความต้องการเพชรสังเคราะห์มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเนื่องจากสภาวะทางเศรษฐกิจที่ไม่มั่นคงและมีการเปิดเผยข้อมูลลักษณะเฉพาะของเพชรสังเคราะห์มากขึ้น ทำให้ผู้บริโภคมั่นใจในคุณภาพ อีกทั้งเทคโนโลยีการผลิตเพชรสังเคราะห์ยังสามารถพัฒนาได้อย่างต่อเนื่อง

ตลาดหลักที่จะนำไปจำหน่าย คือ บริษัทคู่ค้าผู้ผลิตและขายเครื่องจักรหลักให้กับบริษัทกรณีศึกษาที่ตั้งอยู่ในประเทศสิงคโปร์ บริษัทดังกล่าวมีโครงการจะนำเพชรสังเคราะห์เจียระไนแล้วไปจำหน่ายต่อที่ประเทศจีน จากผลการวิเคราะห์ตลาดที่ประเทศจีนของบริษัท พบว่า ลูกค้าหลักคือ คู่แต่งงานที่มีฐานะปานกลางซึ่งเป็นตลาดเพชรสังเคราะห์ขนาด 0.75-1 กะรัตเพื่อใช้เป็นแหวนแต่งงาน และมีความต้องการถึงไม่น้อยกว่าปีละ 20,000 กะรัต โดยบริษัทสามารถผลิตได้ปีละไม่เกินปีละ 1,200 กะรัตเท่านั้น จึงมีความต้องการขยายฐานการผลิตมายังประเทศไทย โดยจะรับซื้อเพชรสังเคราะห์เจียระไนแล้วที่ผลิตจากโรงงานกรณีศึกษาทั้งหมดในราคาเพชรสังเคราะห์เจียระไนแล้วขนาด 1 กะรัต ในราคากะรัตละ 80,000 บาท ซึ่งเป็นราคาประมาณร้อยละ 40 ของราคาเพชรแท้ขนาดเดียวกันที่อ้างอิงจากราคา ราคาพอร์ท (Rapaport Price) ซึ่งมีการปรับปรุงให้มีความทันสมัยตลอดเวลา [4] บริษัทกรณีศึกษามีโครงการที่จะจำหน่ายเพชรสังเคราะห์ขนาดต่ำกว่า 1 กะรัตซึ่งเป็นเศษเพชรเหลือจากกระบวนการเจียระไน โดยกลุ่มเป้าหมายตลาดรองคือโรงงานผลิตเครื่องประดับประกอบตัวเรือนโดยใช้เพชรหรืออัญมณีสังเคราะห์ที่เจียระไนแล้วประกอบเป็นตัวเรือนเพื่อจำหน่ายในประเทศซึ่งมีจำนวน 124 โรงงาน

กลยุทธ์ทางการตลาด ทำการวิเคราะห์จุดอ่อน จุดแข็ง โอกาสและอุปสรรคปัจจัยภายนอกที่มีผลกระทบต่อธุรกิจ (SWOT Analysis) รายละเอียดแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 SWOT Analysis

รายการ	ผลการศึกษา/แนวทางแก้ไข
จุดแข็ง	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นธุรกิจผลิตเพชรสังเคราะห์สำหรับทำเครื่องประดับแรกของประเทศไทยและเพชรสังเคราะห์ได้มีการพัฒนาและทดลองผลิตจริงจนมีคุณสมบัติใกล้เคียงเพชรแท้ 2. เพชรสังเคราะห์ที่เป็นวัตถุดิบหลักในการสังเคราะห์เพชรนั้นสามารถนำกลับมาเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์รอบต่อไปได้ทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง 3. เศษที่ตัดออกในกระบวนการเจียรไนก็สามารถเจียรไนเป็นเพชรสังเคราะห์ขนาดเล็กต่ำกว่า 1 กะรัตจำหน่ายไปยังตลาดรองในประเทศได้
จุดอ่อน	ราคาเพชรสังเคราะห์ยังมีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเพชรเทียมต้องมีการวิเคราะห์ราคาของเศษจากการเจียรไนเพชรสังเคราะห์ที่มีขนาดเล็กกว่า 1 กะรัตในราคาต่ำลง เพื่อจำหน่ายในตลาดรองในประเทศเพื่อเป็นรายได้เสริมจากผลพลอยได้ของโครงการ อาจทำให้ราคาเพชรสังเคราะห์โดยรวมลดลง
โอกาสทางธุรกิจ ผลิตเพชร สังเคราะห์	<ol style="list-style-type: none"> 1. เพชรแท้ในปัจจุบันมีแนวโน้มราคาสูงขึ้นและหาคุณภาพดีๆ ยาก ฉะนั้นลูกค้าจึงหันมาสนใจผลิตภัณฑ์ที่คุณภาพใกล้เคียงแต่ราคาต่ำกว่า 2. ได้รับการสนับสนุนด้านการตลาด และเทคนิคในการใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัย ผลิตและเจียรไนเพชรสังเคราะห์ จากบริษัทคู่ค้า
อุปสรรคภายนอกที่มีผลกระทบต่อ โครงการ	ลูกค้ามีความไม่มั่นใจในคุณภาพของเพชรสังเคราะห์ บริษัทกรณีศึกษาจึงมีนโยบายให้ลูกค้าได้เข้ามาเยี่ยมชมกระบวนการผลิต พร้อมทั้งให้ความรู้ในเรื่องการผลิตและมาตรฐานคุณภาพเพชรสังเคราะห์

จากการศึกษาทางด้านการตลาดด้วยวิธี SWOT Analysis ซึ่งเป็นเพียงกลยุทธ์ทางการตลาดที่ศึกษาปัจจัยภายในเป็นหลัก โดยในที่นี้จะใช้วิธี Five Force Model ในการวิเคราะห์สถานการณ์การแข่งขันทางธุรกิจในปัจจุบัน รายละเอียดแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 Five Force Model

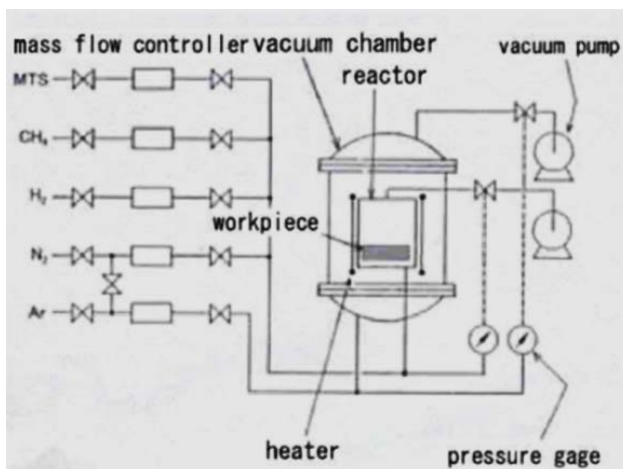
รายการ	ผลการศึกษา/แนวทางแก้ไข
ภัยคุกคามจากคู่แข่งหน้าใหม่	ในตลาดหลัก มีความสัมพันธ์เป็นอย่างดีกับบริษัท ทำให้มั่นใจได้ว่า เพชรสังเคราะห์ที่ผลิตขึ้นมาจะขายได้ทั้งหมด ภัยคุกคามจากคู่แข่งหน้าใหม่จึงไม่ได้มีผลเท่ากับการผลิตเพชรให้ได้ประสิทธิภาพตามที่ลูกค้าต้องการ
อำนาจต่อรองของลูกค้า	ในตลาดหลักนั้นทั้งผู้ขายและผู้ซื้อเพชรสังเคราะห์นั้นมียอำนาจในการต่อรองเท่าเทียมกัน มีผลประโยชน์ร่วมกันทั้งสองฝ่าย ดังที่กล่าวมาในเบื้องต้น
ภัยคุกคามจากสินค้าทดแทน	เพชรสังเคราะห์มีการพัฒนาตลอดเวลา จนอาจจะทำให้ในอนาคตมีราคาถูกลง โดยที่คุณสมบัติยังคงเดิม ซึ่งเป็นสิ่งที่บริษัทกังวลจึงได้จัดตั้งทีมวิจัยขึ้นมาเพื่อศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ ในทุกด้าน
อำนาจการต่อรองของซัพพลายเออร์	เพชรสังเคราะห์ที่เป็นประเภทผลึกเดี่ยวนั้นมีแนวโน้มทางด้านราคาสูงขึ้น แต่ทั้งนี้หากบริษัทสามารถผลิตเพชรสังเคราะห์ได้ตามเป้าหมาย บริษัทสามารถตัดเพชรสังเคราะห์ที่เติบโตเพิ่มขึ้น ทำให้ในอนาคตไม่ต้องสั่งเพชรสังเคราะห์ที่ใช้เป็นฐานรองเข้ามา เพราะ สามารถใช้ชิ้นเดิมในการผลิตครั้งต่อไปได้
สภาวะการแข่งขันในอุตสาหกรรม	หากกล่าวถึงในตลาดรอง คู่แข่งในตลาดรอง คือ บริษัทจากต่างประเทศ และจากการที่เป็นโรงงานเพียงไม่กี่แห่งในประเทศไทยที่ผลิตและเจียรไนเพชรสังเคราะห์ ทำให้มีความได้เปรียบในเรื่องการขนส่ง มีการสื่อสารได้เป็นอย่างดี และอาจเป็นทางเลือกที่โรงงานทำเครื่องประดับกำลังมองหาผู้ขายวัตถุดิบที่อยู่ในประเทศไทยที่ทั้งทำการผลิตและเจียรไนเพชรสังเคราะห์ได้เอง

จากการวิเคราะห์ด้านการตลาดของโรงงานผลิตเพชรสังเคราะห์ จะเห็นได้ว่ากลุ่มลูกค้าหลักที่รับซื้อเพชรสังเคราะห์ทั้งหมด คือ บริษัทลูกค้าในประเทศสิงคโปร์ โดยจะจำหน่ายในราคากระรัตละ 80,000 บาท และกลยุทธ์ที่สำคัญที่สามารถเพิ่มยอดขายได้ คือ การเป็นโรงงานแห่งแรกที่ผลิตเพชรสังเคราะห์ในประเทศไทย ซึ่งถือได้ว่าเป็นการช่วงชิงตลาดเพชรสังเคราะห์ในประเทศไทยจากผู้จำหน่ายเพชรสังเคราะห์ที่เป็นชาวต่างชาติ และจะมีการเปิดโรงงานให้ผู้สนใจได้เข้ามาเยี่ยมชมกระบวนการผลิต เพื่อเพิ่มความมั่นใจในคุณภาพของเพชรสังเคราะห์ที่มาจากบริษัทกรณีศึกษา

4.2 ศึกษาโครงการด้านเทคนิค

เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตเพชรสังเคราะห์ คือ เทคนิคพลาสมาความถี่ไมโครเวฟโดยอาศัยหลักการตกสะสมของไอเชิงเคมี (Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition, MPCVD) [5]

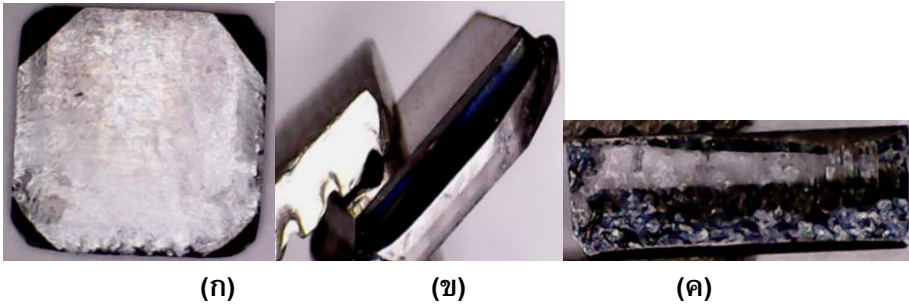
โดยภายในเครื่องจักรมีองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 2 เทคนิคดังกล่าวเป็นเทคนิคที่ไม่มีขั้วไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ภายในแหล่งกำเนิดพลาสมา ทำให้ไม่เกิดสิ่งปนเปื้อน และไม่จำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าสูง โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ดังนี้ ก๊าซไฮโดรเจนและมีเทน ถูกกระตุ้นด้วยพลาสมา จะทำให้ก๊าซทั้งสองแตกตัวเป็นเรดิคอลไฮโดรเจน (H^*) และมีเทน (CH_3^*) ดังแสดงในสมการ (1) และ (2) ตามลำดับ จากนั้นเรดิคอลของไฮโดรเจนจะไปกระตุ้นผิวของเพชรสังเคราะห์จนผิวเพชรสังเคราะห์เกิดการแตกตัว เป็นโมเลกุลของเพชรสังเคราะห์ (Diamond*) ที่พร้อมสำหรับการทำปฏิกิริยาอีกครั้ง ดังแสดงในสมการ (3) จากนั้นโมเลกุลจะทำปฏิกิริยาอีกครั้งกับกลุ่มเรดิคอลของก๊าซมีเทน เกิดเป็นเพชรสังเคราะห์ (Growth diamond) ขึ้นมาบนผิวของเพชรสังเคราะห์เดิม ดังแสดงในสมการ (4)



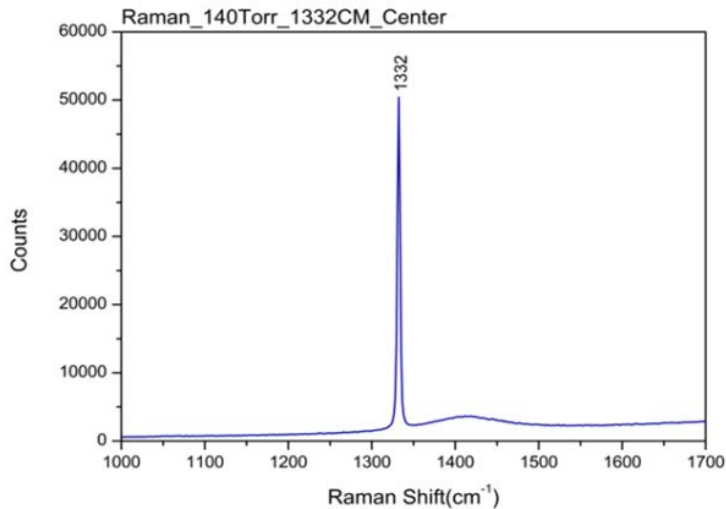
รูปที่ 2 ไดอะแกรมเครื่อง MPCVD

เมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์เพชรด้วยเทคนิคพลาสมาที่ความถี่ไมโครเวฟโดยอาศัยหลักการตกสะสมของไอเชิงเคมีจะได้เพชรสังเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า เพชร

สังเคราะห์มีผิวด้านบนที่ค่อนข้างเรียบแสดงถึงการเรียงตัวที่มีคุณภาพของเพชรสังเคราะห์ [6] ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลตรวจสอบด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี ที่ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1332 cm^{-1} ที่สูงถึง 50,000 ดังแสดงในรูปที่ 4

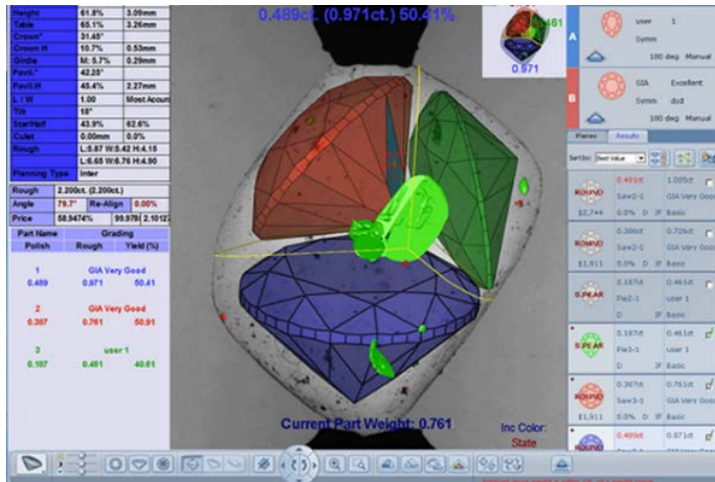


รูปที่ 3 เพชรสังเคราะห์หลังจากผ่านกระบวนการ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านข้าง (ค) ภาพตัดขวาง



รูปที่ 4 รามานสเปกตรัมของเพชรสังเคราะห์จากการตรวจวัดด้วยไมโครสโคป

การเจียรไนเพชรสังเคราะห์ โดยใช้เลเซอร์ในการเจียรไนเพชรสังเคราะห์ ขนาด 2 กระรัตให้มีขนาด 1 กระรัต ภายใต้ซอฟต์แวร์ที่เรียกว่า Sarin Technology [7] ที่ประเมินว่าจะตัดเพชรอย่างไรให้ดีที่สุด (Mapping) และทำให้เพชรเสียหายน้อยที่สุด มีเศษเพชรสังเคราะห์เกิดขึ้นน้อยที่สุดและใช้ประโยชน์ในการจำหน่ายต่อไปได้ อีกทั้งยังสามารถคัดเกรดและสีของเพชรได้ โดยมีอัตราเร็วเฉลี่ยในการเจียรไนเพชรอยู่ที่ 5 ชั้นต่อชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การทำงานของซอฟต์แวร์ Sarin Technology

จากการทดลองผลิตเพชรสังเคราะห์ในระดับห้องปฏิบัติการ ในปี 2558 มีการทดลองตามคู่มือการใช้งานของเครื่องจักรทั้งหมด 21 ครั้ง ที่ความร้อนไมโครเวฟเฉลี่ย 3,000 kW อัตราการไหลของ H_2 , CH_4 , และ Ar ที่ 300, 20, 0.2 sccm และ ความดัน 150 Torr นำเพชรสังเคราะห์ไปตรวจด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี พบว่าอัตราการเติบโตของเพชรไม่คงที่ และมีอัตราการเจริญเติบโตของเพชรสังเคราะห์เฉลี่ยเพียงไม่เกิน 0.0015 กะรัต เนื่องจากความดันสูงเกินไป ในปี 2559 มีการทดลองเพิ่มขึ้นทั้งหมด 22 ครั้ง โดยลดความดันเป็น 120 และ 140 Torr และนำเพชรสังเคราะห์ไปตรวจด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี พบว่า ที่ความดัน 140 Torr อัตราการเติบโตของเพชรสังเคราะห์ อยู่ในช่วงชั่วโมงละ 0.0065-0.0069 กะรัต และค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับ 120 Torr ที่มีอัตราการเติบโตของเพชรสังเคราะห์อยู่ในช่วงชั่วโมง 0.0028-0.0035 กะรัต ดังนั้นการคำนวณเพชรสังเคราะห์ที่ผลิตได้ในแต่นั้นจะใช้ข้อมูลที่ความดัน 140 Torr อัตราการเติบโตของเพชรสังเคราะห์ที่ ขึ้นต่ำ 0.0065 กะรัตต่อชั่วโมงและทำให้สามารถประเมินการผลิตเพชรสังเคราะห์ขนาด 2 กะรัตที่ปีละ 990 กะรัต แต่เมื่อผ่านการเจียรระไนจะทำให้เพชรสังเคราะห์มีขนาด 1 กะรัตจำนวน 495 กะรัต

รายการเครื่องจักร จำนวนเครื่องจักรและกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 3 สำหรับเครื่อง MPCVD 5 เครื่อง ซึ่งทำการผลิตเพชรสังเคราะห์ได้ 495 กะรัต มีความต้องการใช้วัตถุดิบต่างๆโดยประเมินจากการทดลองการผลิตเพชรสังเคราะห์ในระดับห้องปฏิบัติการ ในปี 2558 และ 2559 ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 รายการเครื่องจักร จำนวนเครื่องจักรและกระแสไฟฟ้า

ลำดับ	รายการ	กระแสไฟฟ้า (แอมป์:A) ต่อเครื่อง	จำนวน (เครื่อง)	กระแสไฟฟ้า (แอมป์:A)
1	เครื่อง MPCVD (Main AC Power)	70	5	350
2	ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)	7.5	5	15
3	เครื่องทำความเย็น (Chiller)	15	5	75
4	ปั๊มเครื่องทำความเย็น (Chiller pump)	2.5	5	7.5
5	เครื่องดูดอากาศ (Exhaust)	1	2	2
6	ระบบก๊าซ (Gas system)	5	1	5
7	เครื่องเจียรไนเพชรสังเคราะห์ (Cutting Machine)	5	1	5
8	เครื่องดูดควันในห้องปฏิบัติการ (Hood)	6.5	1	6.5
9	เครื่องสำรองไฟ (UPS)	180 (125 kVA)	2	360
		115.2 (80 kVA)	1	115.2
10	อุปกรณ์ทำความสะอาดคลื่นความถี่สูง (Sonicator)	2.5	1	2.5
11	ค่าไฟฟ้าทั้งโรงงาน (การใช้ไฟในส่วนต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ไฟส่องสว่าง เป็นต้น)	15	1	15

ตารางที่ 4 รายละเอียดของรายการวัตถุดิบหลัก วัตถุดิบประกอบ คุณภาพ ปริมาณ วัตถุดิบที่ใช้ทั้งหมดต่อเดือน และปริมาณที่ใช้ต่อกะรัต

ลำดับ	รายการ	ปริมาณทั้งหมด (ต่อเดือน)	ปริมาณ (ต่อ กะรัต)
1	เพชรสังเคราะห์ (Seed)	40 แผ่น	1 แผ่น
2	ก๊าซอาร์กอน (Ar/N ₂) 3,800 psi	7.425 psi	0.165 psi
3	ก๊าซไฮโดรเจน (H ₂) 3,800 psi	11,250 psi	250 psi
4	ก๊าซมีเทน (CH ₄) 3,800 psi	749.25 psi	16.65 psi
5	ก๊าซไนโตรเจน (N ₂) 3,800 psi	2,250 psi	50 psi

ตารางที่ 4 รายละเอียดของรายการวัตถุดิบหลัก วัตถุดิบประกอบ คุณภาพ ปริมาณ วัตถุดิบที่ใช้ทั้งหมดต่อเดือน และปริมาณที่ใช้ต่อกะรัต (ต่อ)

ลำดับ	รายการ	ปริมาณทั้งหมด (ต่อเดือน)	ปริมาณ (ต่อกะรัต)
6	ก๊าซไนโตรเจน (N ₂) 2,000 psi	900 psi	20 psi
7	น้ำกลั่น (Distilled water)	9 ลิตร	0.2 ลิตร
8	อะซิโตน (Acetone)	1 ลิตร	0.02 ลิตร
9	เอทานอล (Ethanol)	1 ลิตร	0.02 ลิตร
10	ไอโซโพรพานอล (Isopropanol)	1.5 ลิตร	0.03 ลิตร

การคัดเลือกสถานที่ตั้งโรงงานและการออกแบบผังโรงงาน ได้พิจารณาถึงความเหมาะสมในด้านต่างๆ เช่น ด้านการส่งออก การเดินทางของพนักงานที่จะมาทำงาน ด้านความเหมาะสมของพื้นที่ สิทธิประโยชน์ต่างๆ ที่จะได้รับ เป็นต้น สถานที่ตั้งโรงงานผลิตเพชรสังเคราะห์ที่เหมาะสมคือ นิคมอุตสาหกรรมอัญธานี ฟรีโซน 2 (Gemopolis Free Zone 2) ซึ่งเป็นฟรีโซนแห่งแรกและแห่งเดียวในกรุงเทพฯ ที่สามารถประกอบกิจการได้หลากหลาย เช่น กิจการอัญมณีและเครื่องประดับ แวนตา สินค้าแฟชั่น เป็นต้น แห่งเดียวในประเทศไทยที่ตั้งอยู่ห่างจากสนามบินสุวรรณภูมิเพียง 16 นาทีและอยู่ในเกณฑ์ได้รับการส่งเสริมการลงทุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุนในการได้รับการยกเว้นภาษีเงินได้เป็นเวลา 8 ปี ลักษณะของนิคมจะแบ่งเป็นห้องที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยทางบริษัทกรณีศึกษาต้องการพื้นที่จำนวน 3 ห้อง รวมพื้นที่ประมาณ 474 ตารางเมตร ผังโรงงานแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผังโรงงาน

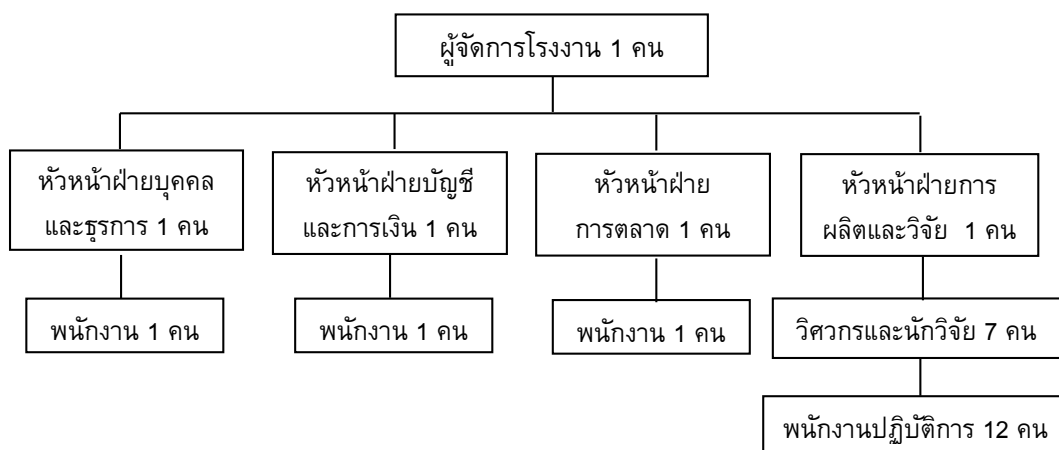
ในด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมพบว่าก๊าซที่ผ่านกระบวนการผลิตเพชรสังเคราะห์มีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.01 ppm ส่วนสารเคมี อะซิโตน เอทานอล และ ไอโซโพรพานอล ที่ใช้ล้าง Seed นั้นจะทำการเก็บรวบรวมในถังพลาสติกโดยแยกสารแต่ละชนิดออกจากกัน และทำการส่งให้บริษัทกำจัดสารเคมีต่อไป จึงเป็นอุตสาหกรรมที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

4.3 ศึกษาด้านการจัดการโครงการ

บริษัทกรณีศึกษาได้เริ่มดำเนินการวิจัยและทดลองผลิตเพชรสังเคราะห์เป็นเวลา 2 ปี ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ 1 ปี และระยะการจัดตั้งโรงงานคาดว่าจะใช้เวลาประมาณ 1 ปี สามารถดำเนินการผลิตได้ในปี 2563 ตามแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แผนการดำเนินงานโครงการ (Implementation plan)

แผนการดำเนินงานโครงการ (Implementation plan)	ระยะเวลา	พ.ศ.					
		2558	2559	2560	2561	2562	2563
ค้นคว้า วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์	5 ปี						
ศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ	1 ปี						
สั่งซื้ออุปกรณ์เครื่องจักรและวัตถุดิบในการผลิต	1 ปี						
ดำเนินการก่อสร้าง	6 เดือน						
ดำเนินการจ้างบุคลากร	6 เดือน						
ทดสอบเครื่องจักรและระบบต่างๆ ในโรงงาน	6 เดือน						



รูปที่ 7 แผนผังการจัดโครงสร้างองค์กร

ในการผลิตเพชรสังเคราะห์จำเป็นต้องมีวิศวกรและพนักงานปฏิบัติการประจำอยู่ในโรงงาน ตลอดระยะเวลาที่มีการผลิต จึงต้องมีการทำงานทุกวันวันละ 3 กะตลอดระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยจะมีพนักงานรวมทั้งสิ้น 27 คน แผนผังการจัดโครงสร้างองค์กร ตามรูปที่ 7

4.4 การวิเคราะห์โครงการด้านการเงิน

การวิเคราะห์โครงการด้านการเงิน มีข้อสมมุติฐานประกอบการคำนวณดังต่อไปนี้

- ค่าใช้จ่ายในการลงทุนในสินทรัพย์ถาวรของโรงงาน
 - (1) ค่าเครื่องจักรต่างๆ ในโรงงาน รายละเอียดเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ภายในโรงงาน รวมทั้งวัตถุดิบหลัก (Seed) รวมทั้งหมด 58.5 ล้านบาท
 - (2) ห้องชุดในนิคมอุตสาหกรรมอัญธานี ฟรีโซน 2 จำนวน 3 ห้องเป็นเงินประมาณ 24 ล้านบาท ส่วนการต่อเติมและติดตั้งระบบไฟฟ้าทั้งโรงงานเป็นเงินประมาณ 3 ล้านบาท
 - (3) การประเมินค่าใช้จ่ายอุปกรณ์ในสำนักงาน 0.353 ล้านบาท
- ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานตลอดอายุโครงการ
 - (1) ค่าไฟฟ้าปีละ 9 ล้านบาท
 - (2) ราคาค่าใช้จ่ายของก๊าซและสารเคมีปีละ 0.18 ล้านบาท
 - (3) ค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าแรงของในแต่ละตำแหน่งปีละ 0.627 ล้านบาท
 - (4) ค่าเสื่อมราคา คำนวณโดยวิธีเส้นตรง (Straight line method) โดยเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ ภายในโรงงาน คิดอัตราค่าเสื่อมราคาปีละร้อยละ 20 ส่วนห้องชุดในนิคมอุตสาหกรรมอัญธานี ฟรีโซน 2 คิดอัตราค่าเสื่อมราคาปีละร้อยละ 5
 - (5) ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสภาพตามรอบของเครื่องจักรครั้งละ 1.1 ล้านบาท
 - (6) ภาษีเงินได้ โรงงานได้รับการส่งเสริมการลงทุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน (Board of Investment : BOI) เนื่องจาก เป็นสิทธิที่โรงงานที่ตั้งอยู่ในนิคมอัญธานีได้ ทำให้ไม่ต้องเสียภาษี 8 ปีแรกที่ผลิต
- รายได้จากการจำหน่ายคำนวณเฉพาะในส่วนที่จำหน่ายให้บริษัทคู่ค้าตามข้อตกลง ในปริมาณปีละ 495 กะรัต ราคากะรัตละ 80,000 บาท เป็นเงินปีละ 39.6 ล้านบาท

แผนการระดมทุน จะมีการกู้ยืมเงินจากธนาคารร้อยละ 65 ของค่าใช้จ่ายในการลงทุนจ่ายคืนเงินต้นปีละเท่าๆกันและจ่ายดอกเบี้ยตามยอดหนี้ค้างชำระต้นปีด้วยอัตราดอกเบี้ยร้อยละ 10 ต่อปีงบประมาณเงินสดเพื่อการวิเคราะห์โครงการดังแสดงในตารางที่ 6 ตามระยะเวลาในการวิเคราะห์โครงการ 10 ปี ที่อัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ผู้ลงทุนพึงพอใจร้อยละ 17 โครงการนี้มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) 10.40 ล้านบาท ระยะเวลาในการคืนทุนประมาณ 7 ปี 11 เดือน และมีอัตราผลตอบแทน

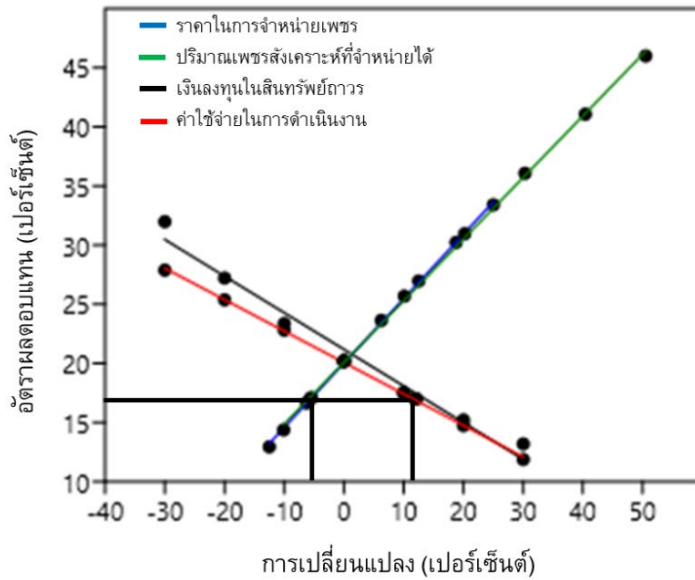
ภายในของโครงการ (IRR) 20.20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าอัตราผลตอบแทนการลงทุนขั้นต่ำ จึงสามารถสรุปได้ว่าโครงการดังกล่าวมีความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์

ตารางที่ 6 กระแสเงินสดเพื่อการวิเคราะห์โครงการ (ล้านบาท)

รายการ	ก่อสร้าง			ดำเนินการผลิต								มูลค่าซาก
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
กระแสเงินสดขาเข้า	-	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	12.00
1. เงินดำเนินงานขาเข้า												
รายได้จากการขาย	-	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	-
กระแสเงินสดขาออก	85.9	19.96	18.80	18.80	18.80	18.80	18.80	18.80	18.80	22.72	22.72	-
2. ทรัพย์สินถาวร	85.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3. ทรัพย์สินหมุนเวียนที่เพิ่มขึ้น	-	1.16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4. ค่าใช้จ่ายดำเนินงาน	-	18.80	18.80	18.80	18.80	18.80	18.80	18.80	18.80	18.80	18.80	-
5. ภาษีนิติบุคคล (20%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.92	3.92	-
กระแสเงินสดสุทธิ	-85.85	19.64	20.80	20.80	20.80	20.80	20.80	20.80	20.80	16.88	16.88	12.00
กระแสเงินสดสุทธิสะสม	-85.85	-66.21	-45.42	-24.62	-3.83	16.97	37.77	58.56	79.36	96.23	113.11	125.1
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (at 17.0%)	-85.85	16.79	15.19	12.98	11.10	9.49	8.11	6.93	5.92	4.11	3.51	2.13
มูลค่าปัจจุบันสุทธิสะสม	-85.85	-69.07	-53.88	-40.89	-29.79	-20.31	-12.20	-5.27	0.65	4.76	8.27	10.40
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (at 17.0%)	10.40											
อัตราผลตอบแทนภายใน	20.20											
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)	7.89											

4.5 ศึกษาวิเคราะห์ความไว

จากการวิเคราะห์ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปร 3 ตัวแปรคือ ราคาจำหน่ายและปริมาณการจำหน่าย ค่าใช้จ่ายในการลงทุนในทรัพย์สินถาวร และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการผลิต ในช่วง +/- ร้อยละ 20 จะพบว่าปัจจัยที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงการตัดสินใจในการลงทุนมากที่สุดตามลำดับดังนี้ คือ ราคาจำหน่ายและปริมาณการจำหน่าย ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการผลิต และค่าใช้จ่ายในการลงทุนในทรัพย์สินถาวร หากมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ต่ำกว่าร้อยละ 5.6, สูงกว่าเดิมร้อยละ 11.9, และ สูงกว่าเดิมร้อยละ 12.1 ตามลำดับ กรณีใดกรณีหนึ่งจะทำให้โครงการมีอัตราผลตอบแทนต่ำกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ผู้ลงทุนพึงพอใจร้อยละ 17 แสดงให้เห็นว่าโรงงานผลิตเพชรสังเคราะห์ค่อนข้างไวต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรดังกล่าว ดังแสดงตามรูปที่ 8



รูปที่ 8 การวิเคราะห์ความไว

4.6 วิเคราะห์ความเสี่ยงของโครงการ

เนื่องจากปัจจัยราคาและปริมาณการจำหน่าย หากมีการเปลี่ยนแปลงไปเพียงต่ำกว่าร้อยละ 5.6 ก็จะมีผลกระทบต่อการตัดสินใจในการลงทุน ในเรื่องราคาจำหน่ายได้ถูกกำหนดอย่างแน่นอน จากลูกค้า ดังนั้นปัญหาที่สำคัญคือการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการผลิตและจำหน่าย จึงได้ทำการวิเคราะห์รูปแบบของความเสียหายและผลกระทบ (Failure Modes and Effects Analysis: FMEA) [8] โดยร่วมกับวิศวกรและผู้วิจัยเพื่อวิเคราะห์จากประสบการณ์ในการทดลองผลิตจาก 2 ปีที่ผ่านมา และเสนอแนะแนวทางปฏิบัติในการป้องกันไม่ให้เกิดความเสี่ยงในการเกิดปริมาณการผลิตที่ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์รูปแบบของความเสียหายและผลกระทบ (Failure Modes and Effects Analysis : FMEA) ต่อกระบวนการผลิตเพชรสังเคราะห์ที่ด้านเทคนิค

รายการ	ความเสียหาย	ผลกระทบ	S	สาเหตุ	O	การควบคุม	D	RPN	สิ่งที่ควรปฏิบัติ
เครื่อง MPCVD	ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องได้	เพชรสังเคราะห์ใหม่	4	อุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิอัตโนมัติ (sensor) ในเครื่อง MPCVD ชั่วครู่	2	ตรวจสอบและสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิอัตโนมัติก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตที่กำหนด	2	16	ปิดเครื่อง และทำการสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิอัตโนมัติตามระยะเวลาที่กำหนด
	ระบบพลาสมาไม่ทำงาน	ไม่สามารถผลิตเพชรสังเคราะห์ได้	4	แหล่งกำเนิดพลาสมา (MW-Generator) เสื่อมสภาพ	1	เปลี่ยนแหล่งกำเนิดพลาสมาตามอายุการใช้งานที่ผู้ขายเครื่องจักรแนะนำ	2	8	เปลี่ยนแหล่งกำเนิดพลาสมา
ระบบก๊าซ	ท่อก๊าซรั่ว	ปริมาณก๊าซไม่คงที่ สิ้นเปลืองก๊าซ หากเกิดประกายไฟในบริเวณที่เกิดการรั่วจะทำให้เกิดไฟไหม้ได้	4	เกิดการรั่วของท่อก๊าซ ข้อต่อของท่อก๊าซในจุดต่างๆ ไม่แน่นจนทำให้ก๊าซรั่ว	3	ใช้ท่อก๊าซที่มีคุณภาพ ทนทานต่อการกัดกร่อน ตรวจสอบการรั่วไหลของก๊าซตามท่อทุกสัปดาห์	2	24	เปลี่ยนท่อทันทีที่พบการรั่วไหลของก๊าซ
	ท่อก๊าซตัน	ปริมาณก๊าซไม่คงที่ สิ้นเปลืองก๊าซ	3	ทำความสะอาดท่อไม่สะอาด ในช่วงที่มีการเปลี่ยนถังที่มีสิ้นเปลืองก๊าซ	1	ตรวจสอบการไหลของก๊าซตามท่อทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนท่อก๊าซ	1	3	ทำความสะอาดท่อใหม่อีกครั้ง
เครื่องทำความเย็น	มีมเครื่องทำความเย็นทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพ	ไม่สามารถปรับน้ำเย็นไปหล่อเลี้ยงเครื่อง MPCVD ขณะทำการสังเคราะห์เพชรได้	3	ระดับน้ำในเครื่องทำความเย็นต่ำเกินไป	1	ตรวจสอบระดับน้ำในเครื่องทำความเย็นทุกวัน	1	3	เติมน้ำในเครื่องทำความเย็นให้พอดีกับระดับที่กำหนดไว้
				ท่อตันจากการใช้น้ำประปาที่มีสิ่งปนเปื้อนหรือแร่ธาตุซึ่งทำให้มีหินปูนไปเกาะภายในท่อ		ใช้น้ำกลั่นที่ปราศจากแร่ธาตุที่ทำให้เกิดหินปูน			เปลี่ยนท่อใหม่และใช้น้ำกลั่นแทนน้ำประปา

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์รูปแบบของความเสียหายและผลกระทบ (Failure Modes and Effects Analysis : FMEA) ต่อกระบวนการผลิตเพชรสังเคราะห์ในต้นเทคนิค (ต่อ)

รายการ	ความเสียหาย	ผลกระทบ	S	สาเหตุ	O	การควบคุม	D	RPN	สิ่งที่ควรปฏิบัติ
เครื่องทำความเย็น (ต่อ)	ระบบทำความเย็นไม่สามารถลดอุณหภูมิภายในเครื่องประสิทธิภาพ	ไม่สามารลดอุณหภูมิภายในเครื่อง MPCVD ได้	4	อุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิอัตโนมัติ (sensor) ในเครื่องทำความเย็นชำรุด	1	ตรวจสอบอุณหภูมิภายในเครื่องทำความเย็นทุกวัน	2	8	ซ่อมหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิอัตโนมัติ
เครื่องสำรองไฟ	เครื่องสำรองไฟไม่ทำงาน	เมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าเครื่องจักรต่าง ๆ ในโรงงานหยุดทำงาน	4	แบตเตอรี่หมดอายุหรือชำรุด	2	เปลี่ยนแบตเตอรี่ตามอายุการใช้งานที่ระบุไว้ และซ่อมบำรุงตามระยะเวลาที่กำหนด	1	8	เปลี่ยนแบตเตอรี่
เครื่องดูดอากาศ	ใช้เวลาในการดูดอากาศภายในเครื่อง MPCVD นานเกิน 1 ชั่วโมง (ปกติไม่เกิน 5 นาที)	ภายในเครื่องมีอากาศหลงเหลือซึ่งทำให้เพชรที่สังเคราะห์ได้มีควมบริสุทธิ์น้อยลงสังเคราะห์เพชรต่ำกว่าเป้าหมายที่กำหนดไว้	3	สภาพเสื่อมสภาพ (ย่อยหรือขาด)	2	เปลี่ยนสายพานตามอายุการใช้งานที่ระบุ และซ่อมบำรุงตามระยะเวลาที่กำหนด	2	12	เปลี่ยนสายพาน
เครื่องดูดควันในห้องปฏิบัติการ	มีควัน ไอ หรือกลิ่นจากสารเคมี หลงเหลืออยู่ภายในห้องปฏิบัติการและบริเวณใกล้เคียง	ควัน ไอ หรือกลิ่นจากสารเคมี เข้าสู่ร่างกายพนักงาน ทำให้เกิดการระคายเคืองตามร่างกายได้	4	แผ่นกรองเสื่อมสภาพ	1	เปลี่ยนแผ่นกรองตามอายุการใช้งานที่ระบุ และซ่อมบำรุงตามระยะเวลาที่กำหนด	1	4	เปลี่ยนแผ่นกรอง

4.7 การวิเคราะห์ผลกระทบของโครงการด้านเศรษฐกิจและสังคม

ในการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจและสังคมภายในประเทศ [9] เป็นเวลา 10 ปี พบว่ามูลค่าเพิ่ม (Value Added) ของโครงการคิดเป็นมูลค่าปัจจุบัน 33.41 ล้านบาท และมีผลตอบแทนทางสังคม (Social Surplus) ที่ประเทศได้รับจากการจัดตั้งโรงงานผลิตเพชรสังเคราะห์ คิดเป็นมูลค่าปัจจุบัน 3.45 ล้านบาท ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 มูลค่าเพิ่มของโครงการ (Value Added) และผลตอบแทนทางเศรษฐกิจและสังคม (Socio-economic Benefit) ภายในประเทศ (ล้านบาท)

YEAR	ก่อสร้าง			ดำเนินการผลิต								รวม
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1. รายได้จากการขาย	0.00	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	39.60	396.00
2. มูลค่าของวัตถุดิบ	91.85	12.44	11.28	11.28	11.28	11.28	11.28	11.28	11.28	11.28	11.28	205.81
วัตถุดิบ (ในประเทศ)	0.00	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	1.80
สาธารณูปโภค	0.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	90.00
ค่าบำรุงรักษาสภาพ เครื่องจักร	0.00	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	11.00
ค่าใช้จ่ายคงที่ ณ โรงงาน	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	10.00
เงินลงทุนทั้งหมด	91.85	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	93.01
3. มูลค่าเพิ่มในประเทศสุทธิ	-91.85	27.16	28.32	28.32	28.32	28.32	28.32	28.32	28.32	28.32	28.32	190.19
4. ค่าเงินปัจจุบัน (17%)	0.85	0.73	0.62	0.53	0.46	0.39	0.33	0.28	0.24	0.21	0.18	
5. มูลค่าปัจจุบันของมูลค่า เพิ่มสุทธิของประเทศ	-78.50	19.84	17.68	15.11	12.92	11.04	9.44	8.07	6.89	5.89	5.04	33.41
6. ค่าแรงงาน	0.00	7.52	7.52	7.52	7.52	7.52	7.52	7.52	7.52	7.52	7.52	75.24
7. มูลค่าปัจจุบันของ ค่าแรงงาน	0.00	5.50	4.70	4.02	3.43	2.93	2.51	2.14	1.83	1.56	1.34	29.96
8. มูลค่าเพิ่มด้านสังคม (Social Surplus)	-78.50	14.35	12.99	11.10	9.49	8.11	6.93	5.92	5.06	4.33	3.70	3.45

ด้านการประหยัดเงินตราต่างประเทศ พบว่า ในส่วนของค่าใช้จ่ายเริ่มต้นของโรงงานไม่ว่าจะเป็นเครื่องจักรและวัตถุดิบหลัก มีการนำเข้าจากต่างประเทศทั้งสิ้น แต่เมื่อโรงงานมีการผลิตก็ไม่จำเป็นต้องส่งวัตถุดิบหลัก คือ เพชรสังเคราะห์ เนื่องจาก เมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์เพชรแล้ว

ผู้ผลิตสามารถนำเอาเศษเจียรไนเพชรสังเคราะห์ที่สังเคราะห์เพิ่มขึ้นมา เป็นฐาน (Seed) ไปสังเคราะห์เพชรสังเคราะห์ต่อได้ เพราะฉะนั้น โรงงานจะเสียดุลการค้าแค่เพียงช่วงแรกที่ยังไม่มีรายได้เท่านั้น อีกทั้งรายได้ทั้งหมดของโรงงานมาจากการจำหน่ายเพชรสังเคราะห์ไปยังประเทศสิงคโปร์ ดังนั้นมูลค่าของการประหยัดเงินตราต่างประเทศจากการคำนวณในระยะเวลา 10 ปี คิดเป็นมูลค่าปัจจุบันสุทธิรวม 128.20 ล้านบาท

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาความเป็นไปได้ของการลงทุนจัดตั้งโรงงานผลิตเพชรสังเคราะห์ ภายใต้กระบวนการเทคนิคพลาสมาความถี่ไมโครเวฟโดยอาศัยหลักการตกสะสมของไอเชิงเคมี (Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition, MPCVD) และเทคนิคการเจียรไน Sarin Technology ซึ่งในเบื้องต้นมีข้อตกลงในการจำหน่ายเพชรสังเคราะห์เจียรไนแล้วขนาด 1 carat ในปริมาณทั้งหมดที่โรงงานผลิตได้ปีละ 495 carat ในราคากระดละ 80,000 บาท ให้กับผู้ผลิตและขายเครื่องจักรหลักให้กับโรงงาน จากแบบจำลองทางการเงินของโรงงาน สามารถประมาณการค่าอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการร้อยละ 20.20 ที่อัตราผลตอบแทนการลงทุนขั้นต่ำที่ผู้ลงทุนพึงพอใจร้อยละ 17 มูลค่าปัจจุบันสุทธิของกระแสเงินสดหลังหักภาษี 10.40 ล้านบาท ระยะเวลาในการคืนทุน 7 ปี 11 เดือน โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราผลตอบแทน (IRR) กับอัตราผลตอบแทนการลงทุนขั้นต่ำ (MARR) พบว่า IRR ของโครงการมีค่ามากกว่า จึงสามารถสรุปได้ว่าโครงการดังกล่าวมีความน่าลงทุน จากนั้นได้วิเคราะห์ความไวของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการตัดสินใจในการลงทุน 4 ปัจจัย พบว่า ราคาและปริมาณการจำหน่ายเพชรสังเคราะห์หากลดลงจากที่กำหนดเพียงร้อยละ 5.6 จะมีผลกระทบต่อการตัดสินใจเพื่อการลงทุน เพื่อป้องกันความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นจากการลดลงของปริมาณการผลิตและจำหน่ายจึงได้มีในการวิเคราะห์รูปแบบของความเสียหายและผลกระทบ (Failure Modes and Effects Analysis : FMEA) พบว่า ค่า RPN ของระบบก๊าซมีค่าสูงที่สุดอยู่ที่ 24 ซึ่งเป็นความเสียหายที่สามารถทำให้โรงงานต้องหยุดกระบวนการ เพื่อหาสาเหตุและทดสอบระบบเมื่อทำการซ่อมแซมเสร็จสิ้น ทำให้การป้องกันไม่ให้ระบบก๊าซเสียหายจึงเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดที่จะต้องควบคุมไม่ให้เกิดความเสียหาย นอกจากนี้ โรงงานยังก่อให้เกิดผลดีทางด้านเศรษฐกิจและสังคมภายในประเทศไทยตามระยะเวลาในการวิเคราะห์โครงการ 10 ปี ที่อัตราผลตอบแทนขั้นต่ำ 17 เปอร์เซ็นต์ โครงการมีมูลค่าเพิ่ม (Value Added) คิดเป็นมูลค่าปัจจุบันเท่ากับ 33.41 ล้านบาท มีการประหยัดเงินตราต่างประเทศ (Foreign exchange earnings) คิดเป็นมูลค่าปัจจุบันเท่ากับ 128.20 ล้านบาท มีผลประโยชน์ต่อประเทศด้านสังคม (Social surplus) คิดเป็นมูลค่าปัจจุบันเท่ากับ 3.45 ล้านบาท

