

“วิศวกรรมลาดกระบ้ง”

วิศวกรรมลาดกระบ้งเป็นวารสารทางวิชาการซึ่งจัดทำโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. เป็นเอกสารเผยแพร่งานวิจัยและพัฒนาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์
2. เป็นสื่อแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ ๆ ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ระหว่างนักวิจัยและผู้สนใจ
3. เป็นเอกสารรวบรวมรายงาน และบทความทางวิชาการที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิศวกรรมศาสตร์

วาระที่ออก

ปีละ 4 ฉบับ (ทุก 3 เดือนต่อฉบับ)

นโยบาย

บทความที่จะเสนอตีพิมพ์ จะต้องเป็นบทความที่มีคุณค่าทางวิศวกรรม เช่น เป็นรายงานการวิจัยที่ผู้เขียนได้ทำการทดลอง สร้าง หรือมีส่วนทำงานโดยตรง เป็นบทความที่เสนอถึงความคิด หรือหลักการใหม่ที่เป็นไปได้ และมีทฤษฎีประกอบ หรือสนับสนุนอย่างเพียงพอ หรือเป็นบทความทางวิชาการที่น่าสนใจ มีประโยชน์ต่อนักศึกษาและนักวิจัย โดยผู้เขียนเป็นผู้รวบรวมและเรียบเรียงเอง

รูปแบบของบทความ

บทความที่เสนอจะเป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษก็ได้ โดยจัดพิมพ์ตามรูปแบบที่กำหนดให้ ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลทเพื่อพิมพ์ได้ทันที (camera ready) และเพื่อให้รูปแบบการพิมพ์ของบทความมีมาตรฐานเดียวกันจึงขอให้ผู้เขียนจัดเตรียมเอกสารโดยใช้เวิร์ดโปรเซสเซอร์ Microsoft Word for Windows สำหรับรูปภาพประกอบ หากมีใช้ภาพถ่ายก็ควรเขียนหรือสเก็ตโดยใช้ซอฟต์แวร์ ที่สนับสนุนการทำงานในระบบ Windows

บทความที่น่าสนใจเพื่อตีพิมพ์ ควรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับ ดังนี้

- | | |
|---------------------------|---|
| ชื่อเรื่อง | ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ |
| ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน | ไม่ต้องระบุคุณวุฒิหรือตำแหน่งทางวิชาการใด ๆ |
| สถานที่ทำงาน | ในกรณีที่ผู้เขียนหรือผู้ร่วมงานเป็นนักศึกษา ให้ใช้คณะและสถาบันที่สังกัดเป็นสถานที่ทำงาน |
| บทคัดย่อ | ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ |
| เนื้อความ | ควรประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ และมีเลขประจำหัวข้อตามลำดับ |
| | 1. บทนำ |
| | 2. ทฤษฎี |
| | 3. การทดลองและผลการทดลอง |
| | 4. สรุป |
| | 2.1 หลักการของ..... |
| | 2.2 หลักการใหม่..... |

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง
กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์ (662) 329-8000 # 3464, 3465
โทรสาร (662) 329-8317

ที่ปรึกษา

คมบดี
รศ.ดร.คมสัน มาลีสี

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ศ.ดร.อิสระชัย งามหุ

กองบรรณาธิการ

นายโกลล วาดเขียน
ออกแบบปกและรูปเล่ม
นางอาทิสดา ขาววิกรณ์
ติดต่อประสานงานและสมาชิกสัมพันธ์
จัดทำต้นฉบับ Artwork
พิสูจน์อักษร

จัดจำหน่ายโดย

คณะวิศวกรรมศาสตร์
นางอาทิสดา ขาววิกรณ์
โทร. 02-329-8317

กิตติกรรมประกาศ

(ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง

การอ้างในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิง โดยตัวเลขจะอยู่ในวงเล็บใหญ่ โดยรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงจะเป็นดังนี้

- [1] P. Choeysuwan and S. Choomchuay, “The Economics Analysis of RFID Implementation in Logistic,” Ladrabang Engineering Journal, Vol.30, No.1, pp.7-12, March, 2556.
- [2] I. M. Filanovsky and H.P. Baltas, “Simple CMOS Analog Square-Rooting and Squaring Circuits,” IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol.39, No.4, pp.312-315, Sept., 1992.
- [3] R. E. Blahut, Theory and Practice of Error Control Codes, Addison-Wesley, Reading, MA, 1983.

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความมีความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์ ส่วนหน้าที 9 เป็นต้นไป ต้องเสียค่าตีพิมพ์หน้าละ 500 บาท โดยติดต่อส่งได้ที่ E-mail : kmitleng.jnl@gmail.com ส่วนวิศวกรรมลาดกระบ้ง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง บทความจะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้อ่านที่ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น ๆ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด และซีดีข้อมูลบทความอีก 1 ชุด



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง”

ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรณเจตพงศ์ชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน

บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติ

สิรินธร ไทย-เยอรมัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า-

พระนครเหนือ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิศักดิ์ วรพิเชฐ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชูชีพสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.สรวิทย์ สุจิตตร

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ศาสตราจารย์ ดร.โมนาย ไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ สุระกำพล

สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีขั้นสูง

(THAIST)

สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์

เทคโนโลยีนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทน.)

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันที่ 30 พฤศจิกายน 2558

เรื่อง ขอเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมเนื้อหาของบทความวิศวกรรมลาดกระบังให้มีความยาวจำนวนหน้าเพิ่มมากขึ้น

เรียน อาจารย์ นักศึกษา นักวิจัย และผู้สนใจ

กองบรรณาธิการทางวิศวกรรมลาดกระบัง ขอเรียนแจ้งให้ท่านทราบว่า ขอเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมเนื้อหาของบทความให้มีความยาวจำนวนหน้าเพิ่มมากขึ้นจากเดิม ความยาวไม่เกิน 6 หน้า 2 คอลัมน์ เปลี่ยนเป็น ความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์ หากจำนวนหน้าของเนื้อหา มากกว่า 8 หน้าขึ้นไป ในส่วนของหน้าที 9 เป็นต้นไป คิดราคาค่าตีพิมพ์เพิ่มหน้าละ 500 บาท (ห้าร้อยบาทถ้วน) โดยผู้แต่งต้องชำระเงินค่าตีพิมพ์ในจำนวนหน้าที่เกิน 8 หน้า หลังจากที่ยื่นบทความแก้ไขสมบูรณ์แล้ว และได้รับหนังสือการตอบรับการตีพิมพ์จากงานวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ จักขอบพระคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(ศ.ดร.อิสระชัย จามหฺร)
หัวหน้ากองบรรณาธิการ

งานบริหารการวิจัย (วิศวกรรมลาดกระบัง) คณะวิศวกรรมศาสตร์

โทร. / โทรสาร : 02-329-8317

การศึกษาผลของการลดความชื้นในฟลูอิดไชน์เบดและเบดบรรจุ เพื่อการออกแบบเครื่องผลิตอากาศแห้งแบบต่อเนื่อง

Effect of Dehumidification in Fluidized Bed and Packed Bed for Designing Continuous Dehumidifier

ศิริพันธ์ มุรธาชัยลักษณ์* นัชนพล ไม้ซุน* ธนทัต ศิริสุวรรณโชติ*

*ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail: siripan.mu@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การลดความชื้นในอากาศด้วยเครื่องผลิตอากาศแห้งแบบต่อเนื่องเป็นกระบวนการดูดซับแบบสลับอุณหภูมิ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบเครื่องผลิตอากาศแห้งแบบต่อเนื่องขับเคลื่อนด้วยความร้อนเหลือทิ้ง ตัวดูดซับที่เลือกใช้คือ ซิลิกาเจล โดยได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับและคายซับความชื้น ได้แก่ ความสูงของซิลิกาเจลในกระบวนการดูดซับ ความเร็วของอากาศในกระบวนการดูดซับ-คายซับ และอุณหภูมิของอากาศร้อนในกระบวนการคายซับ โดยเปรียบเทียบการออกแบบหอดูดซับและคายซับแบบสภาวะฟลูอิดไชน์เบดและสภาวะเบดบรรจุ จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการดูดซับความชื้น คือ สภาวะฟลูอิดไชน์เบดที่ความเร็วของอากาศและความสูงของซิลิกาเจลมีค่ามาก เนื่องจากการดูดซับที่สภาวะฟลูอิดไชน์เบดมีค่าความดันตกคร่อมและอุณหภูมิของอากาศขาออกที่ต่ำกว่าที่สภาวะเบดบรรจุ สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการคายซับความชื้น คือ อุณหภูมิ 70 - 80 องศาเซลเซียส ความเร็วของอากาศร้อนมีค่าสูงแต่ไม่เกิน 0.86 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไชน์

คำสำคัญ : ลดความชื้น, สารดูดความชื้นชนิดของแข็ง, ซิลิกาเจล

Abstract

Dehumidification with continuous dehumidifier is the temperature swing adsorption process. The objective of this study is to evaluate the optimal condition to design continuous dehumidifier driven by waste heat. The adsorbent was silica gel. This experiment studied parameters that affect the efficiency of adsorption process and desorption process. The parameters were height of silica gel in adsorption process, velocity of air in adsorption - desorption process and temperature of hot air in desorption process. This study compared between fluidized bed and packed bed. The results showed that the optimal condition for adsorption process is fluidized bed at high air velocity and high height of silica gel. As a result, the pressure drop and exit air temperature of fluidized bed are lower than of packed bed. The optimal condition for the desorption process is 70-80 °C with high velocity, which does not exceed minimum fluidization velocity of 0.86 m/s

Keywords : dehumidification, solid desiccant, silica gel

1. บทนำ

สำหรับอุตสาหกรรมที่ต้องการเก็บรักษาคุณภาพของวัตถุดิบหรือสินค้าให้มีอายุการใช้งานได้ยาวนาน จำเป็นจะต้องมีการควบคุมระดับความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่เหมาะสม การลดความชื้นของอากาศในปัจจุบันที่นิยมใช้งานมีอยู่ 2 ระบบ [1] คือ ระบบทำความเย็นเชิงกล (Mechanical Refrigeration) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการลดความชื้นในอากาศที่มีความชื้นและอุณหภูมิสูง และระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้น (Desiccant Dehumidification) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการลดความชื้นในอากาศที่มีความชื้นและอุณหภูมิต่ำ หากมีการใช้ระบบทำความเย็นเชิงกลเพื่อลดความชื้นในอากาศให้ต่ำกว่า 40% ความชื้นสัมพัทธ์ จะทำให้เกิดน้ำแข็งบนคอยล์เย็น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดความชื้นลดลง ดังนั้น หากใช้ระบบนี้ควรมีช่วงของการไล่น้ำแข็งออกจากคอยล์เย็น (Defrost Cycle) หรือวิธีอื่นๆ ซึ่งทำให้ระบบซับซ้อนและมีราคาแพง ดังนั้นการใช้ระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นสำหรับการลดความชื้นในอากาศที่มีความชื้นและอุณหภูมิต่ำจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่า นอกจากนี้ การนำระบบลดความชื้นด้วยสารดูดความชื้นมาใช้ร่วมกับระบบปรับอากาศ [2] ซึ่งทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าระบบปรับอากาศด้วยวิธีอัดไอ แต่ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์นั้น ระบบปรับอากาศด้วยวิธีลดความชื้นยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก เพราะมีต้นทุนสูง และระยะเวลาการคืนทุนที่นาน

ระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้น ได้แก่ ระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นชนิดของแข็ง และระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นชนิดของเหลว ซึ่งมีจุดเด่นและจุดด้อยของแต่ละระบบดังแสดงในตารางที่ 1 ระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นชนิดของแข็งที่นิยมใช้กันมาก คือ วงล้อดูดความชื้น (Desiccant Wheel) มีส่วนประกอบหลัก คือ ชุดวงล้อบรรจุสารดูดความชื้นขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ และฮีตเตอร์ในการให้ความร้อนแก่อากาศเพื่อใช้ในการคายความชื้นออกจากสารดูดความชื้น ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงมากและผลที่ตามมา คือ อากาศแห้งที่ได้จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นมาก โดย

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของระบบลดความชื้นโดยใช้สารดูดความชื้นชนิดของแข็งและของเหลว [3]

คุณสมบัติ	ชนิดของระบบลดความชื้น	
	สารดูดความชื้นชนิดของแข็ง	สารดูดความชื้นชนิดของเหลว
กลไกการลดความชื้น	การดูดซับ	การดูดซึม
ความดันตกคร่อมของระบบ	สูง	ต่ำ
ความร้อนในการฟื้นฟูสารดูดซับ	สูง	ต่ำ
ความซับซ้อนของระบบ	ไม่ซับซ้อน	ซับซ้อน
การกัดกร่อน	ไม่กัดกร่อน	บางชนิดกัดกร่อน
การปนเปื้อนของสารดูดความชื้นในอากาศแห้ง	ไม่ปนเปื้อน	อาจจะปนเปื้อน
ตัวอย่างสารดูดความชื้น	ซิลิกาเจล โมเลกุลาร์ซีฟ แคลเซียมซัลเฟต	สารละลาย ลิเทียมคลอไรด์ ไตรเอทิลีน-ไกลคอล

เพิ่มขึ้นประมาณ 10-25 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิห้อง [4] อีกทั้งการบรรจุสารดูดความชื้นในวงล้อดูดความชื้นมีลักษณะเป็นเบดบรรจุ (packed bed) ทำให้มีค่าความดันตกคร่อมสูง การนำฟลูอิดไคซ์เบด (fluidized bed) มาใช้แทนเบดบรรจุ เป็นแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบลดความชื้น [5]

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับและคายความชื้นเพื่อนำผลที่ได้จากการทดลองมาใช้สำหรับการออกแบบเครื่องผลิตอากาศแห้งแบบต่อเนื่องขับเคลื่อนด้วยความร้อนเหลือทิ้ง ตัวดูดซับที่นำมาใช้คือซิลิกาเจล เนื่องจากเป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูก มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ประมาณ 35-50% และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการคายความชื้นออกด้วยการให้ความร้อน การทดลองได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับและคายสำหรับสภาวะฟลูอิดไคซ์เบดและสภาวะเบดบรรจุ ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความสูงของตัวดูดซับ ความเร็วของอากาศในกระบวนการดูดซับและคาย อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการคาย ซึ่งเมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้น อัตราการคาย

จะเพิ่มขึ้นด้วย [6] การใช้อุณหภูมิสำหรับการคายซับที่ไม่สูงเกินไป ทำให้สามารถออกแบบระบบให้มีการใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต เช่น ความร้อนจากคอนเดนเสทมาใช้ในการคายซับความชื้นได้ ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและเกิดประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมที่มีความร้อนเหลือทิ้งและมีความต้องการระบบการควบคุมความชื้น ทำให้สามารถเกิดการต่อยอดในเชิงพาณิชย์ในอนาคตต่อไป

2. ทฤษฎี

เมื่อมีของไหลเคลื่อนที่เข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ที่ภายในมีอนุภาคของแข็งบรรจุอยู่ หากใช้ความเร็วของของไหลต่ำ อนุภาคจะอยู่กับที่เรียกว่าเบดบรรจุ และเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นไปเรื่อยๆ ถึงจุดหนึ่งที่อนุภาคเริ่มเคลื่อนไหว ความเร็วของของไหลในสภาวะนี้เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไรซ์ (u_{mf}) [7] สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 มิลลิเมตร

$$u_{mf} = \left(\frac{\varepsilon_{mf}^3 \varphi_s d_p}{1.75 \rho_g} (\rho_s - \rho_g) g \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ค่าความดันตกคร่อมสำหรับสภาวะเบดบรรจุและฟลูอิดไรซ์เบดหาได้จากสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ [8]

$$\frac{\Delta P}{H} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U}{(\varphi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho_f U^2}{\varphi_s d_p} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_f)g \quad (3)$$

เมื่อทราบปริมาณความชื้นในอากาศที่ทางเข้าและออกของเบดจะทำให้สามารถคำนวณหาค่าปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับได้จากสมการที่ (4) และ (5)

$$m_{ad} = AU(\rho_a Y_a - \rho_b Y_b) \quad (4)$$

$$M_{ad} = \int_0^t m_{ad} dt \quad (5)$$

เมื่อ M_{ad} คือ ค่าปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ A คือ พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ U คือ ความเร็วของอากาศ ρ_a, ρ_b คือ ความหนาแน่นของอากาศขาเข้าและขาออกตามลำดับ

Y_a, Y_b คือ ค่าปริมาณความชื้นในอากาศขาเข้าและขาออกตามลำดับ โดยการหาค่าปริมาณความชื้นในอากาศคำนวณได้จากสมการที่ (6)

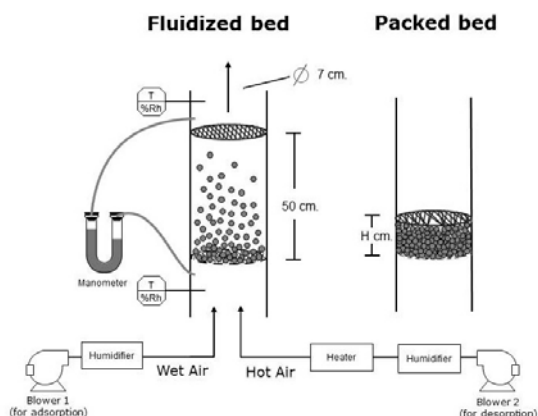
$$Y = 0.622 RH \cdot P_v / (P - RH \cdot P_v) \quad (6)$$

เมื่อ Y คือ ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ (กิโลกรัมไอน้ำ/กิโลกรัมอากาศแห้ง) RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (สัดส่วน) P_v คือ ความดันไอของน้ำ (ปาสกาล)

3. วิธีดำเนินงาน

ใช้ท่ออะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สำหรับบรรจุซิลิกาเจล (ขนาดเฉลี่ย 3.5 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 0.68 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) โดยที่ทางเข้าและทางออกของท่อมีตะแกรงละเอียดติดตั้งไว้ ระยะห่างของตะแกรงสำหรับการทดลองในสภาวะฟลูอิดไรซ์เบด คือ 50 เซนติเมตร และระยะห่างของตะแกรงสำหรับสภาวะเบดบรรจุ คือ ค่าความสูงของซิลิกาเจล (H) ทำให้เมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น ซิลิกาเจลในเบดบรรจุจึงไม่ประพัตต์แบบฟลูอิดไรซ์ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ใช้ในการทดลองถูกควบคุมให้มีค่าประมาณ 33 องศาเซลเซียส และ 20 กรัม/น้ำต่อกิโลกรัมอากาศแห้งตามลำดับ ทำการติดตั้งமானอมิเตอร์รูปตัวยูเพื่อใช้ในการวัดค่าความดันตกคร่อม ใช้ฮีทเตอร์สำหรับเพิ่มอุณหภูมิของอากาศสำหรับกระบวนการคายซับ อุปกรณ์สำหรับวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศถูกติดตั้งไว้ที่ทางเข้าและทางออกของชุดทดลอง ความเร็วลมของอากาศถูกปรับด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ต่ออยู่กับเครื่องเป่าลม ชุดอุปกรณ์สำหรับทดลอง แสดงดังรูปที่ 1 โดยก่อนทำการทดลอง ซิลิกาเจลถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและทิ้งไว้ให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับความชื้นในอากาศด้วยซิลิกาเจลสำหรับสภาวะฟลูอิดไรซ์เบดและสภาวะเบดบรรจุ ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ความสูงของซิลิกาเจลที่ 5 – 12.5 เซนติเมตร และความเร็วของอากาศที่ 0.5 – 2 เมตรต่อวินาที โดยทำการดูดซับความชื้นที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 1 ชุดการทดลองการดูดซับและคายซับสำหรับสภาวะฟลูอิด์เบดและสภาวะเบดบรรจุ

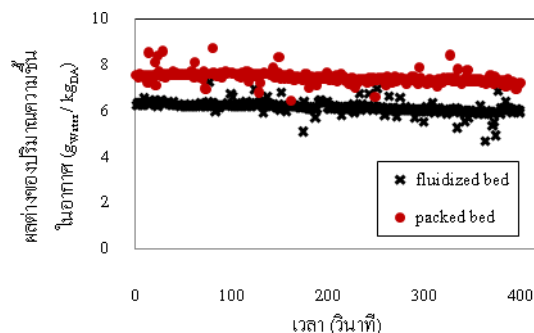
เป็นเวลา 5 นาที ประสิทธิภาพของการดูดซับความชื้นแสดงในรูปของปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับด้วยซิลิกาเจล (มวลของซิลิกาเจลที่เพิ่มขึ้นภายหลังการดูดซับ) ค่าความดันตกคร่อม และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องเป่าอากาศ

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการคายซับความชื้น ได้แก่ ผลของความเร็วและอุณหภูมิของอากาศร้อนโดยทำการทดลองดูดซับความชื้นในอากาศที่ความเร็วอากาศ 1.5 เมตรต่อวินาที ความสูงของซิลิกาเจล 10 เซนติเมตร ในสภาวะฟลูอิด์เบด เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงทำการคายซับที่อุณหภูมิ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส และความเร็วลมร้อนที่ 0.25 - 1.00 เมตรต่อวินาทีเป็นเวลา 5 นาที ประสิทธิภาพของการคายซับความชื้นแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นที่ถูกคายซับออกจากซิลิกาเจล (มวลของซิลิกาเจลที่ลดลงภายหลังการคายซับ) ต่อค่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า

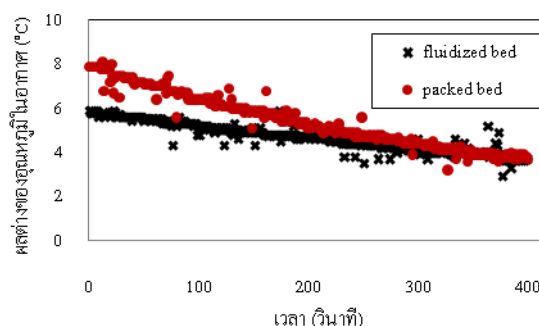
4. ผลการศึกษา/การทดลอง

4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับความชื้นของซิลิกาเจล

จากการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับความชื้นด้วยซิลิกาเจล เมื่อทำการวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่บริเวณทางเข้าและออกจากส่วนการดูดซับ พบว่าการดูดซับความชื้นที่สภาวะฟลูอิด์เบด มีค่าผลต่างของปริมาณความชื้นในอากาศ