งานวิจัย แบบจำลองทางการเงินจะมีรายได้จากการขายเพชรสังเคราะห์ให้กับทางผู้ผลิตและขายเครื่องจักรหลักในประเทศสิงคโปร์เท่านั้น เป็นตลาดหลักของโรงงาน ซึ่งยังไม่มีการค้า

รายได้ในส่วนของเศษเพชรที่เป็นผลได้จากการเจียรไนเพชรสังเคราะห์ โดยการที่ไม่มี การประมาณรายได้ส่วนนี้ เนื่องจาก รายได้ที่ไม่แน่นอน ไม่ทราบถึงขนาดของเศษเพชรที่ขนาดต่ำกว่า 1 กระรัต และกลุ่มลูกค้ารองยังไม่ชัดเจน แต่จากการสอบถามผ่านแบบสอบถามบุคคลทั่วไปใน ประเทศจำนวน 100 คน ทำให้ทราบว่าความต้องการส่วนใหญ่ของบุคคลทั่วไปในขนาดเพชรสังเคราะห์คือ 0.5 – 0.75 กระรัต ซึ่งในอนาคตหากสามารถรับรู้รายได้ส่วนนี้ได้อย่างชัดเจน จะทำให้ การศึกษาความเป็นไปได้ในการจัดตั้งโรงงานผลิตเพชรสังเคราะห์มีความน่าลงทุนมากยิ่งขึ้น เพราะ รายได้ที่เพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลดีต่อโรงงานไม่ว่าจะเป็น อัตราผลตอบแทนที่เพิ่มมากขึ้น ระยะเวลา การคืนทุนที่สั้นลงและมูลค่าเพิ่มของโครงการจะมีมากขึ้น

References

- [1] The Gem and Jewelry Institute of Thailand (Public Organization). Thailand's Gem and Jewelry Import-Export Performance 2016 [Internet]. 2017 [cited 2018 Aug 28]. Available from: https://www.git.or.th/thai/info_center/trade_review/2017/GIT_TRADE_REVIEW_2016.pdf. (In Thai)
- [2] Moliwa Sirikhet. Business and Competitive Strategies: A Case Study of the Thai Mart Store [Internet]. 2011 [cited 2017 Sep 05]. Available form: <http://eprints.utcc.ac.th/128/37/128fulltext.pdf>. (In Thai)
- [3] Behrens W, Hawranek P. Manual for the preparation of industrial project. United Nations industrial development organization. The United Nations, Vienna Austria. 1991
- [4] Zilvr Diamond. Rapaport Diamond Report Update [Internet]. 2017. [cited 2017 Dec 11]. Available from: https://www.zilvr-diamond.com/rapaport_diamond_price-html/. (In Thai)
- [5] Wicharn T and Warawoot T. Synthesis of Diamond films by Microwave Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition [Internet]. 2010 [cited 2017 Aug 20]. Available from:http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/78239/8fb9d26f81bf64a2b400ca43795016b0?Resolve_DOI=10.14457/K MITL.res.2010.21. (In Thai)
- [6] Jiteng G, Kai H, Keming F, Xiao W, Zhihai L and Zhihua S. Characterization of the interior structure of synthetic diamond particles. Journal of Crystal Growth 2016;451:165-9.
- [7] Sarine Technologies Ltd. Sarin Offers Galaxy Ultra in India [Internet]. 2014 [Cited 2018 Mar 31]. Available from: <http://dclacertificationlaboratory.blogspot.com/2014/01/sarin-offers-galaxy-ultra-in-india.html>.

- [8] Hamid RF, Navid A, Hossein L, Mohammad B and Sina N. Risk analysis of geothermal power plants using Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) technique. Energy Conversion and Management 2013;72:69-76.
- [9] Azzabi A, Khane R, Behrens W. Manual for evaluation of industrial projects. United Nations industrial development organization. The United Nations, Vienna Austria; 1984.

ประวัติผู้เขียนบทความ



สรารัตน์ วิจิตรคุณวัฒน์, วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ วศ.ม. (การจัดการวิศวกรรม) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน E-mail: saranrat_pleng27@hotmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนจัดตั้งโรงงานผลิตเพชรสังเคราะห์



รศ. ตันสนีย์ สุภามา, M.S. (Industrial Engineering), Illinois Institute of Technology, USA., E-mail: fengsas@ku.ac.th
วุฒิวิศวกร สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, ผู้ทรงคุณวุฒิพิเศษ สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร
งานวิจัยที่สนใจ: Engineering project feasibility study, Process Improvement



รศ. พิชราภรณ์ ญาณภีร์, D.Tech.Sc. (Industrial Engineering), Asian Institute of Technology (AIT), E-mail: fengppy@ku.ac.th
รองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร
งานวิจัยที่สนใจ: Applied Operations Research, Multiple Criteria Decision Making, Supply Chain Management, and Cost Management

การศึกษารูปแบบเขื่อนป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมืองเพื่อ
จัดทำฐานข้อมูลในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

A STUDY ON RIVER BANK DAM OF THE DEPARTMENT OF PUBLIC
WORKS AND TOWN & COUNTRY PLANNING TO DEVELOP A DATA
BASE FOR AYUTTHAYA PROVINCE

เอนก จินฉนวนโส¹ และ วิกรม พนิชการ²

¹วิศวกรโยธาชำนาญการ, กรมโยธาธิการและผังเมือง

218/1 ถนนพระราม 6 พญาไท กรุงเทพมหานคร 10400, anakedpt@gmail.com

²ผู้อำนวยการหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
1761 ถนนพัฒนาการ สวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250, vicrom@hotmail.com

Anake Jinnawaso¹ and Vicrom Panichacarn²

¹Professional Civil Engineer, Department of Public Works and Town & Country Planning
218/1 Rama VI Rd Phaya Thai Bangkok 10400 Thailand, anakedpt@gmail.com

²Director of Master of Engineering Program in Civil Engineering, Kasem Bundit University
1761 Pattanakarn Rd., Suan Luang, Bangkok 10250 Thailand, vicrom@hotmail.com

บทคัดย่อ

เนื่องด้วยประเทศไทยประสบปัญหาน้ำหลากและน้ำท่วมอยู่เป็นประจำ แต่ในปัจจุบันข้อมูลของเขื่อนป้องกันตลิ่งที่เป็นสาธารณะยังไม่สมบูรณ์นัก ทำให้การนำไปใช้บริหารจัดการน้ำยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ผู้ทำการศึกษาจึงเห็นความสำคัญของการรวบรวมและศึกษารูปแบบเขื่อนป้องกันตลิ่งและโครงการเขื่อนป้องกันตลิ่งเพื่อจัดทำฐานข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อสาธารณะ การศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ (1) การรวบรวมรูปแบบเขื่อนป้องกันตลิ่งที่ออกแบบโดยกรมโยธาธิการและผังเมืองทั้งหมดทั้งจากส่วนกลางและส่วนภูมิภาคเข้าไว้ด้วยกัน แล้วทำการศึกษาเพื่อจัดประเภท และ (2) การรวบรวมข้อมูลโครงการเขื่อนป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมืองที่สร้างแล้วเสร็จในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา เพื่อสร้างฐานข้อมูลที่พร้อมนำไปใช้งานได้ทันที ผลการศึกษาสรุปได้ว่า (1) เขื่อนป้องกันตลิ่งมีทั้งสิ้น 51 รูปแบบ เมื่อนำมาพิจารณาโดยใช้ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างทางวิศวกรรมเป็นหลัก สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ได้แก่ เขื่อนป้องกันตลิ่งแนวลาด และเขื่อนป้องกันตลิ่งแนวตั้ง อีกทั้งสามารถแบ่งย่อยเขื่อนป้องกันตลิ่งแนวลาดได้เป็น 9 ประเภท 17 รูปแบบ และเขื่อน

ป้องกันตลิ่งแนวตั้งแบ่งย่อยได้เป็น 11 ประเภท 34 รูปแบบ จากนั้นจัดทำรายละเอียดประกอบได้แก่ รูปตัดเขื่อน รายละเอียดของสันเขื่อน ส่วนป้องกันการกัดเซาะ และ ฐานเขื่อน และ (2) โครงการเขื่อนป้องกันตลิ่งมีทั้งสิ้นจำนวน 58 โครงการ ข้อมูลที่รวบรวมได้แก่ ตำแหน่งที่ตั้งโครงการ ละติจูด ลองจิจูด ความยาวของเขื่อน ความยาวเสาเข็มที่ใช้ในโครงการ ปีที่เริ่มดำเนินการ ปีที่แล้วเสร็จ และ ชื่อรูปแบบของเขื่อนป้องกันตลิ่งที่ได้จัดประเภทไว้แล้ว ข้อมูลที่รวบรวมได้ถูกนำมาสร้างฐานข้อมูล สำหรับให้หน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการน้ำและผู้ที่เกี่ยวข้องสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เขื่อนป้องกันตลิ่ง, กรมโยธาธิการและผังเมือง, ฐานข้อมูลเขื่อนป้องกันตลิ่ง

ABSTRACT

Thailand suffers from floods frequently but the data of the river bank dam is still incomplete for public use resulting in some parts of water management are not effective. Then, the collecting and studying of river bank dam are necessary in developing the data base for public use. This study has two parts: (1) collecting river bank dam types designed by the Department of Public Works and Town & Country Planning (DPT), both centrally and regionally, and classifying the dam types, and (2) collecting data of existing river bank dam projects of DPT in Ayutthaya province and creating a database readily to use. The study results could be summarized as the followings. (1) Total 51 types of DPT river bank dam were collected. By taking physical characteristics and engineering structures into consideration, they could be divided into two groups: horizontal and vertical river bank dams. Furthermore, the horizontal group can be classified and code-named into 9 formats with 17 types and the vertical group can also be classified and code-named into 11 formats with 34 types. (2) Information from all 58 DPT river bank dam projects in Ayutthaya Province was collected. The obtained information is project location, latitude, longitude, dam length, pile depth, construction beginning year finishing year, and the river bank dam type that has been code-named earlier. This completed data base allows agencies related to water management or any people to acquire the information easily and effectively.

KEYWORDS: River Bank Dam, Department of Public Works and Town & Country Planning, River Bank Dam Data Base

1. บทนำ

ปัญหาการกัดเซาะและการพังทลายของตลิ่งริมแม่น้ำในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยาเป็นปัญหาหนึ่งที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อการดำรงชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนและทางราชการ อันได้แก่ อาคารบ้านเรือนที่พักอาศัย สถานที่ราชการ ศาสนสถาน โบราณสถาน และระบบสาธารณูปโภคต่างๆ คิดเป็นมูลค่าความเสียหายประมาณมหาศาล อีกทั้งยังมีแนวโน้มที่จะเพิ่มปริมาณความเสียหายมากขึ้นทุกปี ปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจ สังคม และสภาพแวดล้อม กรมโยธาธิการและผังเมืองจึงได้ดำเนินการออกแบบเขื่อนป้องกันตลิ่งหลายรูปแบบ และนำมาใช้ก่อสร้างในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาจำนวนหลายโครงการ ให้สอดคล้องกับปัจจัยที่แตกต่างกันตามสถานที่ก่อสร้าง เช่น สภาพตลิ่ง คุณสมบัติของดิน กระแสน้ำ ความกว้างของลำน้ำ ความต้องการใช้สอยพื้นที่บริเวณเขื่อน และงบประมาณ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไม่มีหน่วยงานใดดำเนินการเก็บข้อมูลที่สำคัญของโครงการต่างๆ ไว้ทั้งหมด จึงทำให้เกิดผลกระทบตามมาในภายหลัง อาทิเช่น โครงการใหม่และเก่ามีพื้นที่ซ้อนทับกัน รูปแบบเขื่อนป้องกันตลิ่งไม่สัมพันธ์สอดคล้องกัน การวางแผนพัฒนาพื้นที่ไม่เกิดความต่อเนื่อง เป็นต้น ดังนั้นผู้ทำการศึกษาจึงเห็นความสำคัญและได้ทำการรวบรวมรูปแบบเขื่อนป้องกันตลิ่งทั้งหมดที่ออกแบบโดยกรมโยธาธิการและผังเมือง และทำการรวบรวมรายละเอียดโครงการเขื่อนป้องกันตลิ่งทั้งหมดในความรับผิดชอบของกรมโยธาธิการและผังเมือง เพื่อจัดทำฐานข้อมูลเขื่อนป้องกันตลิ่งในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาในการศึกษา

2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- (1) เพื่อรวบรวมรูปแบบของเขื่อนป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมือง ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน
- (2) เพื่อศึกษาแยกประเภทและจัดทำฐานข้อมูลของเขื่อนป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมือง
- (3) เพื่อรวบรวมข้อมูลของโครงการเขื่อนป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมืองที่ได้ดำเนินการก่อสร้างแล้วเสร็จในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา อันได้แก่ ตำแหน่งที่ตั้งโครงการ ละติจูด ลองจิจูด ความยาวของเขื่อน ความยาวเสาเข็มที่ใช้ในโครงการ ปีที่เริ่มดำเนินการ ปีที่แล้วเสร็จ และรูปแบบของเขื่อนป้องกันตลิ่ง
- (4) เพื่อจัดทำฐานข้อมูลเขื่อนป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมืองในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

3. รูปแบบเขื่อนป้องกันตลิ่งทั้งหมดของกรมโยธาธิการและผังเมือง

ในอดีตที่ผ่านมาเขื่อนป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมืองได้ดำเนินการออกแบบและก่อสร้างไว้หลากหลายรูปแบบแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับ (1) ปัจจัยทางสังคม อันได้แก่ ประชาชนใช้สอยพื้นที่ของชุมชน (2) ปัจจัยทางวิศวกรรม เช่น ความสูงของตลิ่ง ข้อมูลดิน ลักษณะของลำน้ำ ความกว้างของลำน้ำ ความเร็วของกระแสน้ำ ระดับน้ำสูงสุดและต่ำสุด เป็นต้น และ (3) ปัจจัยทางด้านงบประมาณ ดังนั้นผู้ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเขื่อนป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมือง ทั้งภาครัฐและภาคเอกชน ได้พิจารณาจัดกลุ่มเขื่อนป้องกันตลิ่งรูปแบบต่างๆไว้มีสาระโดยสรุปได้ดังนี้

เสถียร เจริญเหรียญ [1] บริษัท บีคอน เอ็นจิเนียริง คอนซัลแต้นส์ จำกัด [2] และ บริษัท ปัญญา คอนซัลแต้นส์ จำกัด [3] ได้แบ่งประเภทเขื่อนป้องกันตลิ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ โดยอาศัยลักษณะทางกายภาพเขื่อนป้องกันตลิ่งเป็นหลัก คือ เขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดลาดเอียง เขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดแนวตั้ง

ในขณะที่ สำนักสนับสนุนและพัฒนาตามผังเมือง กรมโยธาธิการและผังเมือง [4] และ สิทธิพันธ์ เบ็ญจสุพัฒน์พันธ์ [5] ได้แบ่งประเภทเขื่อนป้องกันตลิ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ โดยอาศัยลักษณะของโครงสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งเป็นหลัก คือ เขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดไม่มีโครงสร้างกันดิน และเขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดมีโครงสร้างกันดิน

3.1 การรวบรวมรูปแบบเขื่อนป้องกันตลิ่งทั้งหมดของกรมโยธาธิการและผังเมือง

การรวบรวมรูปแบบเขื่อนป้องกันตลิ่งจากกองวิศวกรรมโครงสร้าง, สำนักสนับสนุนตามผังเมือง กรมโยธาธิการและผังเมือง (ส่วนกลาง) และ สำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัด (ส่วนภูมิภาค) ดำเนินการตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2558 ถึง เมษายน 2561 สามารถรวบรวมรูปแบบเขื่อนป้องกันตลิ่งได้รวมทั้งสิ้น 51 รูปแบบ

3.2 การศึกษาและจำแนกประเภทของเขื่อนป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมือง

เมื่อพิจารณารูปแบบเขื่อนตามลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างทางวิศวกรรมเป็นหลัก สามารถแบ่งหมวดหมู่เขื่อนป้องกันตลิ่งทั้ง 51 รูปแบบได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ดังนี้

1) เขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดแนวลาด เหมาะกับลาดตลิ่งที่มีเสถียรภาพเพียงพอที่จะรับแรงกระทำจากกระแสน้ำ ความลาดเอียงทั่วไปไม่เกิน $1 : 2$ ไม่จำเป็นต้องสร้างโครงสร้างทางวิศวกรรมเพื่อรับแรงดันทางข้างของดิน เขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดแนวลาดสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 9 ประเภท 17 รูปแบบ

2) เชื้อนป้องกันตลิ่งชนิดแนวตั้ง เหมาะกับลาดตลิ่งที่มีความลาดชันมากกว่า 1 : 2 หรือดินไม่มีเสถียรภาพเพียงพอในการรับแรงทางข้าง จำเป็นต้องสร้างโครงสร้างทางวิศวกรรมเพื่อสร้างเสถียรภาพของลาดตลิ่ง ด้านทานแรงดันดินด้านข้าง และรับน้ำหนักบรรทุกทุกจรด้านหลังเชื้อน ซึ่งเชื้อนป้องกันตลิ่งชนิดแนวตั้งยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 11 ประเภท 34 รูปแบบ

ในการจัดกลุ่มแบ่งประเภทเชื้อนป้องกันตลิ่งดังกล่าว ใช้ตัวอักษร S เป็นตัวต้นของชื่อประเภทเชื้อนป้องกันตลิ่งชนิดแนวลาด และ V เป็นตัวต้นของชื่อประเภทเชื้อนชนิดแนวตั้ง จากนั้นตามหลังด้วยตัวเลข 2 หลัก ใช้บอกลำดับของรูปแบบเชื้อน และปิดท้ายด้วยตัวอักษร A ที่หมายถึงไม่มีกล่องลวดตาข่ายเมทเทรลที่ฐานเชื้อน ในขณะที่ B หมายถึงมีกล่องลวดตาข่ายเมทเทรลที่ฐานเชื้อน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเชื้อนบางประเภทมีการแบ่งย่อยที่ซับซ้อนตามลักษณะการก่อสร้าง จึงใช้จุดศุขนิยมตัวเลข 1 ตำแหน่งตามหลังตัวเลข 2 หลักดังกล่าวข้างต้นในการจัดประเภท

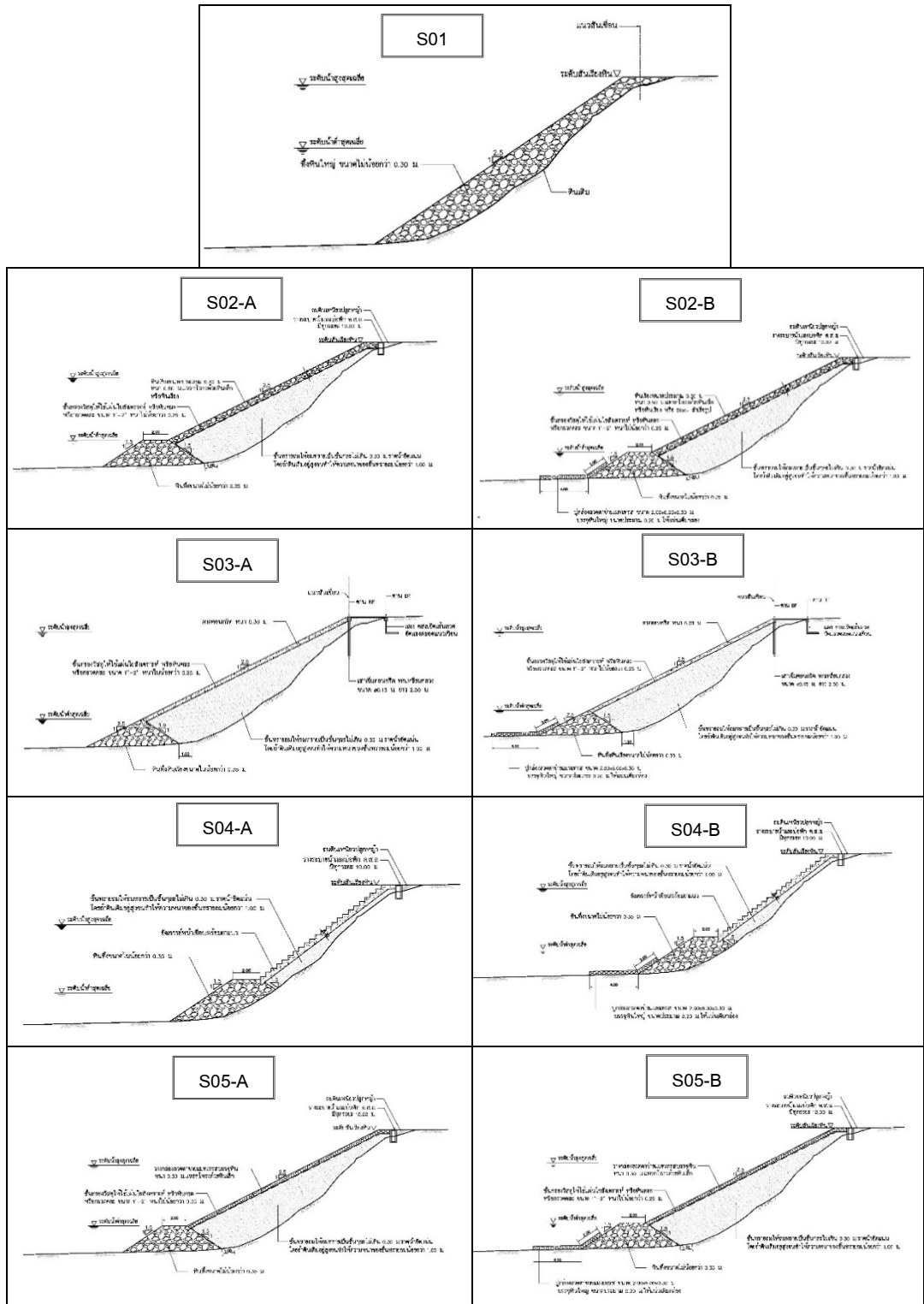
ผลการจัดประเภทเชื้อนป้องกันตลิ่งชนิดแนวลาด พร้อมรายละเอียดของสันเชื้อน ส่วนป้องกันการกัดเซาะ และ ฐานเชื้อน แสดงในตารางที่ 1 และภาพตัดของเชื้อนป้องกันตลิ่งแสดงในรูปที่ 1 ส่วนผลการจัดประเภทเชื้อนป้องกันตลิ่งชนิดแนวตั้ง พร้อมรายละเอียดของสันเชื้อน ส่วนป้องกันการกัดเซาะ และ ฐานเชื้อน แสดงในตารางที่ 2 และภาพตัดของเชื้อนป้องกันตลิ่งแสดงในรูปที่ 2