รูปที่ 2 ผลต่างของปริมาณความชื้นในอากาศก่อนและหลังการดูดซับ



รูปที่ 3 ผลต่างของอุณหภูมิอากาศก่อนและหลังการดูดซับ

ก่อนและหลังการดูดซับต่ำกว่าการดูดซับที่สภาวะเบดบรรจุ ดังแสดงผลในรูปที่ 2 ดังนั้นปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับในสภาวะฟลูอิด์เบดมีปริมาณที่ต่ำกว่าในสภาวะเบดบรรจุ และเนื่องจากการดูดซับความชื้นด้วยซิลิกาเจลเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน ส่งผลให้ค่าความร้อนที่ได้จากการดูดซับความชื้นด้วยการดูดซับแบบฟลูอิด์เบดมีค่าต่ำกว่าแบบเบดบรรจุ ทำให้ผลต่างของอุณหภูมิอากาศก่อนและหลังการดูดซับสำหรับการดูดซับความชื้นด้วยสภาวะฟลูอิด์เบดมีค่าต่ำกว่าสภาวะเบดบรรจุ ดังแสดงในรูปที่ 3

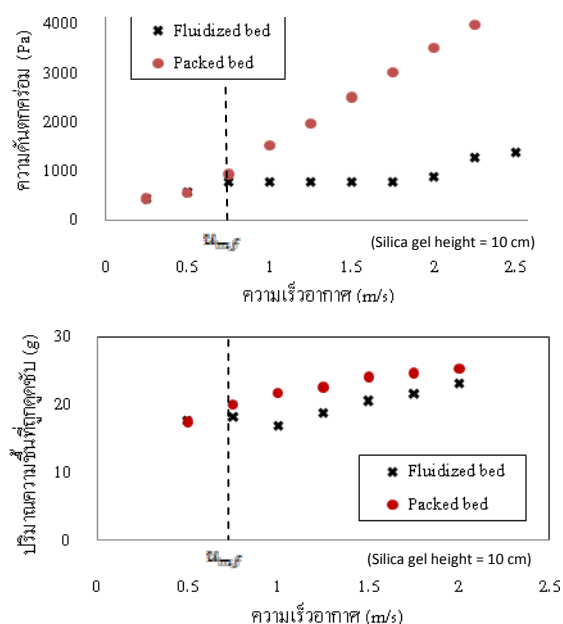
จากรูปที่ 4 พบว่าเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นที่สภาวะเบดบรรจุค่าความดันตกคร่อมมีค่าสูงขึ้นอย่างมาก แต่ที่สภาวะฟลูอิด์เบดค่าความดันตกคร่อมมีค่าสูงขึ้นในช่วงแรกและเริ่มคงที่เมื่อความเร็วอากาศมีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิด์เบด จนกระทั่งที่ความเร็วอากาศที่สูงมากพอ ทำให้เม็ดซิลิกาเจลขึ้นไปติดที่บริเวณตะแกรงด้านบนในลักษณะเบดบรรจุส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อมมีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง ที่ค่าความเร็วอากาศเท่ากันการดูดซับในสภาวะฟลูอิด์เบดมีความดันตกคร่อมต่ำกว่า

สภาวะเบคบรรจ และเมื่อพิจารณาความเร็วอากาศขึ้นที่ส่งผลต่อปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ พบว่าเมื่อความเร็วอากาศขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับของทั้งสองสภาวะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ที่ความเร็วอากาศเท่ากัน ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับในสภาวะเบคบรรจุมีค่าสูงกว่าสภาวะฟลูอิด์เบค

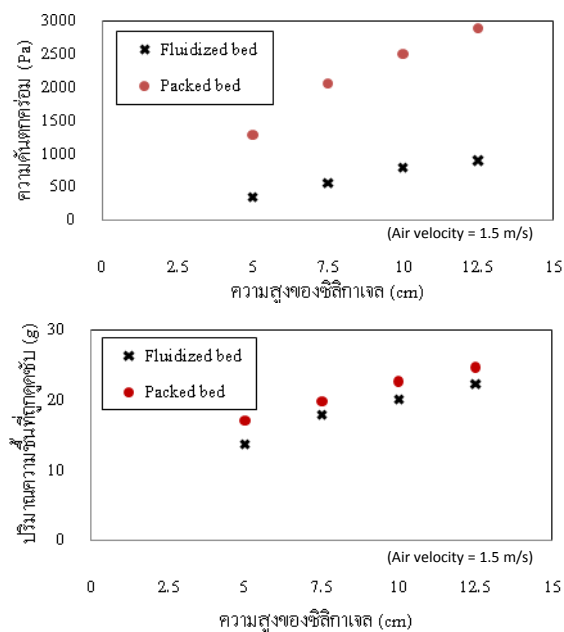
จากรูปที่ 5 พบว่าการเพิ่มความสูงของซิลิกาเจลที่ใช้ในการดูดซับทำให้ปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับของสภาวะฟลูอิด์เบคและสภาวะเบคบรรจุมีค่าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาค่าความดันตกคร่อมของระบบ พบว่าเมื่อเพิ่มความสูงของซิลิกาเจล ค่าความดันตกคร่อมในสภาวะเบคบรรจุจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ในสภาวะ ฟลูอิด์เบคค่าความดันตกคร่อมที่ใช้ในการดูดซับสามารถเพิ่มปริมาณการดูดซับความชื้นได้แต่จะส่งผลให้ค่าความดันตกคร่อมของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น แม้ว่าที่ความสูงของซิลิกาเจลเท่ากันการดูดซับในสภาวะฟลูอิด์เบคจะดูดซับความชื้นได้น้อยกว่าในสภาวะเบคบรรจุ แต่จากการทดลองพบว่า การเพิ่มความสูงของซิลิกาเจล ในสภาวะฟลูอิด์เบคให้มากขึ้นทำให้

ปริมาณการดูดซับความชื้นมีค่าสูงกว่าการดูดซับความชื้นที่สภาวะเบคบรรจุที่ความสูงของซิลิกาเจลน้อย ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองเพื่อหาปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับของสภาวะฟลูอิด์เบคที่ความสูงของซิลิกาเจล 12.5 เซนติเมตร กับสภาวะเบคบรรจุที่ความสูงของซิลิกาเจล 5 เซนติเมตร มีค่า 22.2 และ 17.0 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความดันตกคร่อมของสภาวะทั้งสองเท่ากับ 892 และ 1,285 ปาสคาล ตามลำดับ ดังนั้นการเพิ่มความสูงของซิลิกาเจลในสภาวะฟลูอิด์เบค ไม่ทำให้ค่าความดันตกคร่อมของระบบสูงกว่าในสภาวะเบคบรรจุ

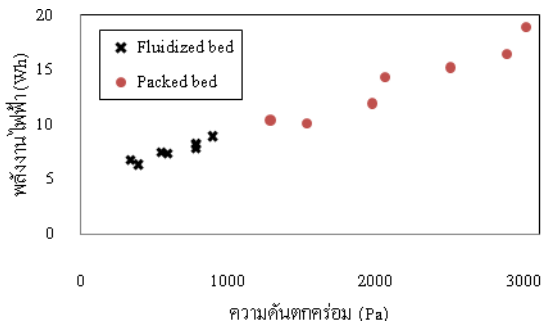
จากรูปที่ 6 พบว่าการดูดซับความชื้นของสภาวะฟลูอิด์เบคและสภาวะเบคบรรจุมีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องเป่าอากาศสูงขึ้นตามความดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้น โดยการดูดซับความชื้นที่สภาวะฟลูอิด์เบคจะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าการดูดซับความชื้นที่สภาวะเบคบรรจุ เนื่องจากการดูดซับความชื้นที่สภาวะฟลูอิด์เบคจะมีค่าความดันตกคร่อมต่ำกว่าที่สภาวะเบคบรรจุมาก



รูปที่ 4 ผลของความเร็วของอากาศต่อความดันตกคร่อมและปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ



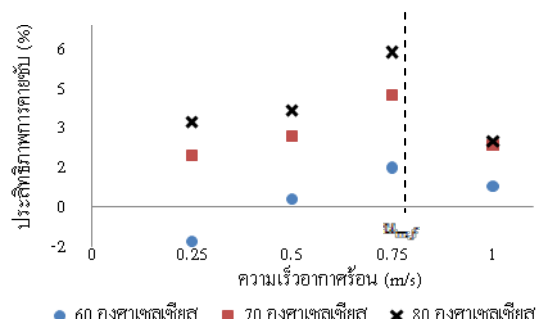
รูปที่ 5 ผลของความสูงของซิลิกาเจลต่อความดันตกคร่อมและปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซับ



รูปที่ 6 ผลของค่าความดันตกคร่อมต่อพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องเป่าอากาศ

ตารางที่ 2 ผลของความเร็วและอุณหภูมิของอากาศร้อนต่อประสิทธิภาพการคายซับความชื้นของซิลิกาเจล

ความเร็ว อากาศร้อน (m/s)	อุณหภูมิ การคายซับ (°C)	ปริมาณความชื้น ที่ถูกคายซับ (g _{H2O})	พลังงาน ที่ใช้ (Wh)
0.25	60	- 0.61	47.09
0.5	60	0.2	63.30
0.75	60	1.11	73.92
1	60	0.65	81.4
0.25	70	1.05	53.42
0.5	70	1.87	69.30
0.75	70	3.54	83.43
1	70	2.28	96.2
0.25	80	2.57	79.29
0.5	80	3.47	94.29
0.75	80	5.73	97.49
1	80	2.62	104.7



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพการคายซับความชื้นที่สภาวะต่างๆ

4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการคายซับความชื้นของซิลิกาเจล

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการคายซับความชื้นของซิลิกาเจล โดยนำซิลิกาเจลไปทำการดูดซับที่สภาวะฟลูอิดไซ์เบด จากนั้นทำการคายซับที่สภาวะต่างๆ โดยทำการทดลองที่ความเร็วของอากาศร้อนในช่วง 0.25 ถึง 1 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการคายซับ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการคายความชื้นของซิลิกาเจลถูกแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นที่ถูกคายซับต่อผลรวมของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องเป่าและฮีตเตอร์ ดังแสดงผลในตารางที่ 2 และ รูปที่ 7 เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการคายซับพบว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนที่สูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการคายซับความชื้นมีค่าสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วของอากาศร้อนต่ำ ซิลิกาเจลไม่สามารถคายซับความชื้นได้และคายซับความชื้นได้น้อยที่ความเร็วอากาศร้อนสูงขึ้น เมื่อพิจารณาผลของความเร็วอากาศร้อนที่ใช้ในการคายซับ พบว่าปริมาณการคายซับความชื้นมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วอากาศร้อนสูงขึ้น และลดลงเมื่อความเร็วของอากาศร้อนสูงเกินค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไซ์ ในขณะที่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้มีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วของอากาศร้อนสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการคายซับความชื้นมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเร็วของอากาศร้อนสูงขึ้น แต่เมื่อความเร็วของอากาศร้อนสูงมากเกินไปทำให้เกิดสภาวะฟลูอิดไซ์ ประสิทธิภาพการคายซับความชื้นของซิลิกาเจลจะลดลง

5. สรุปและการอภิปรายผล

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับความชื้นในอากาศด้วยซิลิกาเจลสำหรับสภาวะฟลูอิดไซ์เบดและสภาวะเบดบรรจุพบว่า ที่ความเร็วอากาศขึ้นหรือความสูงของซิลิกาเจลเท่ากัน ปริมาณการดูดซับความชื้นในสภาวะเบดบรรจุมีค่าสูงกว่าสภาวะฟลูอิดไซ์เบด แต่จะให้ค่าอุณหภูมิของอากาศแห้งที่ได้และค่าความดันตกคร่อมมีค่าสูงกว่าการลดความชื้นด้วยสภาวะฟลูอิดไซ์เบด ส่งผลให้ที่สภาวะเบดบรรจุมีการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องเป่าอากาศสูงกว่าที่สภาวะฟลูอิดไซ์เบด จากการทดลองแม้ว่าปริมาณการดูดซับความชื้นด้วยสภาวะฟลูอิด-

ไคซ์เบคจะมีค่าต่ำกว่าสภาวะเบคบรรจุ แต่เมื่อมีการเพิ่มความเร็วกของอากาศขึ้นหรือเพิ่มความสูงของซิลิกาเจลจะทำให้ปริมาณการดูดซับความชื้นสำหรับสภาวะฟลูอิดไคซ์เบคมีค่าสูงขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพการลดความชื้นในอากาศสูงขึ้นโดยไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความดันตกคร่อมมากนัก ดังนั้นเมื่อคำนึงถึงเรื่องของการประหยัดพลังงาน สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการดูดซับความชื้น คือ สภาวะ ฟลูอิดไคซ์เบคที่ความเร็วของอากาศและความสูงของซิลิกาเจลมีค่ามาก

การศึกษาผลของความเร็วอากาศร้อนและอุณหภูมิที่ใช้ในการคายซับความชื้นของซิลิกาเจล พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการคายซับคือ อุณหภูมิ 70 ถึง 80 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วของอากาศสูงแต่มีค่าต่ำกว่าค่าความเร็วอากาศต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไคซ์ เนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวค่าประสิทธิภาพการคายซับมีค่าสูงที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณเงินสนับสนุนงานวิจัยปีงบประมาณ 2558 จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Pesaran, "A review of desiccant dehumidification technology," NREL/TP-472-7010, 1993.
- [2] M. Sultan, I. EI-Sharkawy, T. Miyazaki, B. Saha and S. Koyama, "An overview of solid desiccant dehumidification and air conditioning system," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.46, pp.16-29, 2015.
- [3] S. Misha, S.Mat, M.H.Ruslan and K.Sopian, "Review of solid / liquid desiccant in the drying applications and its regeneration methods," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.16, pp.4686-4707, 2012.
- [4] A.Yadav and V.Bajpai, "Optimization of operating parameters of desiccant wheel for rotation speed," International Journal of Advanced Science and Technology, Vol.32, pp.109-116, 2011.
- [5] A. M. Hamed, W. R. Abd El Rahman and S.H. El-Emam, "Experimental study of the transient adsorption/desorption characteristics of silica gel particles in fluidized bed," Energy, Vol.35, pp.2468-2483, 2010.
- [6] A.E. Kabeel, "Adsorption-desorption operation of multilayer desiccant packed bed for dehumidification applications," Renewable Energy, Vol.34, pp.255-265, 2009.
- [7] R. Surbkar, T. Wongsiriamnuay and S. Surbkar, "Foundation of the Ergun equation for the calculation of minimum fluidizing velocity of solid particles," Journal of the Thai Society of Agricultural Engineering, Vol.8, No.1, pp.24-33, 2012.
- [8] C.H.Chen, G.Schmid, C.T.Chan, Y.C.Chiang and S.L.Chen, "Application of silica gel fluidized bed for air-conditioning systems," Applied Thermal Engineering, Vol.89, pp.229-238, 2015.

ผลกระทบของปัจจัยในการผลิตที่มีผลต่อการหดตัวของเส้นใย ชนิดไนลอนโมโนฟิลาเมนต์ในอุตสาหกรรมทออวน Effect of Process Factors on Shrinkage of Nylon Monofilament in Fishing Net Factory

วรัญญา ภูมิ ชาญณรงค์ สายแก้ว*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

กระบวนการผลิตเส้นใยมักมีปัญหาในคุณภาพของการหดตัวของเส้นใย เมื่อการหดตัวของเส้นใยไม่เป็นไปตามมาตรฐาน จะก่อให้เกิดปัญหาในคุณภาพของอวน งานวิจัยนี้ใช้วิธีการค้นหาผลิตภัณฑ์/กระบวนการที่พัฒนาจากแนวคิดของ Tukey เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตเส้นใยชนิดไนลอนโมโนฟิลาเมนต์ โดยคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการหดตัวของเส้นใย จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหดตัวของเส้นใย คือ ความดันของเพลาสกรู ความเร็วรอบของเกียร์ปั๊ม และความเร็วของดูล้อ 4 เมื่อนำผลการศึกษาไปใช้ในกระบวนการผลิต ทำให้ค่า Cp เพิ่มขึ้นถึง 126.47% และค่า Cpk เพิ่มขึ้นถึง 257.89% และยังสามารถเพิ่มผลผลิตได้ถึง 1,253 กิโลกรัม/เดือน

คำสำคัญ : วิธีการค้นหาผลิตภัณฑ์/กระบวนการ ค่าความหดตัว อุตสาหกรรมทออวน เส้นใยชนิดไนลอนโมโนฟิลาเมนต์

Abstract

The process for production of nylon mono filament has the problem of shrinkage which is out of product specification leading to the quality of fishing net. Hence this research aimed to present how to implement the product/process search method developed from Tukey's concept in order to investigate the effect of process factors on shrinkage of nylon mono filament and to determine the optimal operating condition of the significant process factors of nylon monofilament production. The results showed that three significant process factors consisted of pressure of screw shaft, speed of gear pump and speed of four-wheel machine. As the result, the statistical analyses indicated that the capability index of Cp increased to 126.47% and the index of Cpk increased to 257.89%. Consequently, the productivity of nylon mono filament process increased to 1,253 kg/month.

Keywords : Product/process search method, shrinkage, fishing net industry, nylon monofilament

1. บทนำ

อุตสาหกรรมผลิตแหวนเป็นอุตสาหกรรมหลักที่มีการเติบโตเป็นอย่างมากมีการส่งออกนอกประเทศซึ่งทำให้ปัจจุบันยอดขายเฉลี่ยที่ 3,000 ล้านบาท เป็นรายได้จากการส่งออกเทียบกับตลาดในประเทศอยู่ที่ 60:40 [1] เมื่ออุตสาหกรรมการทอวนมีการแข่งขันมากขึ้น ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออุตสาหกรรมทอวนที่จะทำให้ประสบความสำเร็จ คือ มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่าคู่แข่ง มีความสามารถที่จะแข่งขันกับคู่แข่งได้ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและเป็นมาตรฐาน เพื่อให้มีศักยภาพในการแข่งขันกับคู่แข่งในปัจจุบันและอนาคตได้ คุณภาพของวัตถุดิบในการทอวนจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก นั่นคือ วัตถุดิบจะต้องมีสมบัติตรงตามข้อกำหนดที่ลูกค้าต้องการ ดังนั้น การปรับปรุงและการศึกษาหาปัจจัยในการผลิตที่เหมาะสมเพื่อนำไปสู่การควบคุมกระบวนการผลิตให้เป็นไปตามมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ที่ลูกค้าได้กำหนดไว้จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมาก

วัตถุดิบที่สำคัญที่สุดในการผลิตแหวน คือ เส้นใยที่ใช้ในการถักทอเพื่อให้เกิดเป็นผืนอวน เส้นใยนี้ผลิตมาจากไนลอนฟิลาเมนต์ ซึ่งเป็นเส้นใยสังเคราะห์ชนิดแรกของโลก ไนลอนมีสมบัติเด่นมากมาย เช่น มีความต้านทานแรงดึงที่ดีเยี่ยม ความต้านทานการกัดกร่อน และความทนต่อสารเคมี รวมทั้งมีสมบัติที่สามารถพัฒนาได้ดีและมีผู้ทำการศึกษาสัญลักษณ์พื้นฐานของเส้นใยชนิดนี้ไว้ด้วย [2] ปัจจุบันมีการออกแบบเส้นใยให้มีรูปทรงที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งไม่ว่าจะมีการออกแบบรูปทรงแบบใด จะมีการควบคุมคุณภาพของเส้นใย คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย % ค่าความยืดหยุ่น ค่าความแข็งแรงของเส้นใย ค่าดีเนียร์ (น้ำหนักของเส้นใยต่อ 9,000 เมตร) และค่าความหดตัวของเส้นใย การควบคุมคุณภาพของเส้นใยจำเป็นจะต้องปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยการหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ ของเส้นใย

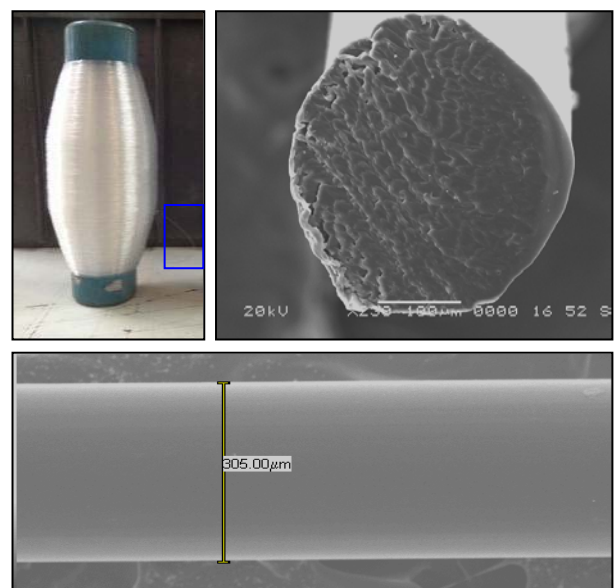
การปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยการหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ ได้แก่ การลดสัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตโดยสุกัณฑ์ ซึ่งทำการสลับระหว่างปัจจัยของกระบวนการผลิตที่ให้คุณภาพดีและปัจจัยของ

กระบวนการผลิตที่ให้คุณภาพแย่ และใช้การวิเคราะห์ความแตกต่าง (gap analysis) [3] การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหยابผิวในกระบวนการกลึงเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316L โดยการออกแบบการทดลองแบบการค้นหาค่าแปร (variable search) [4] การออกแบบการทดลองประเภทนี้มีขั้นตอนที่ง่าย ไม่ซับซ้อน แต่มีประสิทธิภาพในการหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ [6]