ตารางที่ 1 ประเภทของเชื้อนป้องกันตลิ่งชนิดแนวลาด

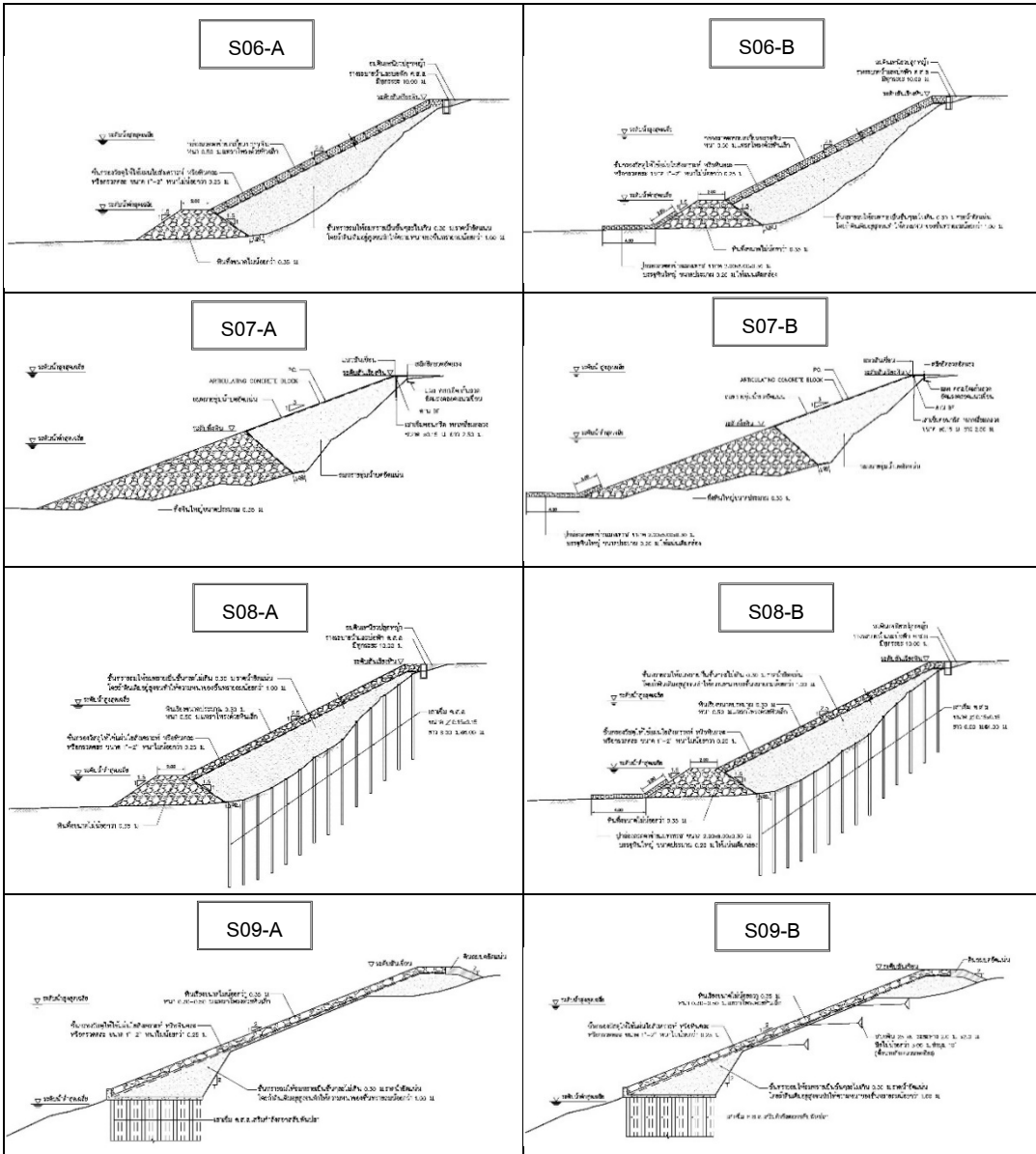
ลำดับ	ประเภท	ส่วนประกอบทางกายภาพของเชื้อนป้องกันตลิ่ง		
		สันเชื้อน	ส่วนป้องกันการกัดเซาะ	ฐานเชื้อน
1	S01	หินทิ้ง	หินทิ้ง	หินทิ้ง
2	S02	S02-A หินเรียง หรือ คานทับหลัง ค.ส.ล.	ถมทรายปูทับหน้าด้วยหินเรียง	หินทิ้ง
		S02-B หินเรียง หรือ คานทับหลัง ค.ส.ล.	ถมทรายปูทับหน้าด้วยหินเรียง	หินทิ้งและวางกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินเมทเทรล
3	S03	S03-A หินเรียงพร้อมดาดคอนกรีต หรือ คานทับหลัง ค.ส.ล.	ถมทรายและหินเรียงพร้อมดาดคอนกรีต	หินทิ้ง
		S03-B หินเรียงพร้อมดาดคอนกรีต หรือ คานทับหลัง ค.ส.ล.	ถมทรายและหินเรียงพร้อมดาดคอนกรีต	หินทิ้งและวางกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินเมทเทรล
4	S04	S04-A หินเรียงพร้อมดาดคอนกรีต หรือ คาน ค.ส.ล.	ถมทราย เรียงหินใหญ่ และดาดคอนกรีตรูปแบบอัมจันทร์	หินทิ้ง
		S04-B หินเรียงพร้อมดาดคอนกรีต หรือ คาน ค.ส.ล.	ถมทราย เรียงหินใหญ่และดาดคอนกรีตรูปแบบอัมจันทร์	หินทิ้งและวางกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินเมทเทรล

ตารางที่ 1 ประเภทของเขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดแนวลาด (ต่อ)

ลำดับ	ประเภท		ส่วนประกอบทางกายภาพของเขื่อนป้องกันตลิ่ง		
			สันเขื่อน	ส่วนป้องกันกัดเซาะ	ฐานเขื่อน
5	S05	S05-A	กล่องลวดตาข่ายบรรจุหิน แมทเทรส หรือคาน ค.ส.ล	ถมทรายและวางกล่องลวดตา ข่ายบรรจุหินแมทเทรสทับ หน้า	หินทิ้ง
		S05-B	เป็นกล่องลวดตาข่ายบรรจุ หินแมทเทรส หรือคาน ค.ส.ล	ถมทรายและวางกล่องลวดตา ข่ายบรรจุหินแมทเทรสทับ หน้า	หินทิ้งและวางกล่องลวด ตาข่ายบรรจุหินแมทเทรส
6	S06	S06-A	กล่องลวดตาข่ายบรรจุหิน เกเบี่ยน หรือคาน ค.ส.ล.	ถมทรายและวางกล่องลวด ตาข่ายบรรจุหินเกเบี่ยน	หินทิ้ง
		S06-B	กล่องลวดตาข่ายบรรจุหิน เกเบี่ยน หรือคาน ค.ส.ล.	ถมทรายและวางกล่องลวด ตาข่ายบรรจุหินเกเบี่ยน	หินทิ้งและวางกล่องลวดตา ข่ายบรรจุหินแมทเทรส
7	S07	S07-A	บล็อกคอนกรีตสำเร็จรูป ACB หรือ คาน ค.ส.ล.	ถมทรายและวางบล็อก คอนกรีตสำเร็จรูป ACB	หินทิ้ง
		S07-B	บล็อกคอนกรีตสำเร็จรูป ACB หรือ คาน ค.ส.ล.	ถมทรายและวางบล็อก คอนกรีตสำเร็จรูป ACB	หินทิ้งและวางกล่องลวด ตาข่ายบรรจุหินแมทเทรส
8	S08	S08-A	หินเรียง หรือ คาน ค.ส.ล.	ถมทรายและหินเรียงพร้อม ตอกเสาเข็มเสริมกำลังดิน	หินทิ้ง
		S08-B	หินเรียง หรือ คาน ค.ส.ล.	ถมทรายและหินเรียงพร้อม ตอกเสาเข็มเสริมกำลังดิน	หินทิ้งและวางกล่องลวด ตาข่ายบรรจุหินแมทเทรส
9	S09	S09.1	หินเรียง หรือ คาน ค.ส.ล.	หินเรียง	เสาเข็ม ค.ส.ล. พร้อมพื้น ค.ส.ล.
		S09.2	หินเรียง หรือ คาน ค.ส.ล.	หินเรียงและสมอดินยึดรั้ง	เสาเข็ม ค.ส.ล. พร้อมพื้น ค.ส.ล.



รูปที่ 1 ภาพตัดของเขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดแนวลาด



รูปที่ 1 ภาพตัดของเขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดแนวลาด (ต่อ)

ตารางที่ 2 ประเภทของเขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดแนวตั้ง

ลำดับ	ประเภท		ส่วนประกอบทางกายภาพของเขื่อนป้องกันตลิ่ง		
			สันเขื่อน	ส่วนป้องกันการกัดเซาะ	ฐานเขื่อน
1	V01	V01-A	กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินเกเบี่ยน หรือ คาน ค.ส.ล	กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินเกเบี่ยน	หินทิ้ง
		V01-B	กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินเกเบี่ยน หรือ คาน ค.ส.ล.	กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินเกเบี่ยน	หินทิ้งและวางกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินแมสเทรต
2	V02	V02-A	กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินเกเบี่ยน หรือ คาน ค.ส.ล.	ถมทรายและวางกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินเกเบี่ยนเสริมด้วย Geogrid	กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินเกเบี่ยน
		V02-B	กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินเกเบี่ยน หรือ คาน ค.ส.ล.	ถมทรายและวางกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินเกเบี่ยนเสริมด้วย Geogrid	กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินเกเบี่ยนและวางกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินแมสเทรต
3	V03	V03-A	คอนกรีตบล็อก หรือ คาน ค.ส.ล.	ถมทรายและวางกล่องเกเบี่ยนบรรจุหินบริเวณส่วนล่างและคอนกรีตบล็อกบริเวณส่วนบน	หินทิ้ง
		V03-B	คอนกรีตบล็อก หรือ คาน ค.ส.ล.	ถมทรายและวางกล่องเกเบี่ยนบรรจุหินบริเวณส่วนล่างและคอนกรีตบล็อกบริเวณส่วนบน	หินทิ้งและวางกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินแมสเทรต
4	V04.1	V04.1-A	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาเข็มหลักและยึดรั้งด้วยสายสมอกับแผงสมอ ค.ส.ล. ด้านหลังเขื่อน	ทิ้งหินใหญ่พร้อมเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้ง
		V04.1-B	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาเข็มหลักและยึดรั้งด้วยสายสมอกับแผงสมอ ค.ส.ล. ด้านหลังเขื่อน	ทิ้งหินใหญ่พร้อมเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้งและวางกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินแมสเทรต
	V04.2	V04.2-A	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาเข็มหลักและยึดรั้งด้วยสายสมอกับแผงสมอ ค.ส.ล. ด้านหลังเขื่อน	ถมทรายพร้อมเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้ง
		V04.2-B	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาเข็มหลักและยึดรั้งด้วยสายสมอกับแผงสมอ ค.ส.ล. ด้านหลังเขื่อน	ถมทรายพร้อมเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้งและวางกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินแมสเทรต

ตารางที่ 2 ประเภทของเขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดแนวตั้ง (ต่อ)

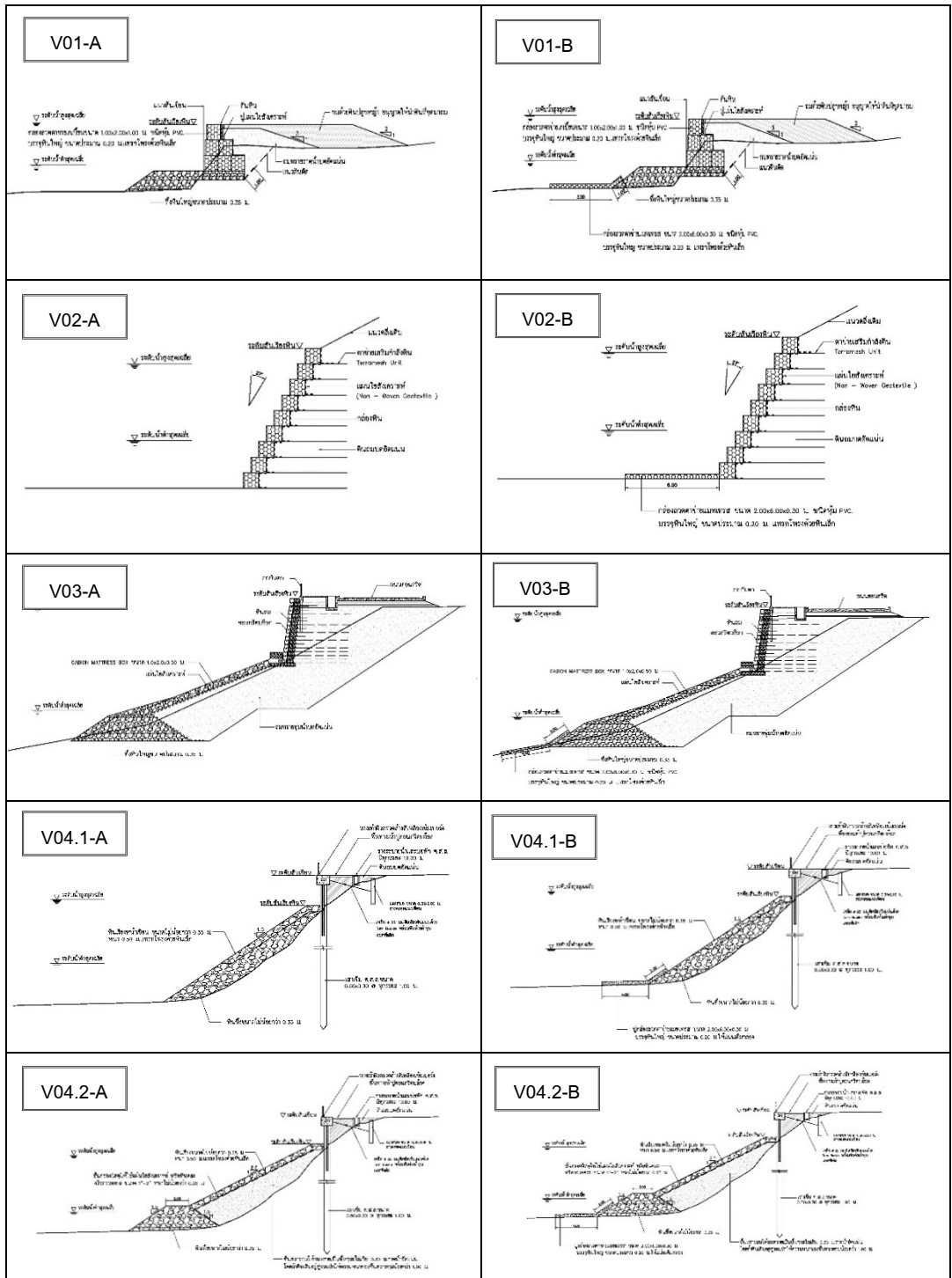
ลำดับ	ประเภท		ส่วนประกอบทางกายภาพของเขื่อนป้องกันตลิ่ง		
			สันเขื่อน	ส่วนป้องกันกรกัดเซาะ	ฐานเขื่อน
5	V05.1	V05.1-A	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาเข็มหลักและยึดรั้งด้วยคานสมอ ค.ส.ล. กับเสาเข็มสมอ ค.ส.ล. ด้านหลังเขื่อน	ทิ้งหินใหญ่พร้อมเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้ง
		V05.1-B	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาเข็มหลักและยึดรั้งด้วยคานสมอ ค.ส.ล. กับเสาเข็มสมอ ค.ส.ล. ด้านหลังเขื่อน	ทิ้งหินใหญ่พร้อมเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้งและวางกล่องลวดตาข่ายบรจุหินแมสเทรส
	V05.2	V05.2-A	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาเข็มหลักและยึดรั้งด้วยคานสมอ ค.ส.ล. กับเสาเข็มสมอ ค.ส.ล. ด้านหลังเขื่อน	ถมทรายพร้อมเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้ง
		V05.2-B	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาเข็มหลักและยึดรั้งด้วยคานสมอ ค.ส.ล. กับเสาเข็มสมอ ค.ส.ล. ด้านหลังเขื่อน	ถมทรายพร้อมเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้งและวางกล่องลวดตาข่ายบรจุหินแมสเทรส
6	V06.1	V06.1-A	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาเข็มหลักและยึดรั้งด้วยสายสมอกับคาน ค.ส.ล.รัดหัวเสาเข็มสมอดอกไขว้สลับ ด้านหลังเขื่อน	ทิ้งหินใหญ่พร้อมเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้ง
		V06.1-B	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาเข็มหลักและยึดรั้งด้วยสายสมอกับคาน ค.ส.ล.รัดหัวเสาเข็มสมอดอกไขว้สลับ ด้านหลังเขื่อน	ทิ้งหินใหญ่พร้อมเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้งและวางกล่องลวดตาข่ายบรจุหินแมสเทรส
	V06.2	V06.2-A	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาเข็มหลักและยึดรั้งด้วยสายสมอกับคาน ค.ส.ล.รัดหัวเสาเข็มสมอดอกไขว้สลับ ด้านหลังเขื่อน	ถมทรายพร้อมเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้ง
		V06.2-B	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาเข็มหลักและยึดรั้งด้วยสายสมอกับคาน ค.ส.ล.รัดหัวเสาเข็มสมอดอกไขว้สลับ ด้านหลังเขื่อน	ถมทรายพร้อมเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้งและวางกล่องลวดตาข่ายบรจุหินแมสเทรส

ตารางที่ 2 ประเภทของเขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดแนวตั้ง (ต่อ)

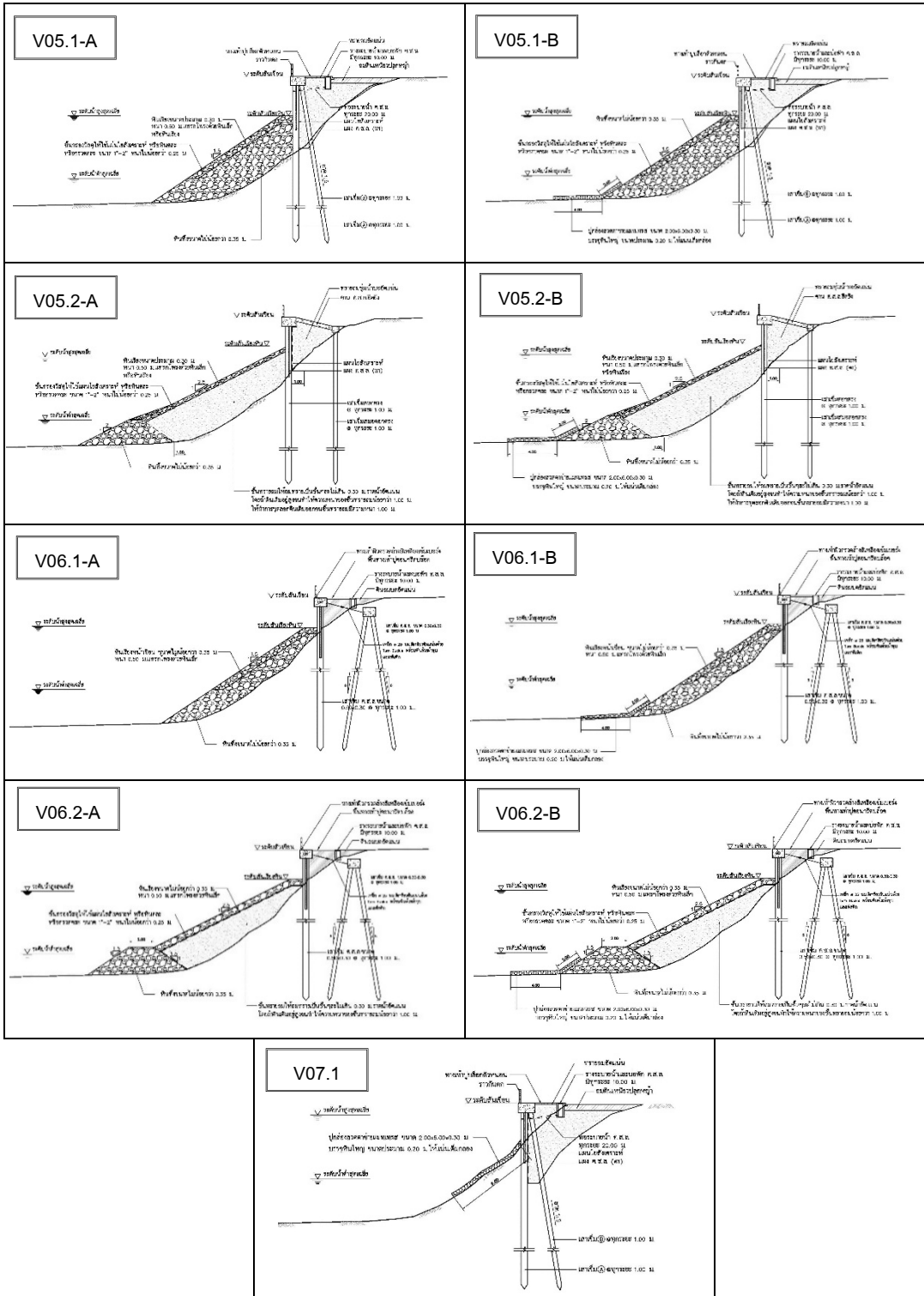
ลำดับ	ประเภท	ส่วนประกอบทางกายภาพของเขื่อนป้องกันตลิ่ง			
		สันเขื่อน	ส่วนป้องกันการกัดเซาะ	ฐานเขื่อน	
7	V07.1	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาค้ำหลักและยึดรั้งด้วยเสาค้ำสมอ	กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินแมทเทรซ และแผงกรู ค.ส.ล.	ไม่มี	
	V07.2	V07.2-A	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาค้ำหลักและยึดรั้งด้วยเสาค้ำสมอ	ทิ้งหินใหญ่ปิดทับหน้าด้วยเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้ง
		V07.2-B	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาค้ำหลักและยึดรั้งด้วยเสาค้ำสมอ	ทิ้งหินใหญ่ปิดทับหน้าด้วยเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้งและวางกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินแมสเทรซ
	V07.3	V07.3-A	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาค้ำหลักและยึดรั้งด้วยเสาค้ำสมอ	ถมทรายพร้อมเรียงหินใหญ่ และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้ง
		V07.3-B	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาค้ำหลักและยึดรั้งด้วยเสาค้ำสมอ	ถมทรายพร้อมเรียงหินใหญ่ และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้งและวางกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินแมสเทรซ
8	V08.1	พื้น ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาค้ำหลักและยึดรั้งด้วยเสาค้ำสมอ	กล่องลวดตาข่ายบรรจุหินแมทเทรซ และแผงกรู ค.ส.ล.	ไม่มี	
	V08.2	V08.2-A	พื้น ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาค้ำหลักและยึดรั้งด้วยเสาค้ำสมอ	ทิ้งหินใหญ่ปิดทับหน้าด้วยเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้ง
		V08.2-B	พื้น ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาค้ำหลักและยึดรั้งด้วยเสาค้ำสมอ	ทิ้งหินใหญ่ปิดทับหน้าด้วยเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้งและวางกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินแมสเทรซ
V08.3	V08.3-A	พื้น ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาค้ำหลักและยึดรั้งด้วยเสาค้ำสมอ	ถมทรายปิดทับหน้าด้วยเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้ง	
	V08.3-B	พื้น ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาค้ำหลักและยึดรั้งด้วยเสาค้ำสมอ	ถมทรายปิดทับหน้าด้วยเรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้งและวางกล่องลวดตาข่ายบรรจุหินแมสเทรซ	

ตารางที่ 2 ประเภทของเขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดแนวตั้ง (ต่อ)