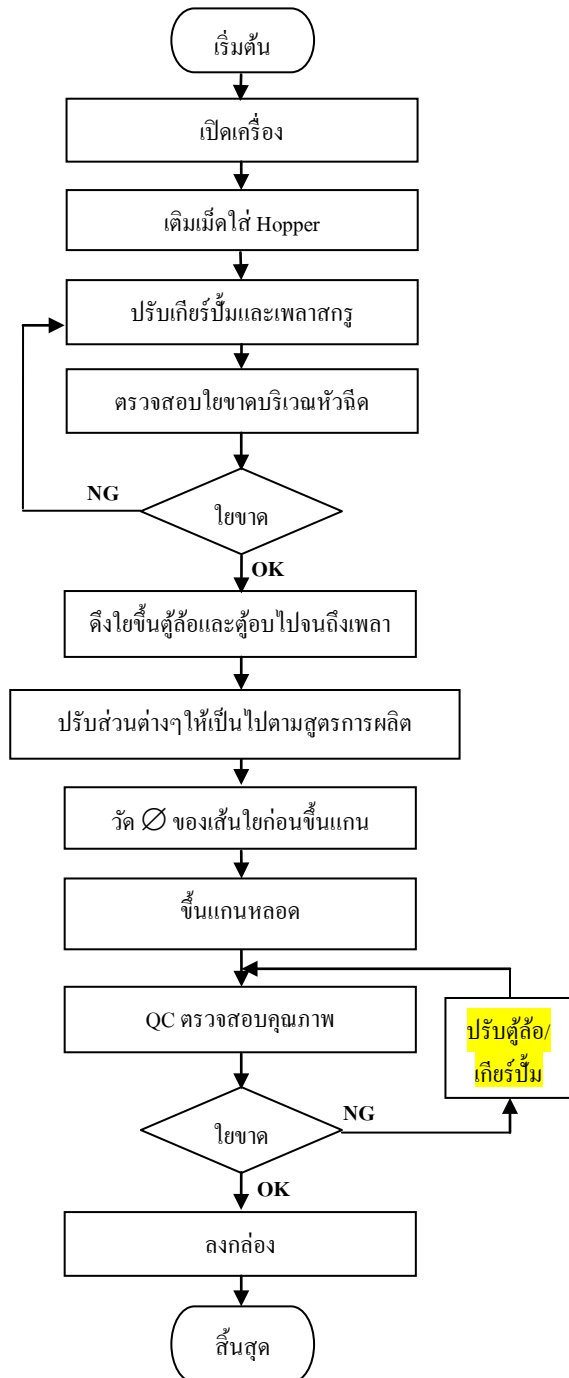
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อการหดตัวของเส้นใย เนื่องจากการทดสอบการหดตัวเป็นการตรวจสอบด้านคุณภาพในขั้นตอนแรก จะทำให้ผู้ผลิตสามารถผลิตสินค้าได้คุณภาพ ถ้าค่าความหดตัวไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐาน ก็จะมีการปรับค่าที่เหมาะสมใหม่ทันที ผู้วิจัยใช้วิธีการค้นหาผลิตภัณฑ์/กระบวนการที่พัฒนาจากแนวคิดของ Tukey มาเป็นเครื่องมือ เพื่อหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของเส้นใยรวมทั้งค่าที่เหมาะสมของปัจจัยในการผลิตที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงสุดในกระบวนการผลิต [6]

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

เส้นใยที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตแหวนคือไนลอนโมโนฟิลาเมนต์ ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 มิลลิเมตร และมีสีขาว ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะเส้นใยที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 2 กระบวนการผลิตเส้นใย

รูปที่ 2 เป็นกระบวนการผลิตเส้นใย โดยเริ่มจากการเปิดเครื่อง และรอให้อุณหภูมิในการหลอมเม็ดพลาสติกอยู่ในระดับอุณหภูมิที่ตั้งไว้ เมื่ออุณหภูมิได้ระดับแล้ว จึงทำการเติมเม็ดพลาสติกลงในถังกรวย (hopper) จากนั้นจึงปรับเกียร์ปัมและเพลาสกรู แล้วทำการเรียงเส้นใย พร้อมดึงเส้นใยไปจนถึงเพล และทำการปรับตุ้ลให้เป็นไปตามสูตรการผลิต เมื่อปรับสภาวะต่างๆ ให้เป็นไปตามสูตรแล้ว จึงทำการวัดขนาดเส้นใยคร่าวๆ ก่อนขึ้นแกนหลอด เมื่อ

นำเส้นใยขึ้นแกนหลอดครบทุกเส้นแล้ว ทำการตั้งเวลาในการตัดเส้นใย เมื่อทำการตัดครบทุกหลอดแล้ว ฝ่ายตรวจสอบคุณภาพจะประเมิน ถ้าคุณภาพของเส้นใยไม่ผ่าน จะทำการปรับตุ้ลและเกียร์ปัมตามความเหมาะสม ขั้นตอนนี้อาศัยประสบการณ์ของหัวหน้างานเอง ซึ่งไม่มีสูตรตายตัว เมื่อคุณภาพของเส้นใยผ่าน ก็จะทำการนำเส้นใยลงกล่อง และรอใช้งานต่อไป

การตรวจสอบค่าความหดรัดกระทำโดยการใช้เครื่องดัมเส้นใย ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 โดยมีวิธีการดังนี้



รูปที่ 3 เครื่องดัมเส้นใย

- 1) นำเส้นใยที่สุ่มมาทำการวัดกับไม้บรรทัดที่มีความยาว 100 ซม. แล้วตัดให้มีความยาว 100 ซม.
- 2) นำเส้นใยที่ตัดแล้วไปดัมในเครื่องดัม (รูปที่ 3) ที่อุณหภูมิ 95 °C โดยใช้เวลาในการดัม 30 นาที
- 3) เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดแล้ว นำเส้นใยไปเป่าโดยใช้พัดลมเป่าให้แห้ง ซึ่งใช้เวลา 30 นาที
- 4) นำเส้นใยที่เป่าจนแห้งแล้วนำกลับมาวัดความยาวอีกครั้งเพื่อดูความหดรัด
- 5) ทำการบันทึกผล แล้วคำนวณหาการหดรัดของเส้นใย

$$(s) \text{ จากสมการ } s = 100 - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

เมื่อ x_i คือ ความยาวของเส้นใยหลังการดัมเส้นที่ i
 n คือ จำนวนของเส้นใยทั้งหมด

3. ผลการศึกษา

3.1 การศึกษาความแตกต่างของชุดข้อมูลโดยใช้วิธีเปรียบเทียบคู่ (paired comparison)

เส้นใยจำนวน 16 ชุดถูกสุ่มมาจากกระบวนการผลิต โดยจำนวนครึ่งหนึ่งสอดคล้องกับคุณลักษณะหรือปัจจัยที่

มีผลกระทบต่อคุณภาพของเส้นใยที่เป็นของดี และอีกจำนวนครึ่งหนึ่งเป็นของไม่ดี โดยเลือกเส้นใยที่มีความแตกต่างกันมากที่สุดระหว่างคุณภาพที่ดีและไม่ดี [5] ข้อมูลที่ได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เส้นใยที่มีคุณภาพดี 8 ชุดและไม่ดี 8 ชุด

ค่าความหดรัดที่ดี (ชม.)		ค่าความหดรัดที่ไม่ดี (ชม.)	
ชุดที่	ค่าความหดรัด	ชุดที่	ค่าความหดรัด
4	10.271	1	9.392
6	10.224	8	9.593
9	10.171	17	9.419
11	10.213	25	11.252
13	9.968	27	8.780
16	10.043	28	8.731
19	10.213	29	9.581
24	10.269	30	9.117

3.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหดรัดของเส้นใย โดยใช้วิธีการค้นหาผลิตภัณฑ์/กระบวนการ (Product/Process search)

การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหดรัดของเส้นใยโดยใช้วิธีการค้นหาผลิตภัณฑ์/กระบวนการเป็นการประยุกต์ใช้หลักการของ Tukey test เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหดรัดของเส้นใย โดยมีขั้นตอนดังนี้ [5]

- 1) เรียงลำดับค่าที่อ่านได้ของเส้นใยทั้งหมด (เส้นใย 16 ชุด) ที่สอดคล้องกับคุณลักษณะหรือปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพ โดยเรียงตามลำดับจากค่ามากไปสู่น้อย หรือจากน้อยไปสู่มาก
- 2) แสดงคุณภาพของเส้นใยแต่ละชุดว่า “ดี” หรือ “ไม่ดี”
- 3) แบ่งแยกข้อมูลด้วยคุณภาพของเส้นใยจากข้อมูลบนสุด เมื่อคุณภาพเส้นใยเปลี่ยนจาก “ดี” เป็น “ไม่ดี” หรือจาก “ไม่ดี” หรือ “ดี” เป็นครั้งแรก ซึ่งเรียกว่า “ผลรวมบนสุด” (top end-count) ในทำนองเดียวกัน แบ่งแยกข้อมูลด้วยคุณภาพของเส้นใยจากข้อมูลล่างสุด เมื่อคุณภาพเปลี่ยนจาก “ดี” เป็น “ไม่ดี” หรือจาก “ไม่ดี” หรือ “ดี” เป็นครั้งแรก ซึ่งเรียกว่า “ผลรวมล่างสุด” (bottom end-count)

- 4) รวม “ผลรวมบนสุด” และ “ผลรวมล่างสุด” เป็น “ผลรวมบนสุดและล่างสุด” (number of total end-count) [5,6] เมื่อได้ผลรวมแล้ว ทำการหารระดับความเชื่อมั่น ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระดับความเชื่อมั่น

ผลรวม	ระดับความเชื่อมั่น
6	90%
7	95%
10	99%
13	99.90%

ปัจจัยในการศึกษาค่าความหดรัดมีทั้งหมด 8 ปัจจัย ได้แก่ ความดันของเพลาสกรู ความเร็วรอบของเพลาสกรู ความเร็วของเกียร์บีบ ความดันของเกียร์บีบ ความเร็วของตัวล้อ 1 2 3 และ 4 ซึ่งการวิเคราะห์ปัจจัยทั้งหมด 8 ปัจจัย แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระดับของปัจจัยและคุณภาพของค่าความหดรัด

ชุดที่	ความเร็ว สกรู	ความดัน สกรู	ความดัน เกียร์บีบ	ความเร็ว เกียร์บีบ	คุณภาพ
1	1305	190	50	875	ไม่ดี
4	1308	180	50	867	ดี
6	1329	170	40	875	ดี
8	1329	180	45	875	ไม่ดี
9	1299	180	50	870	ดี
11	1303	180	50	881	ดี
13	1316	180	50	881	ดี
16	1320	190	50	881	ดี
17	1307	180	50	873	ไม่ดี
19	1316	170	50	873	ดี
24	1323	170	50	873	ดี
25	1277	180	50	878	ไม่ดี
27	1350	200	50	864	ไม่ดี
28	1351	200	50	864	ไม่ดี
29	1351	200	50	864	ไม่ดี
30	1351	200	50	864	ไม่ดี

ตารางที่ 3 ระดับของปัจจัยและคุณภาพของค่าความหดรตัว (ต่อ)

ชุดที่	ล้อย 1	ล้อย 2	ล้อย 3	ล้อย 4	คุณภาพ
1	27.8	88.9	130	120.2	ไม่ดี
4	27.8	88.9	130	120.5	ดี
6	27.8	88.9	130	119.8	ดี
8	27.8	88.9	130	119.0	ไม่ดี
9	27.9	88.9	129	121.5	ดี
11	27.9	88.9	130	120.4	ดี
13	27.8	88.9	130	120.3	ดี
16	27.8	88.9	130	120.0	ดี
17	27.9	88.9	130	119.5	ไม่ดี
19	27.9	88.9	130	120.4	ดี
24	27.8	88.9	130	119.7	ดี
25	27.8	88.9	130	120.0	ไม่ดี
27	27.8	88.9	130	118.8	ไม่ดี
28	27.8	88.9	130	118.3	ไม่ดี
29	27.8	88.9	130	118.8	ไม่ดี
30	27.8	88.9	130	118.8	ไม่ดี

ตารางที่ 4 การเรียงลำดับค่าที่อ่านได้ของเส้นใยทั้งหมดตามคุณภาพของเส้นใยโดยพิจารณาอันดับของปัจจัยและคุณภาพของเส้นใยตามวิธีของ Tukey

เส้นใย	A	คุณภาพ	เส้นใย	B	คุณภาพ
25	1277	ไม่ดี	6	170	ดี
9	1299	ดี	19	170	ดี
11	1303	ดี	24	170	ดี
1	1305	ไม่ดี	4	180	ดี
17	1307	ไม่ดี	9	180	ดี
4	1308	ดี	11	180	ดี
13	1316	ดี	13	180	ดี
19	1316	ดี	8	180	ไม่ดี
16	1320	ดี	17	180	ไม่ดี
24	1323	ดี	25	180	ไม่ดี
6	1329	ดี	16	190	ดี
8	1329	ไม่ดี	1	190	ไม่ดี
27	1350	ไม่ดี	27	200	ไม่ดี
28	1351	ไม่ดี	28	200	ไม่ดี
29	1351	ไม่ดี	29	200	ไม่ดี
30	1351	ไม่ดี	30	200	ไม่ดี