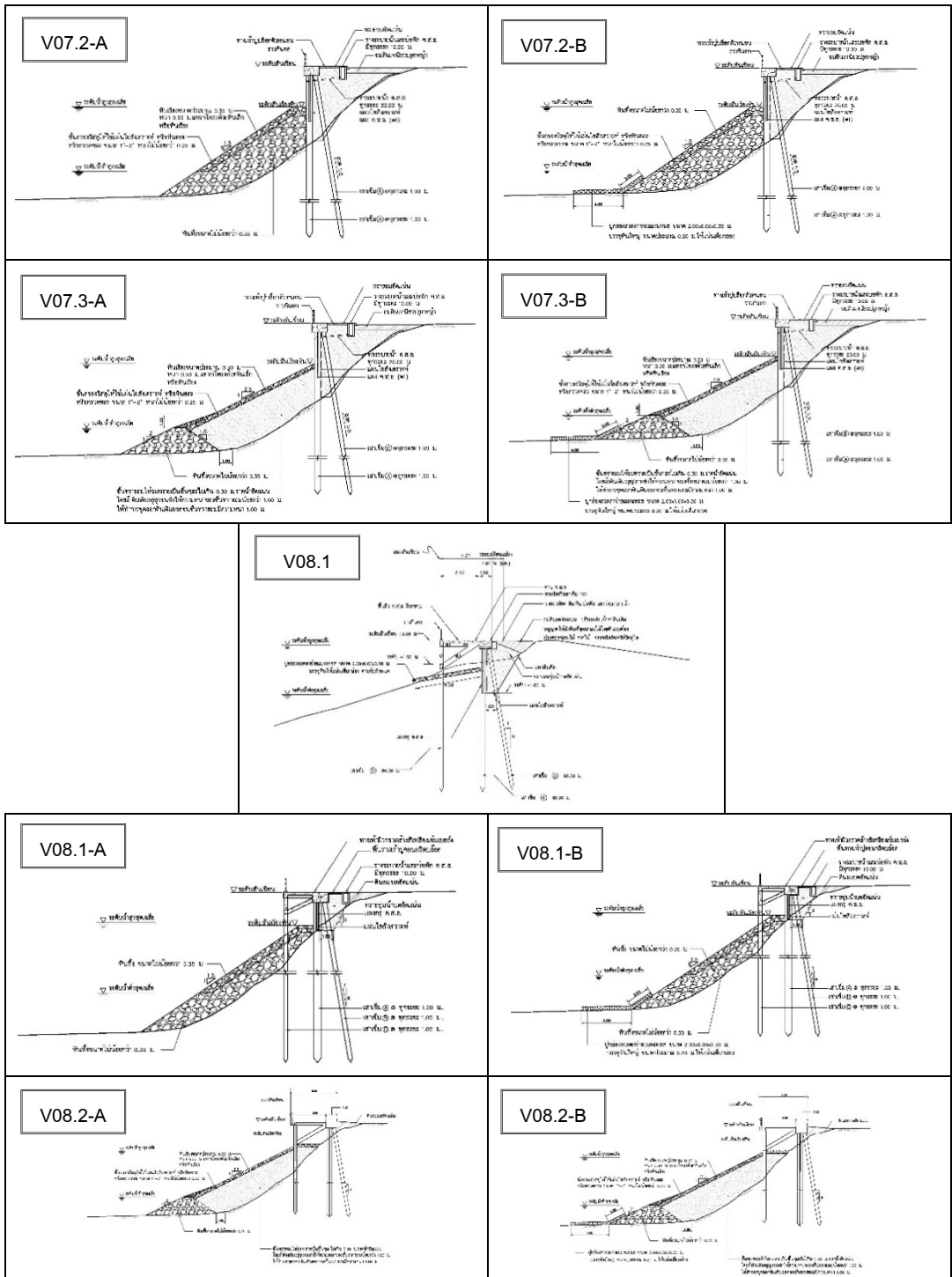
ลำดับ	ประเภท		ส่วนประกอบทางกายภาพของเขื่อนป้องกันตลิ่ง		
			สันเขื่อน	ส่วนป้องกันการกัดเซาะ	ฐานเขื่อน
9	V09	V09-A	พื้น ค.ส.ล.รูปแบบข้อจันท์รับ น้ำหนักโดยเสาเข็มหลักและยึดตั้ง ด้วยเสาเข็มสมอ	ทิ้งหินใหญ่ปิดทับหน้าด้วย เรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้ง
		V09-B	พื้น ค.ส.ล.รูปแบบข้อจันท์รับ น้ำหนักโดยเสาเข็มหลักและยึดตั้ง ด้วยเสาเข็มสมอ	ทิ้งหินใหญ่ปิดทับหน้าด้วย เรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้งและวางกล่อง ลวดตาข่ายบรรจุหิน แมสเทรอส
10	V10	V10-A	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดย เสาเข็มหลักและยึดตั้งด้วย เสาเข็มสมอ ส่วนบนเป็นคาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาเข็มสมอ	ทิ้งหินใหญ่ปิดทับหน้าด้วย เรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้ง
		V10-B	คาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดย เสาเข็มหลักและยึดตั้งด้วย เสาเข็มสมอ ส่วนบนเป็นคาน ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดยเสาเข็มสมอ	ทิ้งหินใหญ่ปิดทับหน้าด้วย เรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.	หินทิ้งและวางกล่อง ลวดตาข่ายบรรจุหิน แมสเทรอส
11	V11	V11-A	พื้น ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดย เสาเข็มหลักและยึดตั้งด้วย เสาเข็มสมอ	ทิ้งหินใหญ่ปิดทับหน้าด้วย เรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.บนเสาเข็มเสริม กำลังดิน	หินทิ้ง
		V11-B	พื้น ค.ส.ล.รับน้ำหนักโดย เสาเข็มหลักและยึดตั้งด้วย เสาเข็มสมอ	ทิ้งหินใหญ่ปิดทับหน้าด้วย เรียงหินใหญ่และแผงกรู ค.ส.ล.บนเสาเข็มเสริม กำลังดิน	หินทิ้งและวางกล่อง ลวดตาข่ายบรรจุหิน แมสเทรอส



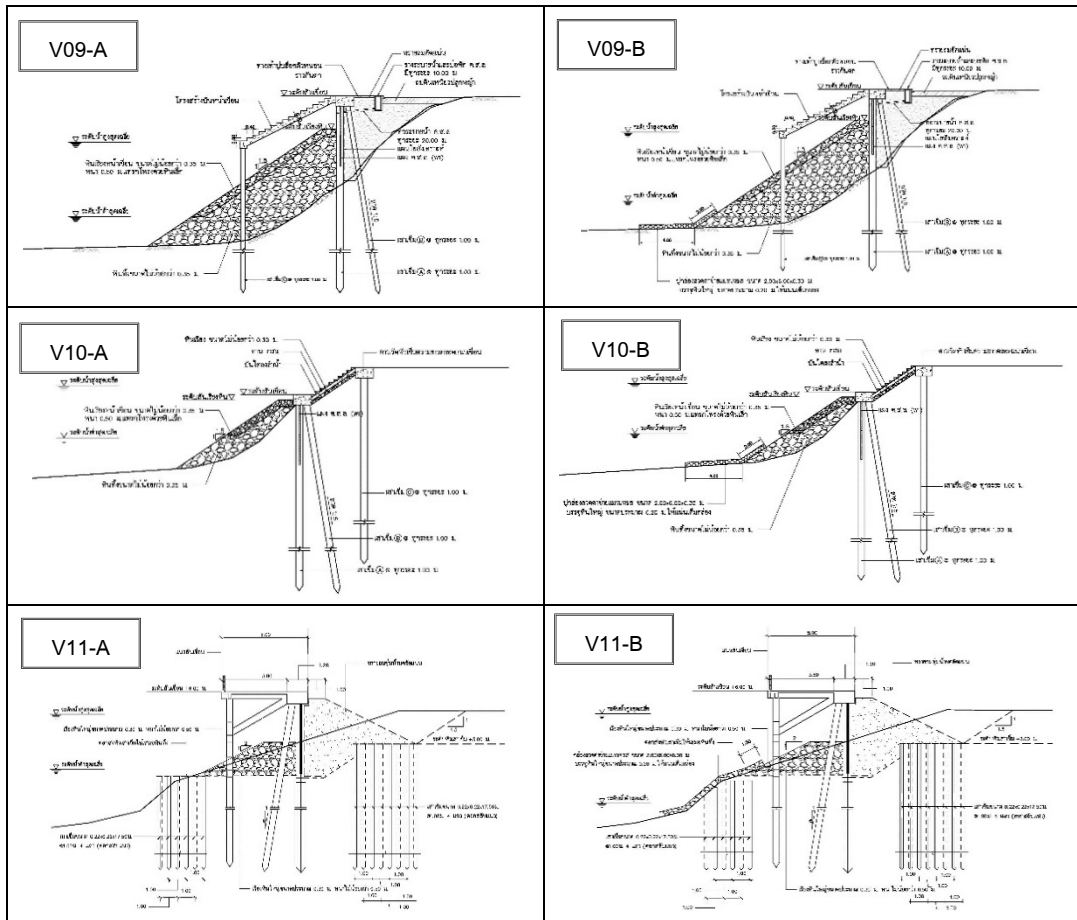
รูปที่ 2 ภาพตัดของเขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดแหวนตั้ง



รูปที่ 2 ภาพตัดของเขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดแหวนตั้ง (ต่อ)



รูปที่ 2 ภาพตัดของเขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดแหวนตั้ง (ต่อ)



รูปที่ 2 ภาพตัดของเขื่อนป้องกันตลิ่งชนิดแหวนตั้ง (ต่อ)

4. การรวบรวมข้อมูลของโครงการก่อสร้างเขื่อนป้องกันตลิ่งที่ได้ดำเนินการแล้วเสร็จในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ข้อมูลที่สำคัญของโครงการเขื่อนป้องกันตลิ่งที่ได้ดำเนินการแล้วเสร็จทั้งหมดจำนวน 58 โครงการ ประกอบด้วย ชื่อโครงการ สถานที่ตั้งโครงการ ละติจูด ลองจิจูด ความยาวเขื่อน ความยาวเสาเข็ม ปีที่เริ่มดำเนินการ ปีที่แล้วเสร็จ และรูปแบบเขื่อนป้องกันตลิ่ง ได้ถูกรวบรวมมาเป็นฐานข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ฐานข้อมูลโครงการเชื่อมป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมืองที่ดำเนินการแล้วเสร็จในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ลำดับ	โครงการ / สถานที่ก่อสร้าง	ความยาว เขื่อน (ม.)	ความยาว เสาเข็ม (ม.)	รูปแบบ	ปีที่ดำเนินการ	
					เริ่ม	เสร็จ
1	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณวัดหันตรา หมู่ที่ 2 ต.หันตรา อ.พระนครศรีอยุธยา	300.00	-	V07.2-A	2535	2536
	N 14° 21' 47.823859" E 100° 36' 13.771151"					
2	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณวัดพนัสนิคม หมู่ที่ 4 ต.คลองสวนพลู อ.พระนครศรีอยุธยา	217.00	-	V07.2-A V09-A	2544	2546
	N 14° 20' 44.350669" E 100° 34' 39.179309"					
3	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณวัดโพธิ์เผือก หมู่ที่ 2 ต.บ้านใหม่ อ.พระนครศรีอยุธยา	100.00	-	V10-A	2548	2549
	N 14° 22' 31.524605" E 100° 31' 32.987053"					
4	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยาบริเวณวัดโพธิ์เผือก (ระยะที่ 2) หมู่ที่ 2 ต.บ้านใหม่ อ.พระนครศรีอยุธยา	80.00	-	V10-A	2549	2550
	N 14° 22' 31.201577" E 100° 31' 32.718752"					
5	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณวัดเกาะแก้ว หมู่ที่ 12 ต.คลองกระมัง อ.พระนครศรีอยุธยา	150.00	14.00	V10-A	2557	2558
	N 14° 20' 44.749455" E 100° 34' 58.773291"					
6	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณวัดช่องลม หมู่ที่ 5 ต.หัวรอ อ.พระนครศรีอยุธยา	160.00	13.00	V07.2-A	2557	2558
	N 14° 22' 20.963719" E 100° 34' 41.590597"					
7	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณวัดนักบุญยอแซฟ หมู่ที่ 10 ต.สำเภาล่ม อ.พระนครศรีอยุธยา	200.00	18.00	V10-B	2557	2558
	N 14° 20' 20.676767" E 100° 33' 3.960345"					
8	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมคลองสนามไชย บริเวณวัดเสนาสนารามวรวิหาร หมู่ที่ 10 ต.หัวรอ อ.พระนครศรีอยุธยา	200.00	-	S05-A V07.1	2558	2559
	N 14° 21' 46.500891" E 100° 34' 23.798824"					
9	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณสะพานวัดกษัตราธิราช หมู่ที่ 8 ต.บ้านป้อม อ.พระนครศรีอยุธยา	100.00	17.00	V10-A	2558	2559
	N 14° 20' 56.249505" E 100° 34' 38.098291"					

ตารางที่ 3 ฐานข้อมูลโครงการเชื่อมป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมืองที่ดำเนินการแล้วเสร็จในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา (ต่อ)

ลำดับ	โครงการ / สถานที่ก่อสร้าง	ความยาว เชื่อม (ม.)	ความยาว เสาเข็ม (ม.)	รูปแบบ	ปีที่ดำเนินการ	
					เริ่ม	เสร็จ
10	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณบ้านพักสัสดี หมู่ที่ 4 ต.หอรัตนไชย อ.พระนครศรีอยุธยา	118.00	-	V07.2-A	2559	2560
	N 14° 21' 31.532368" E 100° 34' 57.241316"					
11	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณโรงเรียนปทุมวิทยาคาร หมู่ที่ 4 ต.บ้านใหม่ อ.พระนครศรีอยุธยา	100.00	16.00	V07.2-A	2558	2559
	N 14° 22' 48.323548" E 100° 30' 2.312548"					
12	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณถนนเลียบบแม่น้ำ หมู่ที่ 4 ต.บ้านใหม่ อ.พระนครศรีอยุธยา	150.00	16.00	V07.2-B	2559	2560
	N 14° 22' 48.323548" E 100° 30' 2.312548"					
13	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณวัดแค (อรัญญิก) หมู่ที่ 5 ต.ปากท่า อ.ท่าเรือ	132.00	16.00	V07.2-A	2544	2545
	N 14° 30' 17.684291" E 100° 40' 10.594762"					
14	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณวัดแค (อรัญญิก) ต่อเนื่องเชื่อมเดิม หมู่ที่ 5 ต.ปากท่า อ.ท่าเรือ	97.00	16.00	V07.2-A	2549	2550
	N 14° 29' 56.195583" E 100° 40' 5.148017"					
15	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณวัดสามเรือน หมู่ที่ 4 ต.โพธิ์เอน อ.ท่าเรือ	100.00	-	V07.2-A	2553	2554
	N 14° 31' 2.620821" E 100° 39' 57.757527"					
16	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณหมู่ที่ 2 ต.ท่าหลวง อ.ท่าเรือ	140.00	13.00	V10-B	2554	2555
	N 14° 33' 47.823859" E 100° 45' 19.771151"					
17	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณหมู่ที่ 4 ต.วังแดง (ระยะ 2) ต.วังแดง อ.ท่าเรือ	100.00	15.00	V08.2-A	2555	2557
	N 14° 31' 36.476427" E 100° 40' 43.205179"					
18	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณหมู่ที่ 4 ต.วังแดง (ระยะ 3) อ.ท่าเรือ	97.00	15.00	V08.2-B	2556	2557
	N 14° 31' 39.246830" E 100° 40' 45.351850"					

ตารางที่ 3 ฐานข้อมูลโครงการเชื่อมป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมืองที่ดำเนินการแล้วเสร็จในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา (ต่อ)

ลำดับ	โครงการ / สถานที่ก่อสร้าง	ความยาว เชื่อม (ม.)	ความยาว เสาเข็ม (ม.)	รูปแบบ	ปีที่ดำเนินการ	
					เริ่ม	เสร็จ
19	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณหมู่ที่ 10 ต.ท่าหลวง อ.ท่าเรือ	200.00	16.00	V10-A	2556	2557
	N 14° 33' 19.085533"					
20	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณวัดไก่อัน หมู่ที่ 10 ต.ท่าหลวง อ.ท่าเรือ	180.00	16.00	V10-A	2557	2558
	N 14° 20' 44.749455"					
21	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณศูนย์ราชการ อ.นครหลวง หมู่ที่ 1 ต.นครหลวง อ.นครหลวง	100.00	-	V07.2-A	2538	2539
	N 14° 20' 44.749455"					
22	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณวัดเรือแข่ง หมู่ที่ 4 ต.บางระกำ อ.นครหลวง	74.00	-	V07.2-A	2539	2540
	N 14° 27' 45.640667"					
23	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณวัดนครหลวง หมู่ที่ 8 ต.นครหลวง อ.นครหลวง	300.00	-	V07.2-A , V08.2-A	2539	2540
	N 14° 28' 2.554873"					
24	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณวัดมเหยงค์ หมู่ที่ 7 ต.ท่าช้าง อ.นครหลวง	240.00	14.00	V07.2-A	2543	2544
	N 14° 29' 42.131480"					
25	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณวัดลาย หมู่ที่ 2 ต.บางพระครู อ.นครหลวง	111.00	-	V08.2-A	2546	2547
	N 14° 28' 34.077508"					
26	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณวัดน้อย หมู่ที่ 4 ต.ท่าชัย อ.นครหลวง	150.00	-	V07.2-A	2557	2558
	N 14° 28' 34.077508"					
27	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำป่าสัก บริเวณหมู่ที่ 7 ต.ท่าช้าง อ.นครหลวง	320.00	13.00	V07.2-A	2557	2558
	N 14° 29' 55.222606"					

ตารางที่ 3 ฐานข้อมูลโครงการเขื่อนป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมืองที่ดำเนินการแล้วเสร็จในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา (ต่อ)

ลำดับ	โครงการ / สถานที่ก่อสร้าง	ความยาว เขื่อน (ม.)	ความยาว เสาเข็ม (ม.)	รูปแบบ	ปีที่ดำเนินการ	
					เริ่ม	เสร็จ
28	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำลพบุรี บริเวณวัดกุฎีทอง หมู่ที่ 7 ต.พิศเพี้ยน อ.มหาราช	360.00	16.00	V07.2-A	2556	2558
	N 14° 35' 35.443304"					
29	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณปากคลองบางกุ่ม หมู่ที่ 9 ต.บ้านกุ่ม อ.บางบาล	100.00	18.00	V07.2-B	2554	2555
	N 14° 25' 7.708913"					
30	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมคลองบางหลวง บริเวณหมู่ที่ 2 ต.บางหลวง อ.บางบาล	100.00	18.00	V07.2-B	2555	2556
	N 14° 24' 21.932189"					
31	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมคลองบางหลวง บริเวณโรงเรียนวัดตะกู หมู่ที่ 4 ต.วัดตะกู อ.บางบาล	60.00	20.00	V07.1-A	2555	2556
	N 14° 23' 26.413287"					
32	เขื่อนป้องกันตลิ่งแม่น้ำน้อย บริเวณวัดสีตุ๊ก ระยะที่ 2 หมู่ที่ 2 ต.น้ำเต้า อ.บางบาล	325.00	16.00	S08-A, V08.2-B	2555	2557
	N 14° 19' 37.546505"					
33	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมคลองบางหลวง บริเวณวัดอินทาราม หมู่ที่ 3 ต.ท่าช้าง อ.บางบาล	150.00	26.00	V08.1-A	2555	2557
	N 14° 20' 32.93072"					
34	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณหมู่ที่ 3 ต.ไทรน้อย อ.บางบาล	395.00	23.00	V11-B	2256	2560
	N 14° 25' 26.134136"					
35	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมคลองบางบาล บริเวณหมู่ที่ 4 ต.กบเจา อ.บางบาล	200.00	13.00	V07.2-B	2557	2558
	N 14° 21' 35.15081"					
36	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมคลองบางบาล บริเวณวัดกำแพงแก้ว หมู่ที่ 1 ต.สะพานไทย อ.บางบาล	200.00	18.00	V10-A	2557	2558
	N 14° 2' 17.116800"					

ตารางที่ 3 ฐานข้อมูลโครงการเชื่อมป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมืองที่ดำเนินการแล้วเสร็จในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา (ต่อ)

ลำดับ	โครงการ / สถานที่ก่อสร้าง	ความยาว เชื่อม (ม.)	ความยาว เสาเข็ม (ม.)	รูปแบบ	ปีที่ดำเนินการ	
					เริ่ม	เสร็จ
37	เชื่อมป้องกันตลิ่งแม่น้ำน้อย บริเวณวัดสีสุก ระยะที่ 3 หมู่ที่ 2 ต.น้ำเต้า อ.บางบาล	166.00	16.00	V08.2-B	2557	2558
	N 14° 19' 39.697325"					
38	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมคลองบางบาล บริเวณหมู่ที่ 1 ต.พระ ขาว อ.บางบาล	202.50	16.00	V08.3-B	2558	2559
	N 14° 20' 33.153699"					
39	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมคลองบางบาล บริเวณวัดพิบูลโสคันธ์ หมู่ที่ 4 ต.พระขาว อ.บางบาล	150.00	18.00	V10-A	2559	2560
	N 14° 20' 14.296261"					
40	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมคลองส่งน้ำสายสี่ บริเวณโรงพยาบาล เสนา หมู่ที่ 1 ต.เจ้าเจ็ด อ.เสนา	200.00	5.00	V10-A	2556	2557
	N 14° 19' 11.840499"					
41	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำน้อย บริเวณหมู่ที่ 11 ต.หัวเวียง อ.เสนา	240.00	13.00	V09-A	2557	2558
	N 14° 19' 58.052545"					
42	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมคลองเจ้าเจ็ด – บางยี่หน บริเวณวัด กลางคลองวัดนาราม หมู่ที่ 1 ต.เจ้าเจ็ด อ.เสนา	140.00	16.00	V09-A	2557	2558
	N 14° 19' 56.871561"					
43	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมคลองลาดงา บริเวณวัดเกาะราษฎร์ ศรัทธาธรรม หมู่ที่ 3 ต.ลาดงา อ.เสนา	111.00	18.00	V07.2-A	2557	2558
	N 14° 22' 36.550724"					
44	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมคลองลาดงา บริเวณวัดเกาะราษฎร์ ศรัทธาธรรม(ต่อเนื่องเชื่อมเดิม) หมู่ที่ 3 ต.ลาดงา อ.เสนา	128.00	18.00	V07.2-B	2560	2561
	N 14° 22' 33.949528"					
45	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำน้อย บริเวณวัดโคก หมู่ที่ 2 ต. หน้าโคก อ.ผักไห่	78.00	16.00	V09-A	2554	2555
	N 14° 29' 37.179712"					

ตารางที่ 3 ฐานข้อมูลโครงการเขื่อนป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมืองที่ดำเนินการแล้วเสร็จในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา (ต่อ)

ลำดับ	โครงการ / สถานที่ก่อสร้าง	ความยาว เขื่อน (ม.)	ความยาว เสาเข็ม (ม.)	รูปแบบ	ปีที่ดำเนินการ	
					เริ่ม	เสร็จ
46	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำลพบุรี บริเวณที่ว่าการอ.บางปะ หัน หมู่ที่ 6 ต.บางปะหัน อ.บางปะหัน	360.00	-	V07.2-A, V09-A	2543	2545
	N 14° 27' 45.336238"					
47	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมคลองบางพระครู บริเวณหมู่ที่ 2 ต. ตาลเอน อ.บางปะหัน	200.00	16.00	V07.2-B	2557	2558
	N 14° 31' 23.106555"					
48	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณศูนย์ศิลปาชีพ บางไทร ต.บางไทร อ.บางไทร	300.00	-	V09-A	2544	2546
	N 14° 9' 16.707373"					
49	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณศูนย์ศิลปาชีพ บางไทร (ต่อเนื่องเขื่อนเดิม) ต.บางไทร อ.บางไทร	150.00	-	V09-A	2545	2546
	N 14° 9' 3.856666"					
50	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมคลองร่มไทร บริเวณศูนย์ศิลปาชีพบาง ไทร ต.บางไทร อ.บางไทร	208.00	-	V08.2-A	2546	2547
	N 14° 9' 2.678377"					
51	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมรอบสระน้ำพระตำหนัก บริเวณศูนย์ ศิลปาชีพบางไทร ต.ราชคราม อ.บางไทร	300.00	17.00	V07.3-A	2553	2554
	N 14° 9' 5.546753"					
52	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมรอบสระน้ำพระตำหนัก บริเวณศูนย์ ศิลปาชีพบางไทร (ต่อเนื่องเขื่อนเดิม) ต.ราชคราม อ.บางไทร	220.00	17.00	V07.3-A	2554	2555
	N 14° 9' 6.626247"					
53	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมคลองร่มไทร บริเวณศูนย์ศิลปาชีพบาง ไทร (ต่อเนื่องเขื่อนเดิม) ต.บางไทร อ.บางไทร	70.00	18.00	V08.2-A	2555	2558
	N 14° 9' 2.388491"					
54	เขื่อนป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณวัดนิเวศธรรม ประวัติ หมู่ที่ 12 ต.บ้านเลน อ.บางปะอิน	190.00	-	V07.2-A	2547	2548
	N 14° 13' 42.423024"					

ตารางที่ 3 ฐานข้อมูลโครงการเชื่อมป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมืองที่ดำเนินการแล้วเสร็จในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยา (ต่อ)