ตารางที่ 4 การเรียงลำดับค่าที่อ่านได้ของเส้นใยทั้งหมดตามคุณภาพของเส้นใยโดยพิจารณาอันดับของปัจจัยและคุณภาพของเส้นใยตามวิธีของ Tukey (ต่อ)

เส้นใย	C	คุณภาพ	เส้นใย	D	คุณภาพ
6	40	ดี	27	864	ไม่ดี
8	45	ไม่ดี	28	864	ไม่ดี
1	50	ไม่ดี	29	864	ไม่ดี
4	50	ดี	30	864	ไม่ดี
9	50	ดี	4	867	ดี
11	50	ดี	9	870	ดี
13	50	ดี	17	873	ไม่ดี
16	50	ดี	19	873	ดี
17	50	ไม่ดี	24	873	ดี
19	50	ดี	1	875	ไม่ดี
24	50	ดี	6	875	ดี
25	50	ไม่ดี	8	875	ไม่ดี
27	50	ไม่ดี	25	878	ไม่ดี
28	50	ไม่ดี	11	881	ดี
29	50	ไม่ดี	13	881	ดี
30	50	ไม่ดี	16	881	ดี
เส้นใย	E	คุณภาพ	เส้นใย	F	คุณภาพ
6	27.8	ดี	1	88.9	ไม่ดี
16	27.8	ดี	4	88.9	ดี
24	27.8	ดี	6	88.9	ดี
8	27.8	ไม่ดี	8	88.9	ไม่ดี
28	27.8	ไม่ดี	9	88.9	ดี
27	27.8	ไม่ดี	11	88.9	ดี
29	27.8	ไม่ดี	13	88.9	ดี
30	27.8	ไม่ดี	16	88.9	ดี
25	27.8	ไม่ดี	17	88.9	ไม่ดี
1	27.8	ไม่ดี	19	88.9	ดี
13	27.8	ดี	24	88.9	ดี
4	27.8	ดี	25	88.9	ไม่ดี
17	27.9	ไม่ดี	27	88.9	ไม่ดี
11	27.9	ดี	28	88.9	ไม่ดี
19	27.9	ดี	29	88.9	ไม่ดี
9	27.9	ดี	30	88.9	ไม่ดี

ตารางที่ 4 การเรียงลำดับค่าที่อ่านได้ของเส้นใยทั้งหมดตามคุณภาพของเส้นใยโดยพิจารณาอันดับของปัจจัยและคุณภาพของเส้นใยตามวิธีของ Tukey (ต่อ)

เส้นใย	G	คุณภาพ	เส้นใย	H	คุณภาพ
9	129	ดี	28	118.3	ไม่ดี
28	130	ไม่ดี	27	118.8	ไม่ดี
27	130	ไม่ดี	29	118.8	ไม่ดี
29	130	ไม่ดี	30	118.8	ไม่ดี
30	130	ไม่ดี	8	119.0	ไม่ดี
8	130	ไม่ดี	17	119.5	ไม่ดี
17	130	ไม่ดี	24	119.7	ดี
24	130	ดี	6	119.8	ดี
6	130	ดี	16	120.0	ดี
16	130	ดี	25	120.0	ไม่ดี
25	130	ไม่ดี	1	120.2	ไม่ดี
1	130	ไม่ดี	13	120.3	ดี
13	130	ดี	11	120.4	ดี
11	130	ดี	19	120.4	ดี
19	130	ดี	4	120.5	ดี
4	130	ดี	9	121.5	ดี

หมายเหตุ A คือ ความเร็วเพลาสกรู B คือ ความดันสกรู C คือ ความดันเกียร์บีบ D คือ ความเร็วเกียร์บีบ E คือ ความเร็วตัวล้อ 1 F คือ ความเร็วตัวล้อ 2 G คือ ความเร็วตัวล้อ 3 H คือ ความเร็วตัวล้อ 4

ตารางที่ 4 แสดงระดับของปัจจัยและคุณภาพของค่าความหดรัดเส้นใย ที่ได้จากตารางที่ 3 โดยเรียงลำดับค่าที่อ่านได้ของเส้นใยทั้งหมดตามคุณภาพของเส้นใยด้วยการพิจารณาอันดับของปัจจัยและคุณภาพของเส้นใยตามวิธีของ Tukey

จากตารางที่ 4 พิจารณาปัจจัย A ว่ามีผลกระทบต่อค่าความหดรัดของเส้นใยหรือไม่ เมื่อเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก โดยไม่คำนึงถึงคุณภาพของเส้นใย จะเห็นว่าความเร็วรอบที่ใช้ตั้งแต่ 1277 rpm ทำให้เส้นใยมีคุณภาพไม่ดี ในขณะที่ความเร็วรอบที่ 1351 rpm ทำให้เส้นใยมีคุณภาพไม่ดีเช่นกัน จึงถือว่าผลรวมบนสุดและล่างสุดเป็นศูนย์ นั่น

คือ ความเร็วเพลาสกรู ไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของเส้นใย

พิจารณาปัจจัย B เมื่อเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก โดยไม่คำนึงถึงคุณภาพของเส้นใย จะเห็นว่าความดันที่ใช้ตั้งแต่ 170-180 bar ทำให้เส้นใยมีคุณภาพดี ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 6.5 ขึ้น ในขณะที่ความดันที่ใช้ตั้งแต่ 190-200 bar ทำให้เส้นใยมีคุณภาพไม่ดี ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 4 ขึ้น นั่นคือ ผลรวมบนสุดและล่างสุดมีจำนวน 11 ขึ้น โดยที่มีระดับความเชื่อมั่นมากกว่า 99% นั่นคือ ความดันของเพลาสกรูมีผลกระทบต่อคุณภาพของเส้นใย

พิจารณาปัจจัย C จะเห็นว่าความดันที่ใช้ตั้งแต่ 40 bar ทำให้เส้นใยมีคุณภาพดี ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 1 ขึ้น ในขณะที่ความดันที่ 50 bar ทำให้เส้นใยมีคุณภาพไม่ดี ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 4.5 ขึ้น นั่นคือ ความดันเกียร์บีบไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของเส้นใย

พิจารณาปัจจัย D จะเห็นว่าความเร็วรอบที่ใช้ตั้งแต่ 864 rpm ทำให้เส้นใยมีคุณภาพไม่ดี ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 4 ขึ้น ในขณะที่ความเร็วรอบที่ใช้ตั้งแต่ 881 rpm ทำให้เส้นใยมีคุณภาพดี ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 3 ขึ้น นั่นคือ ผลรวมบนสุดและล่างสุดมีจำนวน 7 ขึ้น โดยที่มีระดับความเชื่อมั่นมากกว่า 95% นั่นคือ ความเร็วรอบของเกียร์บีบมีผลกระทบต่อคุณภาพของเส้นใย

พิจารณาปัจจัย E จะเห็นว่าความเร็วรอบของตัวล้อที่ 1 ที่ใช้ตั้งแต่ 27.8 m/min ทำให้เส้นใยมีคุณภาพดี ในขณะที่ความเร็วรอบที่ 27.9 m/min ทำให้เส้นใยมีคุณภาพดีเช่นกัน จึงถือว่าผลรวมบนสุดและล่างสุดเป็นศูนย์ นั่นคือ ความเร็วรอบของตัวล้อ 1 ไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของเส้นใย

พิจารณาปัจจัย F จะเห็นว่าความเร็วรอบของตัวล้อที่ 2 ที่ใช้ตั้งแต่ 88.9 m/min ทำให้เส้นใยมีคุณภาพไม่ดี ในขณะที่ความเร็วรอบที่ 88.9 m/min ทำให้เส้นใยมีคุณภาพไม่ดีเช่นกัน จึงถือว่าผลรวมบนสุดและล่างสุดเป็นศูนย์ นั่นคือ ความเร็วรอบของตัวล้อที่ 2 ไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของเส้นใย

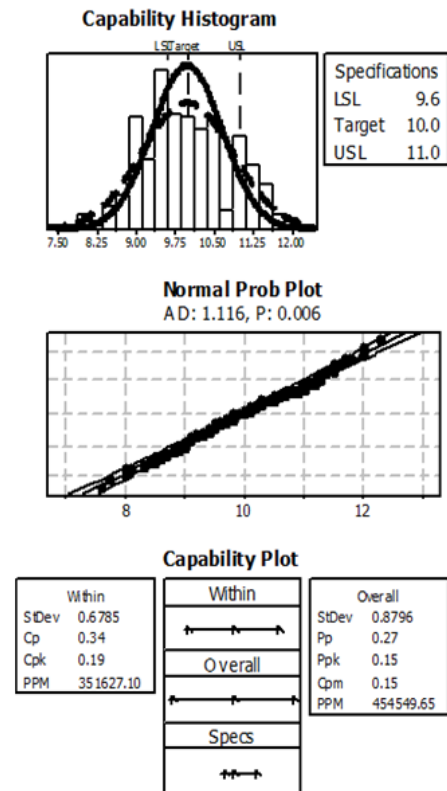
พิจารณาปัจจัย G จะเห็นว่าความเร็วรอบของตัวล้อที่ 3 ที่ใช้ตั้งแต่ 129 m/min ทำให้เส้นใยมีคุณภาพดี ในขณะที่ความเร็วรอบที่ 130 m/min ก็ทำให้เส้นใยมีคุณภาพดี

เช่นกัน จึงถือว่าผลรวมบนสุดและล่างสุดเป็นศูนย์ นั่นคือความเร็วของตู้ล้อยี่ 3 ไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของเส้นใย

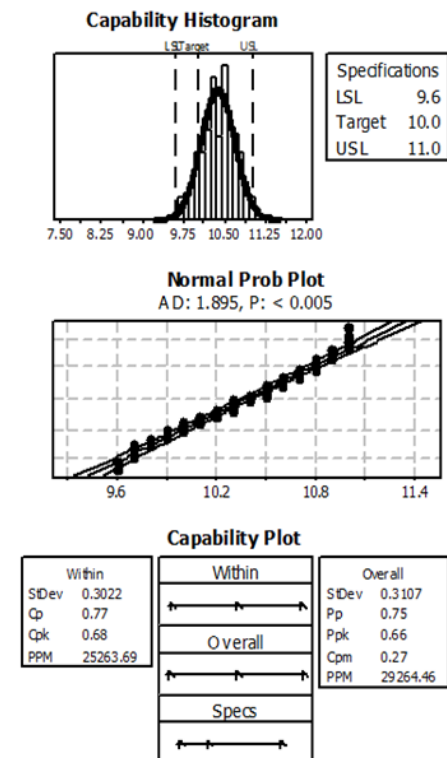
พิจารณาปัจจัย H จะเห็นว่าความเร็วรอบของตู้ล้อยี่ 4 ที่ใช้ตั้งแต่ 118.3-119.5 m/min ทำให้เส้นใยมีคุณภาพไม่ดีซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 6 ชิ้น ในขณะที่ความเร็วรอบที่ใช้ตั้งแต่ 120.3-121.5 m/min ทำให้เส้นใยมีคุณภาพดี ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 5 ชิ้น นั่นคือ ผลรวมบนสุดและล่างสุดมีจำนวน 11 ชิ้น โดยที่มีระดับความเชื่อมั่นมากกว่า 99% ดังนั้น ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหดตัวของเส้นใยมีทั้งหมด 3 ปัจจัย คือ ความดันของเพลาสกรู ความเร็วรอบของเกียร์ปั๊ม และความเร็วของตู้ล้อยี่ 4 หลังจากได้ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหดตัวของเส้นใยแล้ว ค่าความดันของเพลาสกรูจะถูกกำหนดไว้ที่ระดับ 175 bar ความเร็วรอบของเกียร์ปั๊มจะถูกกำหนดไว้ที่ระดับ 881 rpm และความเร็วของตู้ล้อยี่ 4 จะถูกกำหนดไว้ที่ระดับ 120.5 m/min หน่วย ระดับปัจจัยดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการผลิตเส้นใยและทำการศึกษาวัดค่าความหดตัว ผลการศึกษาแสดงในการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