ลำดับ	โครงการ / สถานที่ก่อสร้าง	ความยาว เชื่อม (ม.)	ความยาว เสาเข็ม (ม.)	รูปแบบ	ปีที่ดำเนินการ	
					เริ่ม	เสร็จ
55	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณบ้านพักข้าราชการพระราชวังบางปะอิน หมู่ที่ 6 บ้านเลน อ.บางปะอิน	46.00	18.00	V07.1	2554	2555
	N 14° 13' 42.426024"					
56	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณโรงเรียนวัดเชิงท่า หมู่ที่ 3 ต.เกาะเกิด อ.บางปะอิน	220.00	24.00	V08.2-A	2554	2555
	N 14° 12' 2.742507"					
57	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณหมู่ที่ 1 ต.ขนอนหลวง อ.บางปะอิน	144.00	18.00	V08.2-A	2557	2558
	N 14° 15' 54.110116"					
58	เชื่อมป้องกันตลิ่งริมแม่น้ำเจ้าพระยา บริเวณหมู่ที่ 1 ต.ขนอนหลวง (ต่อเชื่อมเดิม) อ.บางปะอิน	204.00	23.00	V08.2-A	2558	2559
	N 14° 15' 50.474152"					

5. สรุปผลการศึกษา

จากการเก็บรวบรวมและศึกษาข้อมูลระหว่างเดือนมิถุนายน 2558 ถึงเมษายน 2561 ได้ผลการศึกษาดังนี้

(1) สามารถรวบรวมรูปแบบของเชื่อมป้องกันตลิ่งของกรมโยธาธิการและผังเมืองได้ทั้งหมดจำนวน 51 รูปแบบ เมื่อนำมาพิจารณาเปรียบเทียบโดยใช้ลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างทางวิศวกรรมเป็นหลัก สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ได้แก่ เชื่อมป้องกันตลิ่งแนวลาด และเชื่อมป้องกันตลิ่งแนวตั้ง ผลจากการศึกษาสามารถแบ่งย่อยเชื่อมป้องกันตลิ่งแนวลาดได้เป็น 9 ประเภท 17 รูปแบบ และเชื่อมป้องกันตลิ่งแนวตั้งแบ่งย่อยได้เป็น 11 ประเภท 34 รูปแบบ จากนั้นจัดทำรายละเอียดประกอบอันได้แก่ รูปตัดเชื่อม รายละเอียดของสันเชื่อม ส่วนป้องกันการกัดเซาะ และฐานเชื่อม เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจเลือกก่อสร้างเชื่อมป้องกันตลิ่งให้มีความเหมาะสมกับพื้นที่เมื่อมีความต้องการก่อสร้างในอนาคต

(2) สามารถรวบรวมข้อมูลโครงการเชื่อมป้องกันตลิ่งในความรับผิดชอบของกรมโยธาธิการและผังเมืองที่แล้วเสร็จในเขตจังหวัดพระนครศรีอยุธยาได้ทั้งหมดจำนวน 58 โครงการ ข้อมูลที่

รวบรวมได้แก่ ตำแหน่งที่ตั้งโครงการ ละติจูด ลองจิจูด ความยาวของเขื่อน ความยาวเสาเข็มที่ใช้ในโครงการ ปีที่เริ่มดำเนินการ ปีที่แล้วเสร็จ และ ชื่อรูปแบบของเขื่อนป้องกันตลิ่งที่ได้จัดประเภทไว้แล้ว ข้อมูลที่รวบรวมได้ถูกนำมาสร้างฐานข้อมูลสำหรับให้หน่วยงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการน้ำและผู้สนใจสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ

References

- [1] Jareonrean S. Basic knowledge of river bank dam: Part 2. A report of Knowledge Management Committee, the Department of Public Works and Town & Country Planning; 2006. (In Thai)
- [2] Beacon Engineering Consultants Co., Ltd. River bank dam design project: 1st Contract, Phase 2. Technical Report. n.p.: 2014. (In Thai)
- [3] Panya Consultants Co., Ltd. River Bank Dam Design Project: 1st Contract, Phase 2. Technical Report Vol. 1 of 2. n.p.: 2014. (In Thai)
- [4] Town and Country Development Bureau. River Bank Dam Building. The Department of Public Works and Town & Country Planning; 2015. (In Thai)
- [5] Benjasupattananan S. Design and construction control of river bank dam. Bangkok: Town and Country Development Bureau, the Department of Public Works and Town & Country Planning; 2015. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



เอนก จิตนवासิต วิศวกรโยธาชำนาญการ กองควบคุมการก่อสร้าง กรมโยธาธิการและผังเมือง 218/1 ถนนพระราม 6 แขวง/เขตพญาไท กรุงเทพมหานคร 10400 โทรศัพท์ 083-0745501 E-mail anakedpt@gmail.com สำเร็จการศึกษาสูงสุด วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ สนใจงานวิจัยด้านปฐพีกลศาสตร์ วิศวกรรมเทคโนโลยี วัสดุวิศวกรรม



ว่าที่ร้อยตรี ดร.วิกรม พิชการ ผู้อำนวยการหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 1761 ถนนพัฒนาการ แขวง/เขต สวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250 โทรศัพท์ 090-1977676 E-mail: vicrom@hotmail.com สำเร็จการศึกษาสูงสุด Ph.D. in Civil Engineering จาก University of Southern California ประเทศสหรัฐอเมริกา สนใจงานวิจัยด้าน Structural Health Monitoring, Structural Dynamics and Vibration, Numerical Method and Computer Programming, Safety Engineering และ Earthquake Engineering

การศึกษาประสิทธิภาพทิศทางการกัดงานที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว
โดยวิธีทาคุชิ

A STUDY OF EFFICIENCY OF MILLING DIRECTION ON SURFACE
ROUGHNESS BY USING TAGUCHI METHOD

คมพันธ์ ชมสมุทร¹ และ สุกัญญา เชิดชูงาม²

¹อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 1381 ถนนประชาราษฎร์สาย 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800, Kompan.c@rmutp.ac.th

²อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 1381 ถนนประชาราษฎร์สาย 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800, sukanya.che@rmutp.ac.th

Kompan Chomsamutr¹ and Sukanya Cherdchoongam²

¹Lecturer, Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala
University of Technology Phra Nakhon, 1381 Pracharat 1 Rd. Wongsawang, Bangsue,
Bangkok 10800, Thailand, Kompan.c@rmutp.ac.th

²Lecturer, Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala
University of Technology Phra Nakhon, 1381 Pracharat1 Rd. Wongsawang, Bangsue
Bangkok 10800, Thailand, sukanya.che@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทิศทางการกัดชิ้นงานด้วยเครื่องจักรกล
อัตโนมัติ โดยใช้ทองเหลืองเป็นวัสดุทดสอบ สำหรับเครื่องกัดอัตโนมัติขนาดเล็ก โดยไม่ใช้น้ำหล่อ
เย็น ทดลองด้วยดอกกัด (End mill) ขนาด 10 มิลลิเมตร แบบ 4 ฟัน หาค่าประสิทธิภาพการกัด
ชิ้นงานโดยวัดจากค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ทำการเปรียบเทียบทิศทางการกัดชิ้นงาน 2
ทิศทาง คือการชดเชยรัศมีดอกกัดออกทางด้านซ้ายด้วย G41 (Tool path Compensation Left)
และ การชดเชยรัศมีดอกกัดออกทางด้านขวาด้วย G42 (Tool path Compensation Right) โดย
กำหนดปัจจัยการทดสอบ 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ คือ ความเร็วรอบ 1200, 1500 และ 1800
รอบต่อนาที อัตราป้อน 80, 100 และ 120 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะป้อนลึก 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร

เก็บข้อมูลการทดสอบตามวิธีทาคุชิ (Taguchi method) พบว่าชิ้นงานที่กัดด้วยทิศทางการกัดด้านซ้าย ให้ค่าความหยาบผิวน้อยกว่าชิ้นงานที่กัดด้วยทิศทางการกัดด้านขวา นั่นคือ ทิศทางการกัดทองเหลืองที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกัดอัตโนมัติขนาดเล็กโดยไม่ใช้น้ำหล่อเย็นคือ การกัดชิ้นงานด้านซ้าย (G41) โดยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวมากที่สุด คือ ระยะเวลาป้อนลึก คิดเป็นร้อยละ 77.81 รองลงมาคืออัตราป้อน และความเร็วรอบ คิดเป็นร้อยละ 14.16 และ 8.02 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ทิศทางการกัดงาน, เครื่องกัดอัตโนมัติ, วิธีการทาคุชิ

ABSTRACT

This study aimed to compare efficiency of milling direction from an automatic milling machine by using brass as a testing material to test on a mini CNC milling without the use of coolant. A series of experiments were done with a 10-millimeter, 4-flute end mill and milling efficiency was measured on surface roughness in two milling directions: tool path compensation left (G41) and tool path compensation right (G42). The experiments was controlled by 3 test factors, each with three levels: spindle speed of 1,200, 1,500 and 1,800 round per minute, feed rate of 80, 100 and 120 millimeters per minute and depth of cut of 3, 4 and 5 millimeters. From data collection by using Taguchi method, it was found that a sample milled from the left direction had less surface roughness than a sample milled from the right direction. That is, an appropriate brass milling direction for the mini milling CNC without the use of coolant was left-hand milling direction (G41). It was also found that the factor affecting to surface roughness most was depth of cut (77.81 percent), followed by feed rate and spindle speed (14.16 and 8.02 percent respectively).

KEYWORDS: Milling Direction, CNC Milling, Taguchi Method

1. บทนำ

ปัจจุบันการผลิตชิ้นส่วนโดยใช้วัสดุทองเหลืองด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติขนาดเล็ก (Mini CNC milling) โดยส่วนมากจะปราศจากการใช้น้ำหล่อเย็นเนื่องจากข้อกำหนดในการสร้างเครื่องจักร และผู้ผลิตต้องควบคุมเวลาให้งานเสร็จภายในระยะเวลาที่กำหนด ดังนั้นในการกำหนดเงื่อนไขในการตัด ได้แก่ ความเร็วตัด (Cutting speed) ความเร็วรอบ (Spindle speed) อัตราป้อน (Feed rate) และระยะป้อนลึก (Depth of cut) จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องกำหนดให้มีค่าความหยาบผิว (Surface roughness) ที่ดีที่สุดในทางเทคนิคสำหรับโปรแกรมการทำงานของเครื่องจักรกลอัตโนมัติที่ผู้ผลิต

โดยส่วนใหญ่มองข้ามไปหรือไม่ถึง คือ ทิศทางการกัด ตามโปรแกรม G-Code ได้แก่ G41 และ G42

ทิศทางการกัดงาน G41 คือการชดเชยรัศมีดอกกัดออกทางด้านซ้าย (Tool path Compensation Left) และ G42 คือการชดเชยรัศมีดอกกัดออกทางด้านขวา (Tool path Compensation Right) เป็นการชดเชยขนาดดอกกัดตามเส้นของรูป [1] ดังนั้นการเขียนโปรแกรมงานกัดจะสามารถเขียนโปรแกรมจากขนาดกำหนดในแบบได้โดยตรง ส่วนขนาดของดอกกัดจะถูกป้อนเข้าไปเก็บไว้ในส่วนเก็บข้อมูล การชดเชยขนาดด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถเลือกใช้ดอกกัดได้หลายขนาด ANIL CHOUBEY et al [2] ได้ใช้หลักการออกแบบการทดลองในการหาเงื่อนไขการกัดงานที่เหมาะสม ด้วยวิธีการ Taguchi โดยกำหนดปัจจัยคือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ระยะป้อนลึก และความกว้างในการกัด เพื่อให้ได้ค่าความหยาบผิว และอัตราการเคลื่อนที่ของวัสดุที่ดีที่สุด โดยได้ค่าความเหมาะสมเท่ากัน คือความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที อัตราป้อน 1000 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะป้อนลึก 0.01 มิลลิเมตร และความกว้างในการกัด 0.1 มิลลิเมตร M.A. Hadi et al [3] ได้เปรียบเทียบการกัดงานแบบ up-milling และ down-milling โดยใช้วัสดุ Inconel 718 โดยกำหนดระยะป้อนลึก (Depth of cut) ที่ 0.50, 0.75, 1.00 มิลลิเมตร อัตราป้อน (Feed rate) ที่ 0.10, 0.15, 0.20 มิลลิเมตรต่อฟัน และความเร็วตัด (Cutting speed) ที่ 100, 120, 140 เมตรต่อนาที ตามลำดับ โดยพบว่าทิศทางการกัดที่เหมาะสมคือ down-milling เมื่อใช้ค่า ความเร็วตัดต่ำกว่าการสึกหรอของเครื่องมือจะเกิดขึ้นน้อยกว่าและยังให้ค่าความหยาบผิวที่ดีกว่า Pratyusha J et al [4] ใช้วิธีการทาภูเขาชิกับวัสดุสแตนเลส AISI 304 เพื่อหาผลกระทบเงื่อนไขในการกัดงานโดยการกำหนดปัจจัยคือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และระยะป้อนลึก โดยกำหนดให้อัตราป้อนถูกควบคุมด้วยเวลา (mm/min) พบว่าระยะป้อนลึกในการกัดมีอิทธิพลในการกัดงานมากที่สุดที่ 53.65 % ความเร็วรอบที่ 29.59 % และอัตราป้อนที่ 9.92 % โดยมีค่าความผิดพลาด (Error) 6.89 % ตามลำดับ Muataz Hazza Faizi Al-Hazza et al [5] ได้หาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับผิวงานที่ดีที่สุด โดยวิธีการทาภูเขาชิสำหรับวัสดุที่มีความแข็ง 52-56 HRC โดยกำหนดปัจจัยคือ ความเร็วตัด ที่ 120-240 m/min อัตราป้อน 0.05-0.15 mm/tooth และระยะป้อนลึก 0.10 – 0.20 mm พบว่าปัจจัยที่เหมาะสมอยู่ที่ ความเร็วตัด ที่ 240 m/min อัตราป้อน 0.05 mm/tooth และระยะป้อนลึก 0.20 mm ตามลำดับ Ali Abbar Khleif et al [6] ได้ศึกษาเรื่องผลกระทบจากการกำหนดเงื่อนไขในการกัดงาน ที่ส่งผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือและค่าความหยาบผิวชิ้นงานกับวัสดุสแตนเลส 316L โดยกำหนดความเร็วรอบของเครื่องมือที่ 350, 550, 930, และ 1100 รอบต่อนาที แล้วมาคำนวณหาความเร็วตัด (Cutting speed) จะได้ค่า 20, 31, 53, 62 เมตรต่อนาที โดยใช้ค่าระยะป้อนลึก (Depth of cut) และอัตราป้อน (Feed rate) คงที่ 2.25 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตรต่อนาที ตามลำดับ หลังจากกัดชิ้นงานผ่านไป 30-69 นาที การสึกหรอของเครื่องมือจะมีค่าสูงขึ้นที่เวลา 69 นาที ที่ความเร็วตัด 20 เมตร

ต่อหน้าที และถ้าใช้เวลาคงที่ 30 นาที การสึกหรอของเครื่องมือจะมีค่าสูงสุดที่ความเร็วตัด 62 เมตรต่อหน้าที โดยให้ค่าความหยาบผิวดีที่สุด $R_a = 1.526$ ไมโครเมตร

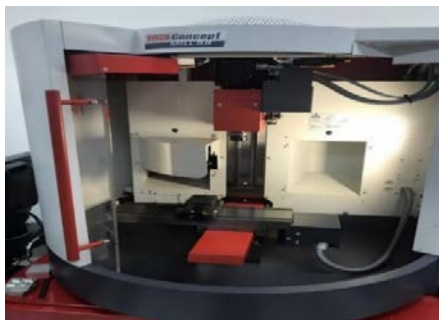
2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อเปรียบเทียบทิศทางการกัดงานระหว่าง G41 และ G42 โดยใช้เครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling) รุ่น PC-MILL55

2.2 เพื่อหาเงื่อนไขและทิศทางการกัดงานที่เหมาะสมที่มีผลต่อค่าความหยาบผิว (Surface roughness)

3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1 เครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling) รุ่น PC-MILL55 เครื่องหมายการค้า EMCO และใช้ระบบควบคุม EMCOTRONIC TM02



รูปที่ 1 เครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling) รุ่น PC-MILL55

3.2 เครื่อง Surface Roughness Tester รุ่น SJ-400 (Stylus 5 μ m) วัดความหยาบผิวมาตรฐาน ANSI 1995



รูปที่ 2 เครื่องวัดความหยาบผิว SJ400

4. วิธีการดำเนินงาน

การวิจัยครั้งนี้เก็บข้อมูลโดยใช้เครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling) รุ่น PC-MILL55 เครื่องหมายการค้า EMCO และใช้ระบบควบคุม EMCOTRONIC TM02 [7] ทดลองโดยปราศจากการใช้น้ำหล่อเย็น (Coolant) ใช้วัสดุทองเหลืองและเก็บข้อมูลโดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ กำหนดปัจจัยที่ต้องควบคุมทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ ทิศทางการกัดชิ้นงาน ความเร็วรอบ (Spindle speed) อัตราป้อน (Feed rate) และระยะป้อนลึก (Depth of cut) นำปัจจัยทั้งหมดมาใช้ออกแบบการทดลอง โดยทดสอบกับชิ้นงานและมีค่าผลตอบสนองเป็นค่าความหยาบผิว (Surface roughness) โดยมีรายละเอียดของการกำหนดปัจจัยดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วัสดุทดสอบ ปัจจัยควบคุมและระดับของปัจจัยควบคุมในการทดลอง

วัสดุทดสอบ	ปัจจัยควบคุม	ระดับของปัจจัยควบคุม
ทองเหลือง	ทิศทางการกัดชิ้นงาน (G)	2 ระดับ : Code-G41, Code-G42
	ความเร็วรอบ (N)	3 ระดับ : 1200, 1500, 1800 รอบต่อนาที
	อัตราป้อน (F)	3 ระดับ : 80, 100, 120 มิลลิเมตรต่อนาที
	ระยะป้อนลึก (D)	3 ระดับ : 3, 4, 5 มิลลิเมตร

จากตารางที่ 1 แสดงปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลองกัดชิ้นงาน ซึ่งมี 3 ปัจจัย 3 ระดับ และ 1 ปัจจัย 1 ระดับ หากทำการทดลองแบบ Full factorial design จะต้องทำการทดลองทั้งสิ้น $3^3 \times 2^1 = 54$ การทดลอง ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งจะมีค่าใช้จ่ายมาก เช่นค่าวัสดุ ค่าอุปกรณ์ ค่าเครื่องมือ และค่าใช้จ่ายอื่น ๆ เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายดังกล่าวจึงลดการทดลองโดยใช้วิธีทากูชิ เพื่อลดจำนวนครั้งในการทดลองโดยในแต่ละทิศทางการกัดงานจะมี 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ แผนการทดลองที่เหมาะสมคือ Orthogonal Array L9 ซึ่งมีระดับชั้นความอิสระเท่ากับ 9 และสามารถกำหนดแผนการทดลองโดยใช้ Orthogonal Array L9 ตามวิธีทากูชิตั้งแสดงในตารางที่ 2 แล้วกำหนดเงื่อนไขการทดลองตามตารางที่ 3

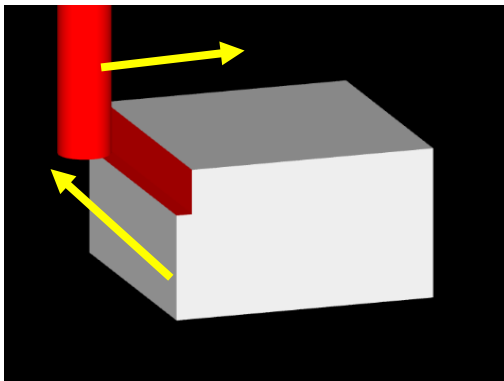
ตารางที่ 2 แผนการทดลอง (Matrix Experiment) ที่เหมาะสม Orthogonal Array L9

ลำดับการทดลอง	ระดับปัจจัย		
	1	2	3
1	1 (-)	1 (-)	1 (-)
2	1 (-)	2 (0)	2 (0)
3	1 (-)	3 (+)	3 (+)
4	2 (0)	1 (-)	2 (0)
5	2 (0)	2 (0)	3 (+)
6	2 (0)	3 (+)	1 (-)
7	3 (+)	1 (-)	3 (+)
8	3 (+)	2 (0)	1 (-)
9	3 (+)	3 (+)	2 (0)

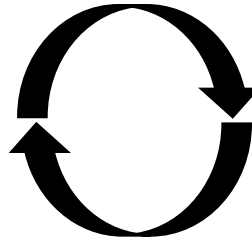
ตารางที่ 3 การกำหนดเงื่อนไขการทดลองตามแผนการทดลองโดยใช้ Orthogonal Array L9

ลำดับการทดลอง	ปัจจัยที่ทำการควบคุมในการทดลอง		
	D ระยะป้อนลึก (mm)	N ความเร็วรอบ (RPM)	F อัตราป้อน (mm/min)
1	(1) 3	(1) 1200	(1) 80
2	(1) 3	(2) 1500	(2) 100
3	(1) 3	(3) 1800	(3) 120
4	(2) 4	(1) 1200	(2) 100
5	(2) 4	(2) 1500	(3) 120
6	(2) 4	(3) 1800	(1) 80
7	(3) 5	(1) 1200	(3) 120
8	(3) 5	(2) 1500	(1) 80
9	(3) 5	(3) 1800	(2) 100

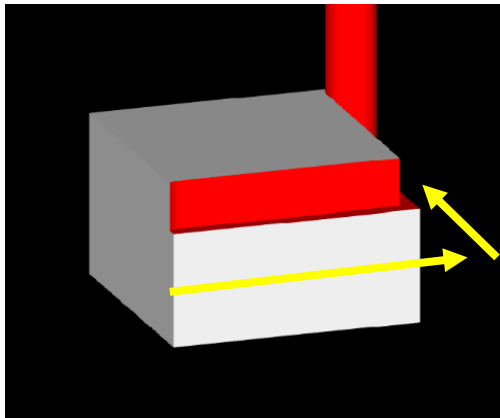
จากแผนการทดลองตามวิธีการทากูชิ โดยกำหนดปัจจัย 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ ความเร็วรอบ (Spindle speed) อัตราป้อน (Feed rate) และระยะป้อนลึก (Depth of cut) ซึ่งไม่รวมปัจจัยของทิศทางการกัดชิ้นงานซึ่งมี 2 ระดับ คือ G41 คือการชดเชยรัศมีดอกกัดออกทางด้านซ้าย (Tool path Compensation Left) และ G42 คือการชดเชยรัศมีดอกกัดออกทางด้านขวา (Tool path Compensation Right) จึงต้องทำการทดลองตามแผนการทดลองตามวิธีทากูชิทั้ง 2 ทิศทาง ด้วยแผนเดียวแต่มีทิศทางการกัดชิ้นงานต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของดอกกัด แต่ในความเป็นจริงของการกัดงานดอกกัดจะอยู่กับที่แต่โต๊ะชิ้นงานจะเคลื่อนที่



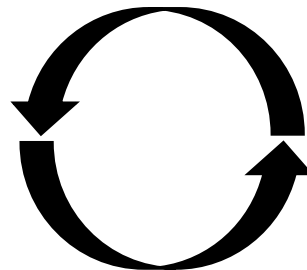
คำสั่ง G41 Tool path Compensation Left



รูปที่ 3 รูปแบบการทำงานของคำสั่งการกัด G41



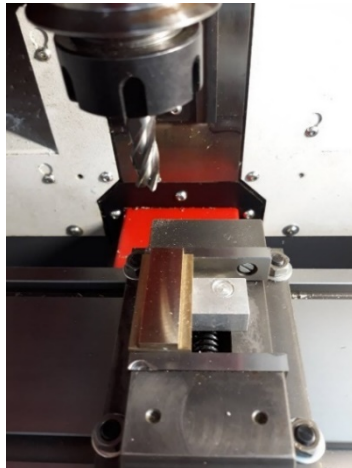
คำสั่ง G42 Tool path Compensation Right



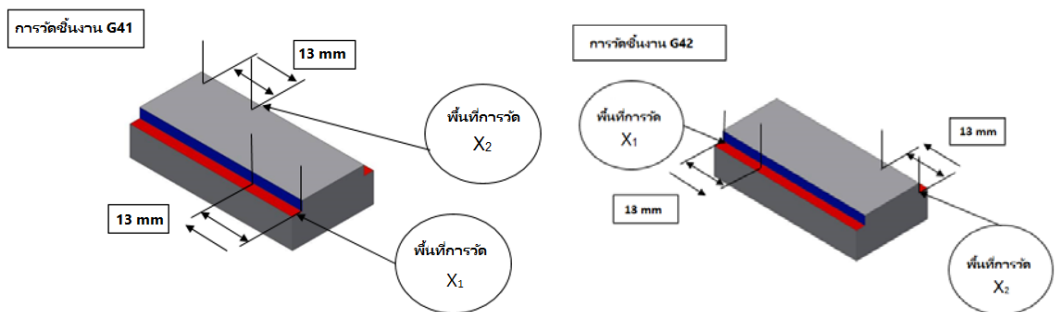
รูปที่ 4 รูปแบบการทำงานของคำสั่งการกัด G42

5. ขั้นตอนการทดลอง

ชิ้นงานทดสอบเป็นทองเหลืองขนาด 1x2x0.25 นิ้ว ผ่านการปาดหน้าผิวดิบด้านนอกออก ดังแสดงในรูปที่ 5 และทำการกัดตามทิศทาง G41 และ G42 ปราศจากการใช้น้ำหล่อเย็น โดยการกำหนดเงื่อนไขการกัดงานตาม Orthogonal Array L9 แล้วทำการวัดค่าความหยابผิวในพื้นที่ X_1 และ X_2 ตามลำดับ แล้วเฉลี่ยค่าที่วัดได้เพื่อเป็นตัวแทนของการทดลองนั้น ดังแสดงในรูปที่ 6 และได้ผลค่าความหยابผิวตามตารางที่ 4



รูปที่ 5 ชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 6 พื้นที่การวัดค่าความหยابผิว ของ G41 และ G42

ตารางที่ 4 ความหยาบผิวของทองเหลืองที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ด้วยทิศทางการกัด G41 และ G42

ลำดับการทดลอง	ทิศทางการกัด G41 ปัจจัย			ความหยาบผิว : (μm)	
	D (mm)	N (RPM)	F (mm/min)	G41	G42
1	3	1200	80	0.72	1.04
2	3	1500	100	0.70	1.35
3	3	1800	120	0.66	1.04
4	4	1200	100	1.07	1.49
5	4	1500	120	1.26	1.24
6	4	1800	80	1.19	1.45
7	5	1200	120	1.15	1.70
8	5	1500	80	0.95	1.24
9	5	1800	100	0.96	1.41

6. ผลการดำเนินงาน

จากแผนการทดลองตามวิธีการทากูซิจิที่ได้กล่าวไว้ ซึ่งได้กำหนดปัจจัย 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ ความเร็วรอบ (Spindle speed) อัตราป้อน (Feed rate) และระยะป้อนลึก (Depth of cut) ทำการวิเคราะห์ได้ผลดังนี้

6.1 ค่าอัตราส่วน S/N – Ratio ของความหยาบผิว

จากการทดสอบชิ้นงานด้วยระดับปัจจัยที่แตกต่างกันได้ค่าความหยาบผิวดังตารางที่ 4 นำมาใช้ในการคำนวณหาค่า S/N – Ratio โดยค่าความหยาบผิวหาค่าอัตราส่วน S/N – Ratio ชนิดที่ค่าตอบสนองที่น้อยที่สุดคือค่าที่ดีที่สุด (the smaller – the better) ตามสมการที่ 1 และสามารถสรุปผลได้ตามตารางที่ 5

S/N – Ratio แบบ the smaller – the better

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

เมื่อ S/N แทน อัตราส่วนของ S/N ในแต่ละ Experiment Number
 n แทน จำนวนการทดลองซ้ำในแต่ละ Experiment Number
 y_j แทน ค่าตอบสนอง (Response) ในแต่ละครั้งของการทดลองของแต่ละ Experiment Number

ตารางที่ 5 สรุปอัตราส่วน S/N – Ratio คำนวณค่าความหยาบจากผลการทดลอง 9 ชุด

ลำดับการทดลอง	ระยะป้อนลึก (mm)	ความเร็วรอบ (RPM)	อัตราป้อน (mm/min)	G41			G42		
	D	N	F	ความหยาบผิว	MSD	S/N-Ratio	ความหยาบผิว	MSD	S/N-Ratio
1	3	1200	80	0.72	0.52	2.85	1.04	1.08	-0.34
2	3	1500	100	0.70	0.49	3.10	1.35	1.82	-2.61
3	3	1800	120	0.66	0.44	3.61	1.04	1.08	-0.34
4	4	1200	100	1.07	1.15	-0.59	1.49	2.22	-3.46
5	4	1500	120	1.26	1.59	-2.01	1.24	1.54	-1.87
6	4	1800	80	1.19	1.42	-1.51	1.45	2.10	-3.23
7	5	1200	120	1.15	1.32	-1.21	1.70	2.89	-4.61
8	5	1500	80	0.95	0.90	0.45	1.24	1.54	-1.87
9	5	1800	100	0.96	0.92	0.36	1.41	1.99	-2.98
				Average		0.56	Average		-2.37

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าค่าความหยาบผิวของ G41 ที่ได้อยู่ในช่วง 0.66-1.26 ไมโครเมตร และค่ากลางเบี่ยงเบนมาตรฐาน (MSD) ของค่าความหยาบผิวอยู่ระหว่าง 0.44-1.59 อัตราส่วน S/N-Ratio ที่ได้ของค่าความหยาบผิวอยู่ระหว่าง -2.01 ถึง 3.61 โดยมีค่าเฉลี่ยของ S/N-Ratio อยู่ที่ 0.56 และค่าความหยาบผิวของ G42 ที่ได้อยู่ในช่วง 1.04-1.70 ไมโครเมตร ค่ากลางเบี่ยงเบนมาตรฐาน (MSD) ของค่าความหยาบผิวอยู่ระหว่าง 1.082-2.89 อัตราส่วน S/N-Ratio ที่ได้ของค่าความหยาบผิวอยู่ระหว่าง -4.61 ถึง -0.34 โดยมีค่าเฉลี่ยของ S/N-Ratio อยู่ที่ -2.37

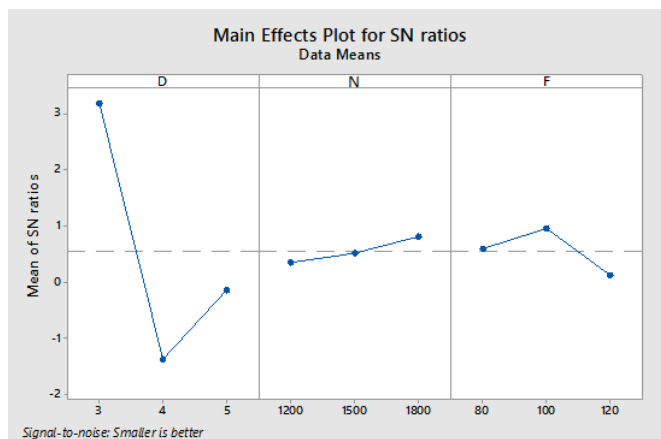
6.2 การวิเคราะห์ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวของ G41

ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัยควบคุมใดมีค่ามากหมายความว่าที่ระดับปัจจัยควบคุมนั้นจะมีผลทำให้คุณภาพงานออกมาไม่ดี โดยได้ผลการวิเคราะห์หือทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์หือทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยความหยาบผิว G41

ปัจจัย	ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย			min	max	max-min	%main effect
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3				
D	3.19	-1.37	-0.14	-1.37	3.19	4.56	77.81
N	0.35	0.51	0.82	0.35	0.82	0.47	8.02
F	0.60	0.96	0.13	0.129	0.96	0.83	14.16
					รวม	5.86	100

จากตารางที่ 6 ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย จะถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์หือทธิพลของปัจจัย จากผลต่างของค่าของระดับปัจจัยที่สูง (max) และต่ำ (min) และทำการวิเคราะห์ร้อยละของอิทธิพลหลัก (%main effect) ของแต่ละปัจจัยดังนี้ ของปัจจัย D=77.81% ของปัจจัย N= 8.02% ของปัจจัย F=14.16% พบว่า ระยะเวลา (D) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวของชิ้นงานมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 77.81 รองลงมาคือ อัตราป้อน (F) และความเร็รรอบ (N) ตามลำดับ จากผลในตารางที่ 6 สามารถสร้างกราฟผลตอบสนอง S/N-Ratio โดยขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยที่ถูกคำนวณสำหรับแต่ละระดับปัจจัยและผลกระทบรวมได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของระดับต่าง ๆ ของปัจจัยกับค่า S/N-Ratio ของความหยาบผิว G41

จากรูปที่ 7 พบว่าที่ระดับปัจจัย N และ F ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน น้อยมาก เมื่อเทียบกับระดับปัจจัย D ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานมาก โดยที่ D ระดับที่ 2 ทำให้ค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานต่ำที่สุด โดยสรุปจากกราฟหากต้องการให้ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานต่ำที่สุด ควรกำหนด D ระดับที่ 2 คือ 4 มิลลิเมตร, N ระดับที่ 1 คือ 1200 เมตรต่อนาที และ F ระดับที่ 3 คือ 120 มิลลิเมตรต่อนาที

6.3 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของ G41

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการทดลอง สำหรับการทดลองนี้กำหนดให้ค่าความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha = 0.05$) ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 8

General Linear Model: Ra versus D, N, F						
Method						
Factor coding (-1, 0, +1)						
Factor Information						
Factor	Type	Levels	Values			
D	Fixed	3	3, 4, 5			
N	Fixed	3	1200, 1500, 1800			
F	Fixed	3	80, 100, 120			
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
D	2	0.360622	0.180311	15.66	0.060	
N	2	0.003059	0.001544	0.13	0.882	
F	2	0.019622	0.009811	0.85	0.540	
Error	2	0.023022	0.011511			
Total	8	0.406356				
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	0.107290	94.33% 77.34% 0.00%
Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	0.9622	0.0358	26.91	0.001		
D						
3	-0.2689	0.0506	-5.32	0.034	1.33	
4	0.2111	0.0506	4.17	0.053	1.33	
N						
1200	0.0178	0.0506	0.35	0.759	1.33	
1500	0.0078	0.0506	0.15	0.892	1.33	
F						
80	-0.0089	0.0506	-0.18	0.877	1.33	
100	-0.0522	0.0506	-1.03	0.410	1.33	
Regression Equation						
Ra = 0.9622 - 0.2689 D_3 + 0.2111 D_4 + 0.0578 D_5 + 0.0178 N_1200 - 0.0078 N_1500 - 0.0256 N_1800 - 0.0089 F_80 - 0.0522 F_100 + 0.0611 F_120						

รูปที่ 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ S/N-Ratio ของความหยาบผิว G41

จากรูปที่ 8 พบว่าค่า P-value ของปัจจัยทดสอบทั้ง 3 ปัจจัย ไม่มีปัจจัยใดที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีปัจจัย D ที่มีค่า P-value ใกล้ 0.05 มากที่สุด แสดงว่าระยะป้อน (D) ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่ว่า ค่า D มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวมากที่สุด

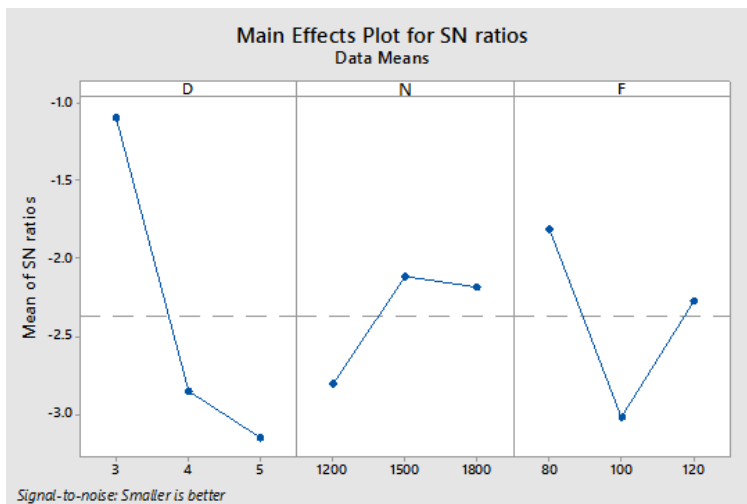
6.4 การวิเคราะห์ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวของ G42

ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย จะถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์หาอิทธิพลของปัจจัย จากผลต่างของค่าของระดับปัจจัยที่สูง (max) และต่ำ (min) และทำการวิเคราะห์ร้อยละของอิทธิพลหลัก (%main effect) ของแต่ละปัจจัยดังนี้ ของปัจจัย D=52.03% ของปัจจัย N=17.26% ของปัจจัย F=30.71% พบว่า ระยะเวลาป้อนลึก (D) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวของชิ้นงานมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 52.03 รองลงมาคือ อัตราป้อน (F) เป็นร้อยละ 30.71 และความเร็วยรอบ (N) เป็นร้อยละ 17.26 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยความหยาบผิว G42

ปัจจัย	ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย			min	max	max-min	%main effect
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3				
D	-1.10	-2.86	-3.15	-3.15	-1.10	2.05	52.03
Vc	-2.80	-2.12	-2.18	-2.80	-2.12	0.68	17.26
F	-1.81	-3.02	-2.27	-3.02	-1.81	1.21	30.71
					รวม	3.94	100

จากตารางที่ 7 สามารถสร้างกราฟผลตอบสนอง S/N-Ratio โดยขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยที่ถูกคำนวณสำหรับแต่ละระดับปัจจัยและผลกระทบรวมได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของระดับต่าง ๆ ของปัจจัยกับค่า S/N-Ratio ของความหยาบผิว G42

จากรูปที่ 9 พบว่าที่ระดับปัจจัย V และ F ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน น้อยมาก เมื่อเทียบกับระดับปัจจัย D ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานมาก โดยที่ D ระดับที่ 3 ทำให้ค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานต่ำที่สุด โดยสรุปจากกราฟหากต้องการให้ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานต่ำที่สุด ควรกำหนด D ระดับที่ 3 คือ 5 มิลลิเมตร, V ระดับที่ 1 คือ 1200 เมตรต่อนาที และ F ระดับที่ 2 คือ 100 มิลลิเมตรตอรอบ

6.5 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน G42

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการทดลอง สำหรับการทดลองนี้กำหนดให้ความเชื่อมั่นที่ 95% ($\alpha = 0.05$) ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 10

General Linear Model: Ra versus D, Vc, F						
Method						
Factor coding (-1, 0, +1)						
Factor Information						
Factor	Type	Levels	Values			
D	Fixed	3	3, 4, 5			
Vc	Fixed	3	1200, 1500, 1800			
F	Fixed	3	80, 100, 120			
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
D	2	0.15976	0.07988	1.20	0.454	
Vc	2	0.03042	0.01521	0.23	0.814	
F	2	0.04509	0.02254	0.34	0.747	
Error	2	0.13282	0.06641			
Total	8	0.36809				
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	0.257704	63.92%	0.00%	0.00%		
Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	1.3289	0.0859	15.47	0.004		
D						
3	-0.186	0.121	-1.53	0.266	1.33	
4	0.064	0.121	0.53	0.649	1.33	
Vc						
1200	0.081	0.121	0.67	0.573	1.33	
1500	-0.052	0.121	-0.43	0.709	1.33	
F						
80	-0.086	0.121	-0.70	0.554	1.33	
100	0.088	0.121	0.72	0.545	1.33	
Regression Equation						
Ra = 1.3289 - 0.186 D_3 + 0.064 D_4 + 0.121 D_5 + 0.081 Vc_1200 - 0.052 Vc_1500 - 0.029 Vc_1800 - 0.086 F_80 + 0.088 F_100 - 0.002 F_120						

รูปที่ 10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ S/N-Ratio ของความหยาบผิว G42

จากรูปที่ 10 พบว่าค่า P-value ของปัจจัยทดสอบทั้ง 3 ปัจจัย ไม่มีปัจจัยใดที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีปัจจัย D ที่มีค่า P-value ใกล้ 0.05 มากที่สุด แสดงว่าระยะป้อน (D) ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่ว่าค่า D มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวมากที่สุด

7. อภิปรายผลการดำเนินงาน

7.1 ความสัมพันธ์ของความหยาบผิวและเงื่อนไขในการกัดงาน

จากเงื่อนไขการกัดชิ้นงานที่ได้กำหนดไว้ 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ ความเร็วรอบ (Spindle Speed) อัตราป้อน (Feed rate) และระยะป้อนลึก (Depth of cut) ทำการทดสอบกับชิ้นงาน ทองเหลือง ได้ผลดังนี้

ทิศทางการกัดงาน G41 ค่าความหยาบผิวมีความความสัมพันธ์กับการกำหนดค่าระยะป้อนลึก (Depth of cut) ส่วน ความเร็วรอบ (Spindle Speed) และอัตราป้อน (Feed rate) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิว ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงค่าระยะป้อนลึก (Depth of cut) จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทองเหลืองที่ผ่านการกัดโดยไม่ใช้น้ำหล่อเย็น แต่การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบ (Spindle Speed) และ อัตราป้อน (Feed rate) จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

ส่วนที่ทิศทางการกัดงาน G42 ค่าความหยาบผิวไม่มีความความสัมพันธ์กับปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบ (Spindle Speed) อัตราป้อน (Feed rate) และระยะป้อนลึก (Depth of cut) จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

7.2 องค์ประกอบเงื่อนไขในการกัดงานที่เหมาะสมที่สุด

จากเงื่อนไขการกัดชิ้นงานที่ได้กำหนดไว้ 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ ความเร็วรอบ (Spindle Speed) อัตราป้อน (Feed rate) และระยะป้อนลึก (Depth of cut) ทำการทดสอบกับชิ้นงานทองเหลือง พบว่ามีองค์ประกอบเงื่อนไขในการกัดงานที่เหมาะสมที่สุดคือ

ทิศทางการกัดงาน G41 สมควรกำหนดค่าความเร็วรอบ (Spindle Speed) ระดับที่ 1 คือ 1200 รอบ/นาที ค่าอัตราป้อน (Feed rate) ระดับที่ 3 คือ 120 มิลลิเมตร/นาที และระยะป้อนลึก (Depth of cut) ระดับที่ 2 คือ 4 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานน้อยที่สุด โดยจากการทดสอบได้ค่าความหยาบผิวที่ 0.84 ไมโครเมตร

ทิศทางการกัดงาน G42 สมควรกำหนดค่าความเร็วรอบ (Spindle Speed) ระดับที่ 1 คือ 1200 รอบ/นาที ค่าอัตราป้อน (Feed rate) ระดับที่ 2 คือ 100 มิลลิเมตร/นาที และระยะป้อนลึก (Depth of cut) ระดับที่ 3 คือ 5 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานน้อยที่สุด โดยจากการทดสอบได้ค่าความหยาบผิวที่ 1.60 ไมโครเมตร

8. สรุปผลการดำเนินงาน

จากเงื่อนไขการกัดชิ้นงานที่ได้กำหนดไว้ 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ ความเร็วรอบ (Spindle Speed) อัตราป้อน (Feed rate) และระยะป้อนลึก (Depth of cut) ทำการทดสอบกับชิ้นงานทองเหลือง โดยทิศทางการกัดงาน G41 และ G42 พบว่า ทิศทางที่เหมาะสมสำหรับการกัดทองเหลือง คือ ทิศทางการกัดงาน G41 เพราะให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานดีกว่า ได้ค่าความหยาบผิวที่ 0.84 ไมโครเมตร โดยกำหนดค่าความเร็วรอบ (Spindle Speed) ระดับที่ 1 คือ 1200 รอบ/นาที ค่าอัตราป้อน (Feed rate) ระดับที่ 3 คือ 120 มิลลิเมตร/นาที และระยะป้อนลึก (Depth of cut) ระดับที่ 2 คือ 4 มิลลิเมตร

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องวิจัย และอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง

References

- [1] Chalie Trakankool. CNC Technology. 14th ed. Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand-Japan); 2550. (In Thai)
- [2] Anil C, Vedansh C, Jyoti V. Optimization of process parameters of CNC Milling machine for mild steel using Taguchi design and Single to noise ratio Analysis. International Journal of Engineering Research & Technology 2012;1(6).
- [3] Hadi MA, Ghani JA, Che Haron CH, Hasim MS. Comparison between up-milling and down-milling operations on tool wear in milling Inconel 718. Procedia Engineering 2013;68:647-53
- [4] Pratyusha J, Ashok kumar U, Laxminarayana P. Optimization of process parameters for milling using Taguchi methods. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering 2013;2(6):129-35.
- [5] Muataz Hazza Faizi Al-Hazza, Nur Asmawiyah bt Ibrahim, Erry T.Y. Adesta Ahsan Ali Khan and Atiah Bt. Abdullah Sidek. Surface roughness optimization using Taguchi method of high speed end milling for hardened steel D2. International Conference on Mechanical, Automotive and Aerospace Engineering 2017;184:012047.

- [6] Ali Abbar Khleif and Mostafa Adel Abdullah. Effect of Cutting Parameters Wear and Surface Roughness of Stainless Steel (316) Using Milling Process. Al-Nahrain University, College of Engineering Journal (NUCEJ) 2016;19(2):286-92.
- [7] Emco Maier. Software description Emco winNC EMCOTRONIC M2. Hallein, Austria: Emco Maier; 1995. p.49-51.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร.คมพันธ์ ชมสมุทร ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 Email : kompan.c@rmutp.ac.th ปริญญาเอก (ปร.ด.) สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2555

งานวิจัยที่สนใจ: CNC Machine, Maintenance Engineering and Productivity improvement



ดร.สุกัญญา เชิดชูงาม ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 Email : sukanya.che@rmutp.ac.th ปริญญาเอก (ปร.ด.) สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2558

งานวิจัยที่สนใจ: Engineering Statistics, Simulation, Modeling and control system

FIRE CRACK FAILURE OF A DUCTILE CAST IRON ROLL

Saneh Boonrampai¹ and Samroeng Netpu²

¹Lecturer, Division of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture
Rajamangala University of Technology Isan, 744 Suranarai Road, Muang, Nakhon
Ratchasima 30000, Thailand, boon.sane@gmail.com

²Lecturer, Master of Engineering Program in Engineering Management, Graduate School,
Kasem Bundit University, 1761 Pattanakarn Road., Suan Luang, Bangkok 10250, Thailand,
samroeng.net@kbu.ac.th

ABSTRACT

This paper reports the failure analysis of fire crack of a ductile iron roll in a hot rolling mill in Medan, Indonesia. The roll failed prematurely after only 3,500 tons of service instead of the normal service life of about 65,000-70,000 tons. Standard procedures for failure analysis were employed in the investigation. It was found that the failure of the roll was due to excessive heat. Then it led to causing numerous fire cracks being created very high stress resulting from inadequate water cooling of the roll. Heat cracks around the fracture surface were clearly visible. It was, therefore, concluded that the root cause of the failure is inadequate designs of the roll and associated equipment. Alternative designs are suggested to prevent or minimize similar failures in the future, and to avoid the losses resulting from such failures.

KEYWORDS: Ductile Iron Roll, Hot Steel Rolling, Fire Crack, Roll Failure

1. Introduction

Ductile cast iron rolls are extensively used in steel rolling mills particularly for hot rolling operations. A combination of desirable characteristics including high strength, good ductility, and good thermal shock resistance makes ductile iron a preferred material for rolls. Additional characteristics such as corrosion and wear resistance can also be improved by appropriate alloying additions and treatments. Failures of rolls not only result in replacement cost, but also in process downtime as well as other undesirable consequences. This could have a drastic effect on productivity and, more importantly, late delivery. In the case being

investigated, for example, the downtime was 40 hours, 1,200 tons of steel equivalent, was lost before the failed roll could be replaced.