3.3 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการหมายถึงการประเมินความผันแปรของกระบวนการที่เกิดขึ้นจากสาเหตุธรรมชาติเทียบกับข้อกำหนดการประเมินความสามารถของกระบวนการ ซึ่งแบ่งออกเป็นดัชนีของความสามารถด้านศักยภาพของกระบวนการ (process potential capability) และดัชนีของความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการ (process performance capability) [5] รูปที่ 4 แสดงความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุง และหลังการปรับปรุง



(ก) ก่อนปรับปรุง



(ข) หลังปรับปรุง

รูปที่ 4 ความสามารถของกระบวนการก่อนการปรับปรุง และหลังการปรับปรุง

ผลการศึกษาค่าความหดรัดตัวของเส้นใยก่อนปรับปรุง และหลังการปรับปรุงถูกนำมาเปรียบเทียบกันและสามารถสรุปได้ว่าค่า C_p ก่อนการปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 0.34 และหลังปรับปรุงเพิ่มขึ้นเป็น 0.77 ทำให้เพิ่มขึ้นถึง 126.47% ในส่วนของค่า C_{pk} ก่อนการปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 0.19 และหลังปรับปรุงเพิ่มขึ้นเป็น 0.68 ทำให้เพิ่มขึ้นถึง 257.89% และในส่วนของสัดส่วนผลิตภัณฑ์บกพร่อง (PPM) ก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ 351,627.10 และหลังการปรับปรุงอยู่ที่ 25,263.69 ซึ่งลดลงถึง 92.82%

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาปัจจัยและค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหดรัดของเส้นใยชนิดโพลีเอทิลีน โดยใช้กรณีศึกษาโรงงานอุตสาหกรรมทออาวนแห่งหนึ่งในจังหวัดขอนแก่น วิธีการค้นหาผลิตภัณฑ์/กระบวนการที่พัฒนาจากแนวคิดของ Tukey ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นเมื่อได้ปัจจัยและระดับที่เหมาะสมของปัจจัยและนำไปศึกษาว่าค่าความหดรัด และทำการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความหดรัดของเส้นใยก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงพบว่าค่า C_p เพิ่มขึ้นถึง 126.47% ในขณะที่ค่า C_{pk} เพิ่มขึ้นถึง 257.89% ซึ่งสามารถเพิ่มผลผลิตได้ถึง 1,253 กิโลกรัม ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมกรณีศึกษานี้ได้ใช้สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยดังกล่าวในกระบวนการการผลิตเส้นใย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Forbes Thailand November 2014.
- [2] Ali A., Nasef M.M., Takeshi M. and Reza F. "Electrospinning of Nylon-6,6 Solutions into Nanofibers: Rheology and Morphology Relationships," Chinese Journal of Polymer Science Vol. 32, pp. 793–804, 2014.
- [3] W. Teerawanich and N. Thawesaengskulthai "Application of Shainin System in Defect Reduction of Pinholes, Cracked Sides and Cracked Sumps in Toilet Manufacturing," Industrial Engineering Network, pp. 1298-1304, 2555.
- [4] P. Junlabuddee and C. Saikaew "A Study on factor affecting surface roughness in turning

process of AISI 316L stainless steel by Shainin design of experiment method," KKKU Engineering Journal Vol. 42, pp. 71-81, 2015.

- [5] C. Saikaew "Quality Engineering", Faculty of Engineering Press, Khon Kaen University, 2016.
- [6] Bhote, K. R. and Bhote K. A. "World Class Quality", New York., 2000.

การประยุกต์ใช้วัสดุผงสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการตัด เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D2 ด้วยวิธี EDM

Applying of Powder Materials for Improvement Efficiency Machining of AISI D2 Tool Steel by EDM

ปิยะวรรณ สุนาสวน¹ นิวัฒน์ มูเก็ม²

^{1,2}สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

E-mail: notp20@hotmail.com¹ niwat.moo@rmutr.ac.th²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ตรวจสอบผลกระทบของวัสดุผงที่ผสมกับของเหลวไดอิเล็กทริกของการตัดด้วยการจ่ายประจุไฟฟ้าที่มีต่อคุณลักษณะเฉพาะของการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D2 เพื่อศึกษาการเพิ่มผงวัสดุที่แตกต่างกันประกอบด้วย ผงกราไฟต์ โบรอนคาร์ไบด์และเพชร ที่ความเข้มข้น 2, 4, 6, 8, และ 10 กรัมต่อลิตร โดยคุณลักษณะเฉพาะการตัดที่พิจารณา คือ ประสิทธิภาพการตัดและคุณภาพพื้นผิวของชิ้นงาน ผลการทดลองแสดงให้เห็นการเพิ่มผงกราไฟต์และโบรอนคาร์ไบด์มีการนำไฟฟ้าที่ดีแต่การเพิ่มความเข้มข้นของผงเพชรมีการนำไฟฟ้าต่ำเนื่องจากความเป็นฉนวน การผสมผงกราไฟต์และโบรอนคาร์ไบด์จะลดความเป็นฉนวนของของเหลวไดอิเล็กทริกและเพิ่มการสปาร์กกระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน กระบวนการมีความเสถียรสามารถเพิ่มอัตราการตัดเนื้อวัสดุ ลดความหยาบผิวและปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของชิ้นงาน

คำสำคัญ : วัสดุผง เหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D2 การตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้า

Abstract

This research investigates the effect of powder materials mixing into the dielectric fluid of EDM on machining characteristics of AISI D2 tool steel. The additives with different powder materials, including graphite, boron carbide, and diamond powders are studied. The concentration of powders was 2, 4, 6, 8, and 10 g/l. The machining characteristics considered were machining performance and surface quality. Experimental results show that the addition of graphite and boron carbide powders exhibits a good electrical conductivity, but increasing the concentration of diamond powder is lower electrical conductivity due to insulating of the powder. The addition of graphite and boron carbide would reduce the insulating strength of the dielectric fluid and increases the spark reaction between the tool and workpiece. The process becomes more stable, can increase the material removal rate, decrease the surface roughness, and improve the surface quality of the work.

Keywords : Powder Material, AISI D2 Tool Steel, EDM

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนที่มีลักษณะเหมือนกันเป็นจำนวนมาก (Mass production) เช่น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์และเครื่องใช้ไฟฟ้าจำเป็นต้องอาศัยการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ เพื่อให้สามารถขึ้นรูปได้อย่างต่อเนื่องให้อัตราการผลิตสูงและง่ายต่อการควบคุมคุณภาพ [1-3] ดังนั้นแม่พิมพ์จึงเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนสำหรับอุตสาหกรรมเหล่านี้ จึงต้องมีการเลือกกระบวนการผลิตและวัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์ให้เหมาะสม โดยวัสดุที่นำมาใช้ทำแม่พิมพ์จะเป็นวัสดุที่มีสมบัติพิเศษด้านความแข็งแรง ความแข็งแกร่งและด้านทานการสึกหรอได้ดี เช่น เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น AISI D2 มีค่าความแข็ง 60-62 HRC [4-6] ซึ่งยากที่จะนำมาขึ้นรูปโดยกระบวนการตัดด้วยวิธีดั้งเดิม (Conventional machining processes) ดังนั้นจึงต้องใช้กระบวนการตัดเนื้อวัสดุด้วยวิธีใหม่ (Non - Traditional machining processes) มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน เช่น การตัดที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเคมี (Electrochemical machining) การตัดด้วยอัลตราโซนิก (Ultrasonic machining) และกระบวนการตัดด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้า (Electric discharge machining; EDM) วิธีที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนของแม่พิมพ์ คือ EDM เป็นกระบวนการทางความร้อนที่ขึ้นรูปโดยเครื่องมือตัดหรืออิเล็กโทรดไม่สัมผัสกับชิ้นงาน แต่จะตัดโดยการจ่ายประจุทางไฟฟ้า (Discharge) จากอิเล็กโทรดไปยังชิ้นงานผ่านของเหลวไดอิเล็กทริก (Dielectric fluid) ที่มีสมบัติเป็นฉนวน การสูญเสียความเป็นฉนวนของสารไดอิเล็กทริกมีสภาพเป็นไอออนบนพื้นที่เล็กๆที่มีการปล่อยประจุไฟฟ้าจนเกิดการสปาร์กที่มีพลังงานความร้อนสูงมากทำให้ชิ้นงานหลอมละลายหรือกลายเป็นไอ ดังนั้นความแข็งของวัสดุจะไม่มีผลต่อการตัดด้วยวิธีนี้ แต่ข้อจำกัดของ EDM จะตัดได้เฉพาะวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้และกระบวนการมีอัตราการกำจัดเนื้อวัสดุต่ำ การเพิ่มอัตราการตัดโดยการเพิ่มกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์และระยะเวลาในการสปาร์กจะลดคุณภาพผิวสำเร็จ (Surface finish) หลังการตัด [7-9] ดังนั้นกระบวนการตัดที่มี

ประสิทธิภาพจึงต้องให้อัตราการตัดเนื้อวัสดุสูงและมีคุณภาพผิวดีด้วย

ถึงแม้มีการเลือกใช้วัสดุชนิดต่างๆ มาทำอิเล็กโทรดได้แก่ ไทเทเนียม (Titanium) ทังสเตน (Tungsten) แทนทาลัม (Tantalum) กราไฟต์ (Graphite) และไนโอเบียม (Niobium) เพื่อเพิ่มอัตราการตัดเนื้อวัสดุ แต่การสึกหรอของอิเล็กโทรดระหว่างการตัดจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพผิว อัตราการตัดเกินและความเที่ยงตรงที่ควบคุมได้ยาก [10, 11] อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราการกำจัดเนื้อวัสดุจากการเพิ่มกระแสไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าจะไม่เป็นผลดีกับคุณภาพผิว จากวิธีการตัดด้วยอัลตราโซนิกที่ผสมสารขัดถู (Abrasives) สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการ EDM โดยอนุภาคผงของวัสดุสารขัดถูขนาดเล็กที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้จะสามารถลดความเป็นฉนวนของไดอิเล็กทริก จึงทำให้การสปาร์กเกิดขึ้นได้ดีโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มกระแสหรือความต่างศักย์ไฟฟ้า พร้อมทั้งสามารถปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของชิ้นงานหลังการตัดซึ่งนำไปสู่การเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของพื้นผิวหลังการตัดได้ สำหรับตัวอย่างวัสดุผงที่สามารถนำไฟฟ้าได้และนิยมนำมาใช้ได้แก่ ซิลิคอน อลูมิเนียม โครเมียม กราไฟต์ ทองแดงและซิลิคอนคาร์ไบด์ [12-16]

ในงานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้วัสดุผงกราไฟต์ โบรอน คาร์ไบด์และเพชรนำมาผสมในของเหลวไดอิเล็กทริกสำหรับตัดวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D2 ด้วยวิธีการจ่ายประจุไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตัดในกระบวนการ EDM โดยลักษณะเฉพาะของการตัดที่ศึกษา คือ อัตราการตัดเนื้อวัสดุ (Material removal rate; MRR) อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode wear rate; EWR) ความหยาบผิว (Surface roughness; Ra) และพื้นผิวของรอยตัด