The causes of premature failures of rolls are numerous. They can be improper operations, faulty roll designs, manufacturing defects, and faulty materials or metallurgical factors. Operating factors which include the choice of rolling parameters such as rolling load, rolling speed, temperature of steel bars and the experience of the operators can play a key role in roll failures [1]. Many roll failures in hot rolling steel re-bars mills were found to be due to overload resulting from dynamic impact and fire cracks [2]. Fire cracks range in appearance from small (1 mm) tight longitudinal cracks to large cracks of various patterns (crazing, dry river bed). Thermal shock (spelling, resulting from rapid heating and cooling of the roller body surface) is a more severe form of fire cracking and occurs in an instantaneous manner [3]. The severity of the cracks is dependent up on the contact time and the rate of cooling. The easiest way to avoid thermal breakage is to minimize thermal gradients, which can be achieved by good rolling / cooling strategies and proper handling of rolls [4]. An analysis of failures of rolls with grooves on a 3-high-roughing mill stand for hot rolling is presented, found that 3 out of 4 are failed by rotation bending load with high stress concentration and one in four are failed by dynamic impact [5]. Cooling of working surfaces of rolls by high pressure water and spray nozzle was found to improve the resistance to cracking of rolls some 1.5-2 times [6]. Ensure efficiency of the water-cooling system and verify if the volumes and pressures are correct. The inspect roll cool headers and nozzles for blockage and before rolls are inserted, turn cooling water on to check nozzle spray pattern [7]. A chemical composition of roll materials also influences the resistance to heat cracking. Additions of Ni and Cr were found to increase cracking resistance of rolls [8]. Human errors were also found to be main contributors leading to roll failures. Human errors can be of three general types (1) errors of knowledge (usually involve insufficient knowledge, education, training and experience), (2) errors of performance (lack of sufficient care or from negligence), and (3) errors of intent (very commonly involve greed) (9). The aim of this work was to investigate the cause of premature failure of a ductile cast iron roll in an Indonesian steel rolling mill so that the reoccurrence of similar failure can be avoided or minimized in the future.

2. Background

The failed roll was used at an intermediate rolling stand in a continuous hot rolling steel rebar mill in Medan, Indonesia. The roll failed after it was used for rolling approximately 3,500 tons of steel. Normally, the service life of this type of roll is much longer and can be used for rolling up to 65,000-70,000 tons of steel. The mill produced reinforced concrete steel re-bar sized 6 to 22 mm diameter with the reheating furnace capacity of 30 tons/hr. It was designed for rolling steel billets with cross-sectional areas of 45 X 45 mm² square and 82 X 35 mm² oval. The rolling temperature of this rolling stand was approximately 1,000 °C. Nominal dimensions (mm) of the failed roll and fracture point are shown in Figure 1. Chemical compositions of the roll material are shown in Table 1.

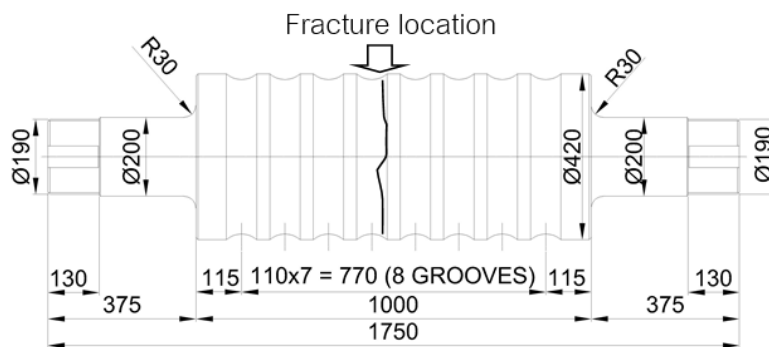


Figure 1 Nominal dimensions and fracture location of the failed roll

Table 1 Chemical compositions

Chemical Compositions (% by wt)					
C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
3.60	1.50	0.68	1.45	0.36	0.36

3. Investigation Procedures

The failure investigation was conducted as follows. The failed roll was inspected visually to get the overall picture of the fractures which include the locations, type of fracture, and the nature of cracks around fracture surfaces. Dye-penetrant technique (DPT) was employed to enhance visual inspection of the cracks. A specimen as shown in Figure 7 was cleaned

ultrasonically in acetone. The specimen was examined using a JEOL-JSM 6380LV scanning electron microscope (SEM). A specimen for microstructural examination was prepared in accordance with ASTM E407 standard. Microstructure was examined using an optical microscope (LECO: IA32 Image Analysis System).

4. Results

4.1 Visual Examination

A general appearance of the failed roll is as shown in Figure 2. The failed roll was taken out from the rolling stand and examined visually. The fracture occurred at the 4th groove from drive side of the top roll. The fracture surfaces were slightly flat as shown in Figure 3. The presence of oxides (dark) at the periphery of the fracture surfaces, approximate 10 mm, is readily apparent, as shown in Figure 4. The fire cracks, on oval grooves, were observed on the top and the bottom rolls.

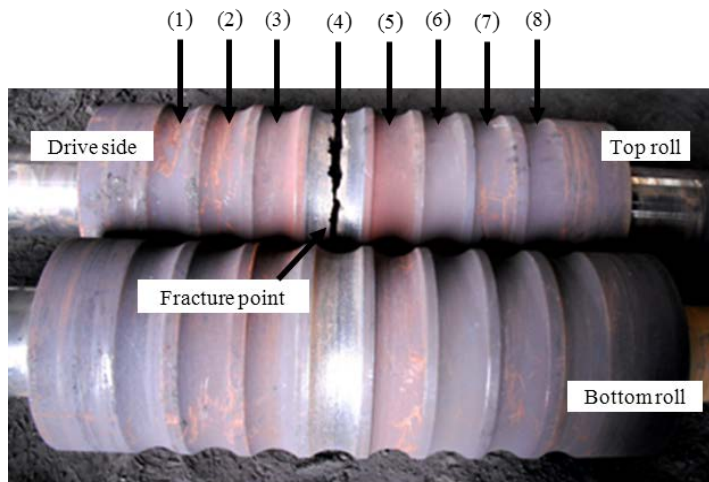


Figure 2 Roll design, oval groove distribution, and position of fracture point

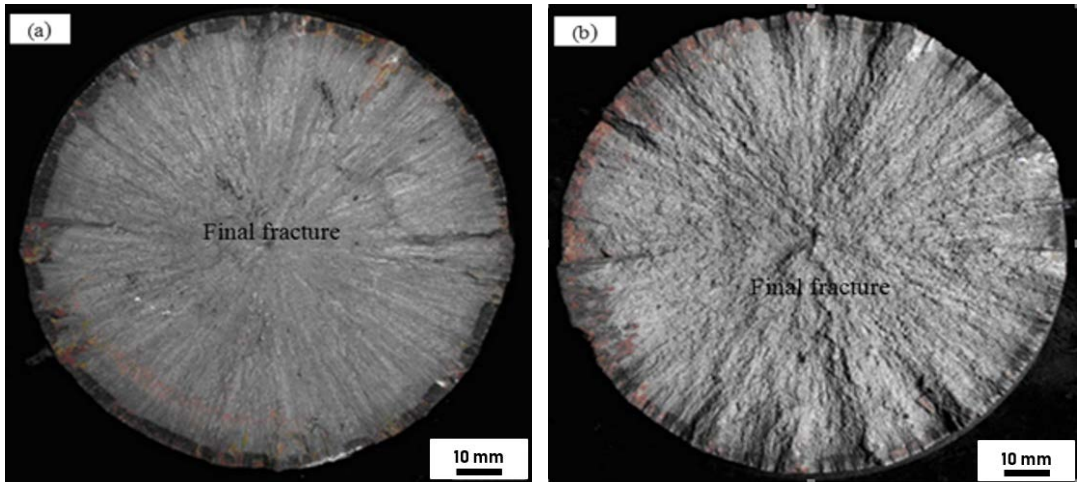


Figure 3 Fracture surfaces of the failed roll (a) drive side (b) top side

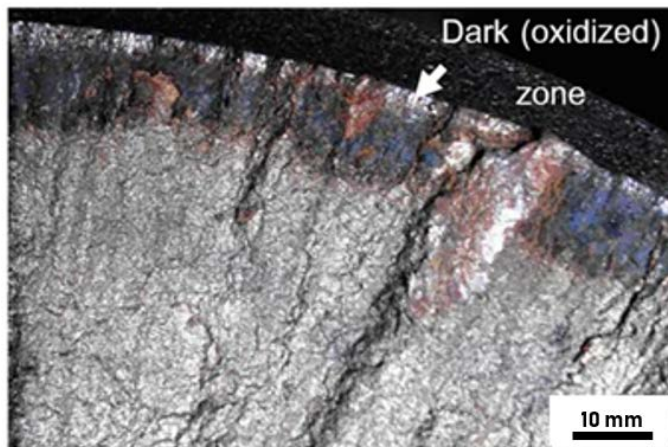


Figure 4 Magnified view of fracture surface

4.2 Dye-Penetration Test

The crack initiations occurred at the surface of oval groove as shown in Figure 5. Numerous fire cracks were observed in the vicinity of the fracture surfaces and surface of oval groove of bottom roll as shown in Figure 6. It can be initially indicated that the failure of the roll occurred due to the fire cracks which subsequently formed a larger crack leading to final failure. From the observation of the groove surface of the rolls, both the top and the bottom rolls occurred the network of fire cracks on the surface of the oval groove as shown in Figure 6, which is indicated both rolls water cooling from supply not enough.

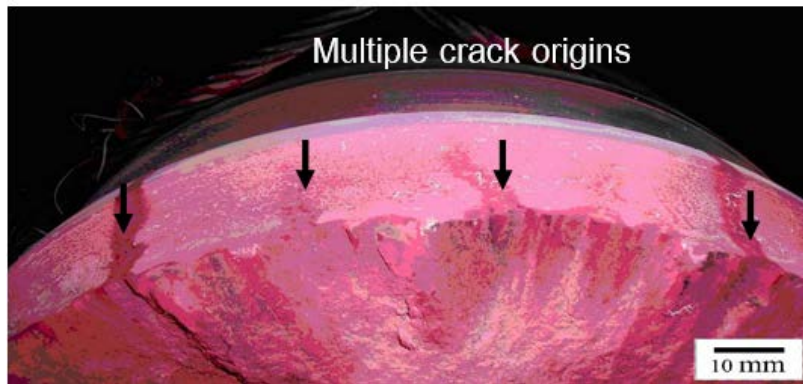


Figure 5 Fracture surface of the crack origins

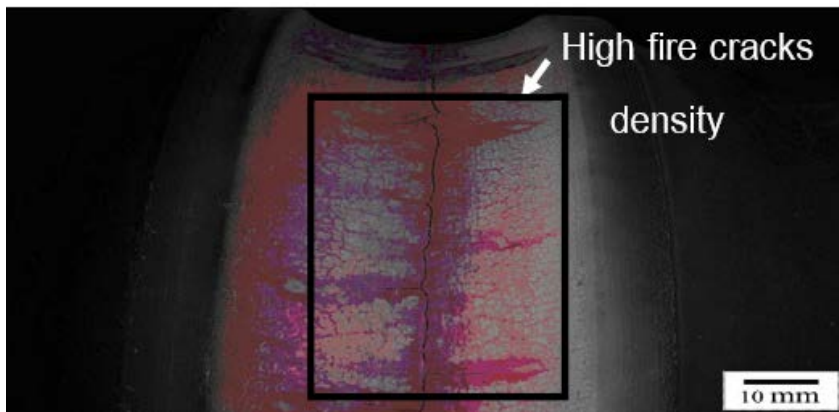


Figure 6 High fire cracks density on oval groove of the bottom roll

4.3 Fractography

The specimen of fracture surface of the failed roll, which is shown in Figure 7 was examined by SEM in order to look more closely at the nature of the fracture. The cracks and oxides were also found in the fracture surface which can be seen in Figure 8. The crack started at the periphery of the oval groove of the roll and then it moved inward to the center of the roll. The oxides, which cover the crack originated surface, was observed. It can be seen that the fracture surface in Figure 8 shows the decohesion surface is rather flat, as shown in Figure 9. Moreover, although the fracture surface is essentially brittle. Figure 9 is, however, primarily brittle (cleavage) and show manifestations of cracking and cleavage steps.



Figure 7 Specimen for SEM examined

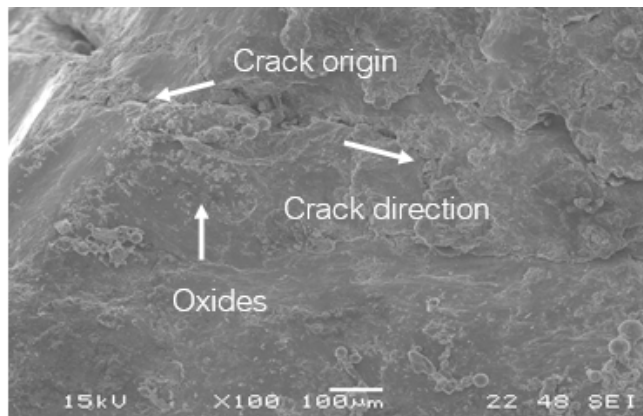


Figure 8 Fractography showing view of the crack origin and oxides

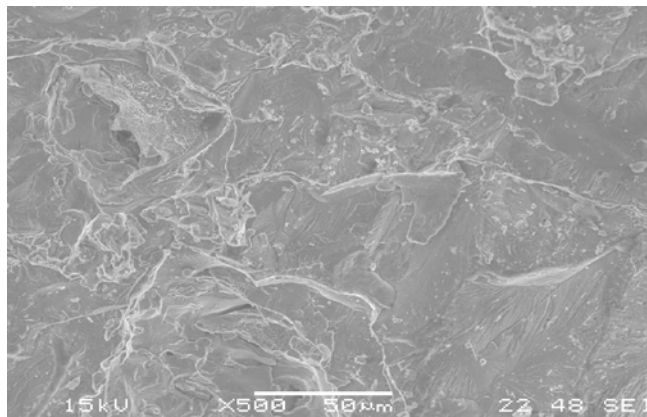


Figure 9 Morphology of brittle features and small ductile zone

4.4 Microstructure examination

The microstructure consists of nodular graphite and eutectic carbide in pearlite matrix as shown in Figure 10a, typical for ductile cast iron rolls [10]. Multiple cracks were also found on outer shell of roll as can be seen in Figure 10b. These cracks appeared as started at the periphery of the outer shell of the roll and moved inward to the center. Higher magnification micrograph of one of these cracks and crack depth approximately 5.20 mm is shown in Figure 10c.

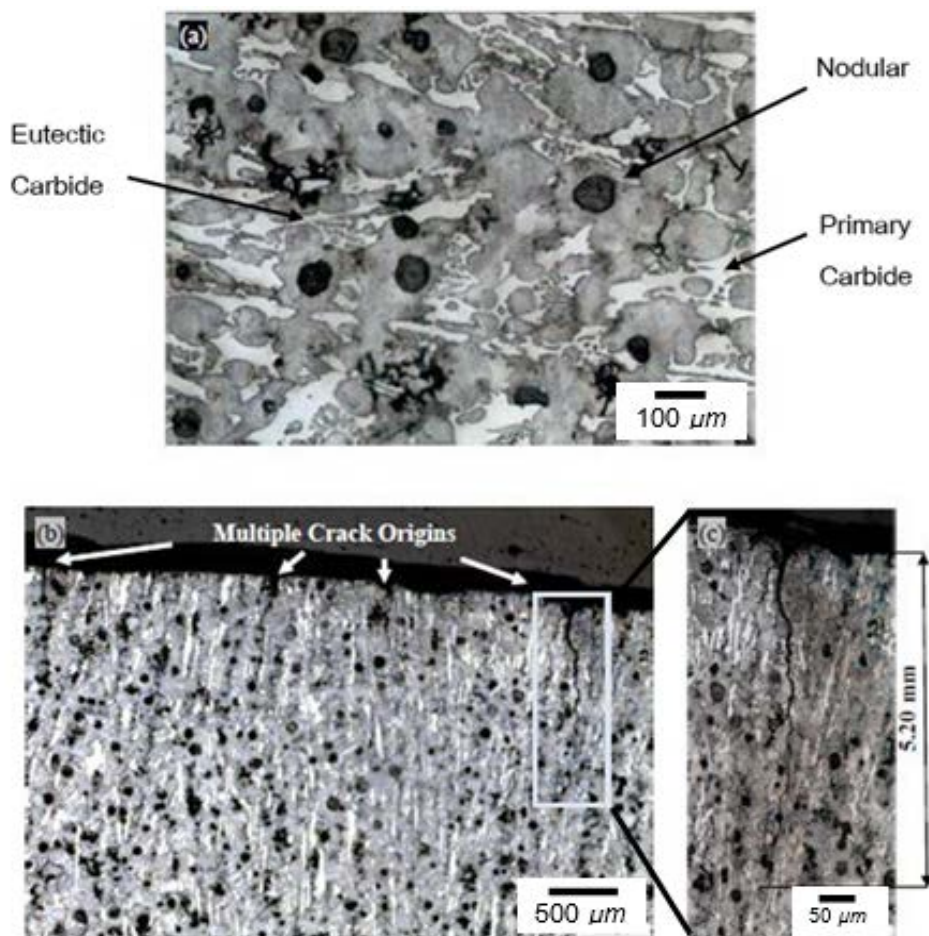


Figure 10 Microstructure of the failed roll: a) nodular graphite in structure, b) microstructure with multiple cracks, and c) higher magnification morphology of a crack depth (Etched with 2% nital)

4.5 Roll cooling system

The cooling system for the rolls in this particular mill will be shown in Figure 11. Cooling water was pumped through a steel piping and plastic hose. The control system of water for cooling individual rolls was accomplished by gate valves. Header water piping for roll cooling was installed only at the top of top roll, which means the exit side did not have the water piping. Such design of the cooling system is rather fragile because there was not any warning where things started to go wrong.

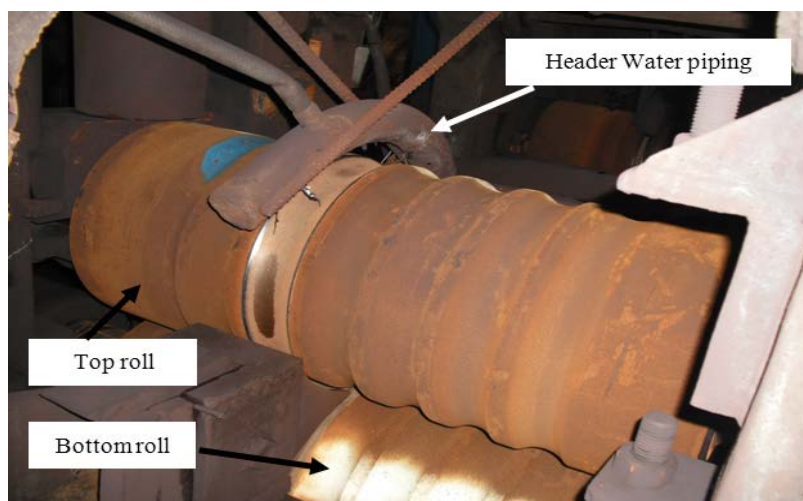


Figure 11 Existing roll cooling system

5. Discussion

Fire cracks occurred on the oval groove of the failed roll because excessive heating due to a small area of the oval groove surface is directly contact the hot steel bars. In this case, the oval groove surfaces do not cool down. Maximum temperature of the oval groove too high (500-650 °C), the average roll body temperature and the temperature difference increase steadily. In addition, temperature gradients can develop within the roll. The temperature gradients can cause large stresses to build up in the surface layer, exceed hot yield strength of the roll material, and lead to the formation of a network of heat cracks, often referred to as fire cracks. Fracture surface was oxides (dark) cover approximate 10 mm from outer shell of the roll as shown in Figure 3 and Figure 4 because of excessive heat that acted at the oval groove surface. After that, it started cracks and continuously inward to the

center of the failed roll. However, the failed roll during cyclic stress whilst, the failed roll was operating. For this reason, the cracks on the tensile stress spread out. While the crack surfaces were directly expanded, the failed roll was heated by hot bars when it was operated. The crack surfaces were oxidized between water and iron. Hence, the crack surfaces became dark because oxides cover the cracks.

Resulting from the investigations above, it can be concluded that the failure of the roll was due to excessive heating at the oval groove of the failed roll. Such excessive heating led to thermal stress being created at the surface of the groove causing numerous small fire cracks. The cracks that acted as stress concentrators resulting very high stress at the groove of the roll. The fire cracks that acted as the origins of a larger crack growing inwards to the center of the roll leading, eventually, to final fracture. The cause of excessive heating was inadequate cooling of the roll. Such occurrence was, in turn, the result of inadequate design of the roll cooling system. The design of the roll cooling system was also to blame.

6. Conclusions and Recommendation

1) The roll failed by brittle fracture. The crack originated at the surface of the oval groove of the roll, where numerous fire cracks occurred, were formed earlier.

2) The consequence of the inadequate cooling of the roll is excessive heating which result in the fire cracks forming.

3) Inadequacy in roll water cooling result partly from inadequate design of the roll cooling system.

4) It can be recommended that a robust roll cooling should be redesigned to replace the current one. Header water piping must be moved close to the exit bars where can be guaranteed that the maximum possible temperature will never be critical. Furthermore, the devices, which control water flow rate as same between top and bottom roll, must be added. When such parameters are out of the set values, the system should warn the operator. The recommended design is as shown in Figure 12.

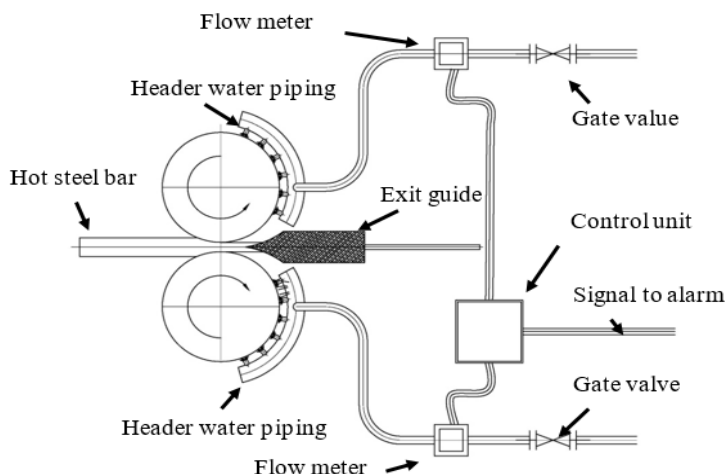


Figure 12 Roll cooling system with sensor devices

Acknowledgement

The authors would like to thank Mr. Octo Julius who is factory manager in the PT. Putra Baja Deli, Medan Indonesia for his help in the history of the failed roll and allowing the publication of this information.

References

- [1] Corbett RB. Rolls for the metal working industries. Technology & Engineering Iron & Steel Society. 3rded. Pennsylvania: Warrendale; 2010.
- [2] Schröder KH. A basic understanding of the mechanics of rolling mill roll. ROLL 2003;1:537-93.
- [3] Azevedo CRF, Belotti Neto J. Failure analysis of forged and induction hardened steel cold work rolls. Engineering failure analysis 2004;11:951-66.
- [4] Ing, Schröder KH. ANSWERS, MORE QUESTIONS Twenty - five years of experience in discussing rolls and rolling technology. SCRIB 2015 Mar 06. [Epub ahead of print]
- [5] Domazet Z, Lusa F, Susnjar M. Failure analysis of rolls with grooves. Engineering failure analysis 2007;14:1166-74.
- [6] Raudesky M, Horsky J, Pohanka M, Kotrbacek P. Cooling of rolls used in hot rolling of long product. International conference Roll 4 2007; 2007 Marc 14-16; Birmingham, UK: Heatlab; 2007. p. 685-90.

- [7] Premsai T, Varma AKV, Sivarajan S. Failure analysis of rollers in mill stand using failure mode effect analysis. International journal of engineering sciences & research technology 2014;3(7):151-9.
- [8] Guo Z, Fu-ren Xiao, Lu S, Li H, Liao B. Effects of heat-treatment on the microstructure and wear resistance of a high-chromium cast iron for rolls. Advances in materials science and engineering 2016:140-52.
- [9] Haan J. Human error in structural engineering subtitle. The design of a human reliability assessment method for structural engineering 2012:98.
- [10] Souzaa TNF, Nogueirac RAPS, Francob FJS, Aguilard MTP, Cetlina PR. Mechanical and microstructural characterization of nodular cast iron (NCI) with niobium additions. Materials research 2014;17(5):1167-72.

Author's Profile



Saneh Boonrampai, M. Eng. Lecturer of Industrial Engineering Program. (Mobile: (+66) 061-8743255, Email: saneh.bu@rmuti.ac.th). He has graduated in Bachelor of Engineering in Industrial Engineering at Rajamangala University of Technology Isan, Master of Engineering in Production Engineering at King Mongkut's University of Technology Thonburi



Samroeng Netpu, D. Eng. Lecturer of Master of Engineering in Engineering Management Program. (Mobile: (+66) 089-9946598, Email: samroeng.net@kbu.ac.th). He has graduated in Bachelor of engineering in Mechanical Engineering at King Mongkut's University of Technology Thonburi, Master of Engineering in Engineering Management at Kasem Bundit University and Doctor of Engineering in Integrated Product Design and Manufacturing at King Mongkut's University of Technology Thonburi.