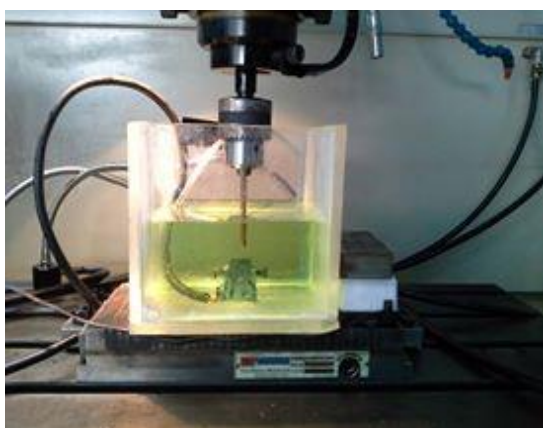
2. วัสดุและวิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้เหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น AISI D2 ขนาด 22 x 22 x 22 มิลลิเมตร เป็นวัสดุชิ้นงาน สำหรับอิเล็กโทรดทำมาจากทองแดงผสมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

6.3 มิลลิเมตร และยาว 99.5 มิลลิเมตร สปาร์กตัดด้วยเครื่อง EDM ยี่ห้อ CHMER EDM รุ่น CMA 64 C ภายใต้ของเหลวไดอิเล็กทริก (Dielectric) สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีความเป็นฉนวน ในการทดลองกำหนดระยะเวลาปล่อยกระแสไฟฟ้า (Pulse-on time; ON) ที่ 8 ไมโครวินาที ระยะเวลาปิดกระแสไฟฟ้า (Pulse-off time; OFF) ที่ 6 ไมโครวินาที และกระแสไฟฟ้าสูงสุดในการสปาร์ก (Pulse-peak current; IP) ที่ 10 แอมแปร์ จากคู่มือการใช้เครื่อง EDM สำหรับตัดเหล็กโดยใช้อิเล็กโทรดทองแดง ส่วนการตั้งขั้วไฟฟ้าจะให้อิเล็กโทรดเป็นบวกและชิ้นงานเป็นลบ เวลาในการสปาร์กตัดกำหนดที่ 30 นาที เท่ากันทุกชิ้น สำหรับผงวัสดุที่เติมลงไปของเหลวไดอิเล็กทริก ได้แก่ กราไฟต์ โบรอนคาร์ไบด์และเพชรมีความเข้มข้นตั้งแต่ 2 - 10 กรัมต่อลิตร แสดงข้อมูลดังตารางที่ 1 ของเหลวไดอิเล็กทริกบรรจุอยู่ในถังอะคริลิกที่มีขนาด 150×150×140 มิลลิเมตร และทำการสปาร์กตัดภายในถังที่สร้างขึ้นมาแสดงดังรูปที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงระดับตัวแปรในการทดลอง

ชนิดของวัสดุผง	ปริมาณความเข้มข้น (กรัมต่อลิตร)				
กราไฟต์	2	4	6	8	10
โบรอนคาร์ไบด์	2	4	6	8	10
เพชร	2	4	6	8	10



รูปที่ 1 การสปาร์กตัดชิ้นงานภายใต้ของเหลวไดอิเล็กทริก

หลังการตัดตรวจสอบอัตราการตัดเนื้อวัสดุ อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ความหนาผิวตลอดจนลักษณะพื้นผิวหลังการตัด โดยการตรวจสอบอัตราการตัดเนื้อวัสดุและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดนำชิ้นงานและ

อิเล็กโทรดมาชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการสปาร์กโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ Zepper รุ่น ES-600HA มีความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง (0.01 กรัม) การวัดความหนาผิวใช้เครื่องวัดยี่ห้อ INSPEX ® รุ่น IPX-103 และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6510LV ใช้ตรวจสอบพื้นผิวหลังการตัด

3. ผลการทดลอง

3.1 อัตราการตัดเนื้อวัสดุ

การตรวจสอบอัตราการตัดเนื้อวัสดุ (MRR) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) – (3)

$$\rho_w = m_1/V_1 \quad (1)$$

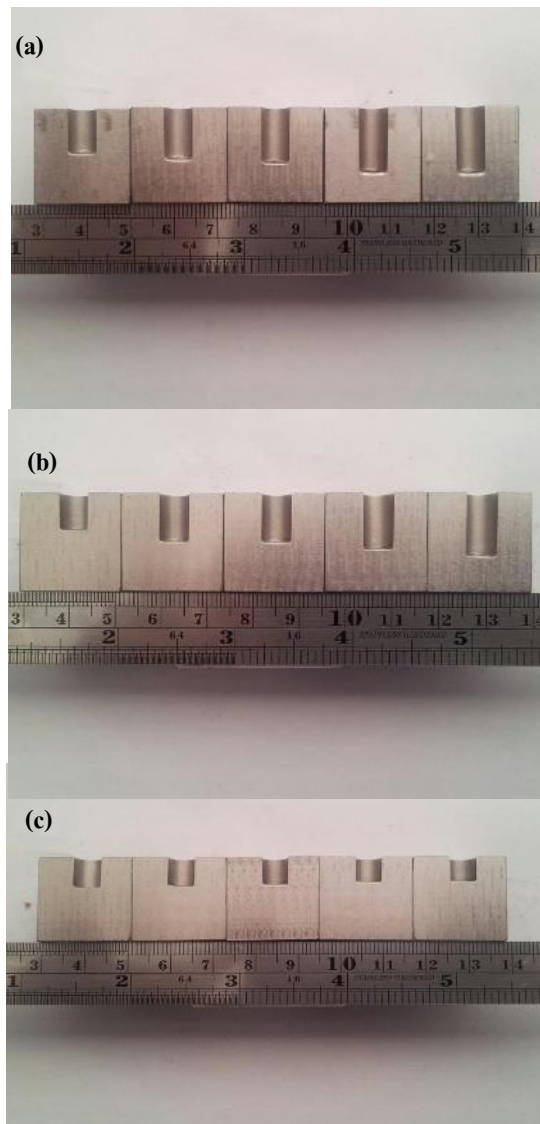
$$V_1 - V_2 = (m_1 - m_2)/\rho_w \quad (2)$$

$$MRR = (m_1 - m_2)/\rho_w/t \quad (3)$$

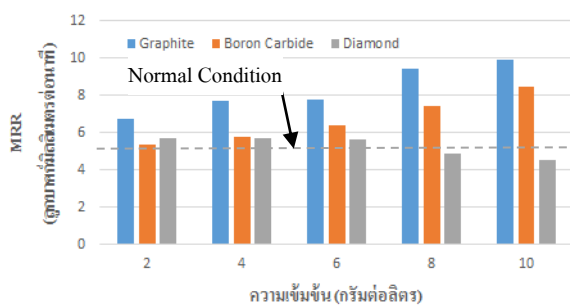
เมื่อ ρ_w คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร) m_1 คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนสปาร์ก (กรัม) m_2 คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังสปาร์ก (กรัม) V_1 คือ ปริมาตรของชิ้นงานก่อน สปาร์ก (กรัม) V_2 คือ ปริมาตรของชิ้นงานหลังสปาร์ก (กรัม) และ t คือ เวลาที่ใช้ในการสปาร์ก (นาที)

การสปาร์กตัดในสภาวะปกติ (Normal Condition) ตามคู่มือการใช้เครื่อง EDM หรือไม่เติมผงวัสดุในของเหลวไดอิเล็กทริกมีอัตราการตัดเนื้อวัสดุเท่ากับ 5.1370 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อเติมผงกราไฟต์ ผงโบรอนคาร์ไบด์ และผงเพชร ในปริมาณที่แตกต่างกันชิ้นงานหลังการตัดแสดงได้ดังรูปที่ 2 จากการเปรียบเทียบ อัตราการตัดเนื้อวัสดุในสภาวะการตัดที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 3 อัตราการตัดเนื้อวัสดุมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกราไฟต์และโบรอนคาร์ไบด์ในของเหลวไดอิเล็กทริก โดยใช้ผงกราไฟต์จะให้อัตราการตัดเนื้อวัสดุมากกว่าโบรอนคาร์ไบด์ แต่สำหรับในสภาวะการตัดด้วยผงเพชรจะมีอัตราการตัดเนื้อวัสดุที่น้อยกว่าการใช้ผงกราไฟต์และโบรอนคาร์ไบด์ ตลอดจนอัตราการตัดเนื้อวัสดุในกรณีผงเพชรมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ถึงแม้เพชร

มีองค์ประกอบพื้นฐานที่เป็นผลึกของคาร์บอนบริสุทธิ์ เหมือนกับกราไฟต์ แต่เพชรมีความเป็นฉนวน ดังนั้น ปริมาณความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นจึงขัดขวางปรากฏการณ์ของการสปาร์คในกระบวนการ EDM



รูปที่ 2 ชิ้นงานที่ผ่านการสปาร์คตัดจากการใช้ (a) ผงกราไฟต์ (b) ผงโบรอนคาร์ไบด์ และ (c) ผงเพชร



รูปที่ 3 อัตราการตัดเนื้อวัสดุ

3.2 อัตราการสึกหรออิเล็กโทรด

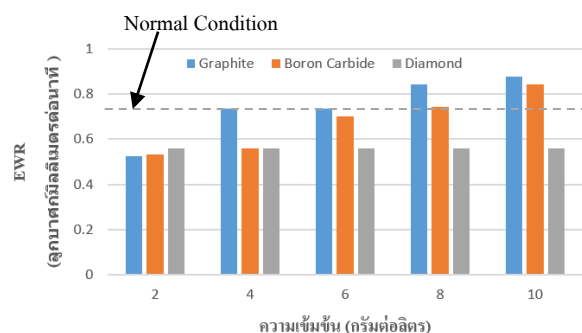
อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) สามารถใช้สมการที่ (1)-(3) นำมาคำนวณโดยใช้ข้อมูลของอิเล็กโทรด ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของสมการที่ 4

$$EWR = (m_1 - m_2) / \rho_e / t \quad (4)$$

เมื่อ ρ_e คือ ความหนาแน่นของอิเล็กโทรด (กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิเมตร) m_1 คือ น้ำหนักของอิเล็กโทรดก่อนสปาร์ค (กรัม) m_2 คือ น้ำหนักของอิเล็กโทรดหลังสปาร์ค (กรัม)

การสึกหรอของอิเล็กโทรดจากการตัดในสถานะไม่เต็ม พลังวัสดุมีอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดเท่ากับ 0.7368 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่ออนาที่ การเติมผงกราไฟต์และโบรอนคาร์ไบด์มีผลต่ออัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด โดยการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของผงในของเหลวทำให้การสึกหรอของอิเล็กโทรดเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ผลการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 5 ขณะที่ความเข้มข้น 2 กรัมต่อลิตร การสึกหรอของอิเล็กโทรดจากการใช้ผงเพชรมีปริมาณมากที่สุดรองลงมาคือ โบรอนคาร์ไบด์และกราไฟต์ ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นเป็น 4-10 กรัมต่อลิตร จะให้ผลที่ตรงกันข้ามคือ อิเล็กโทรดเกิดการสึกหรอมากจากการใช้กราไฟต์ โบรอนคาร์ไบด์และเพชร ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นช่วยให้เกิดการสปาร์คได้ง่าย และการช่วยลดความเป็นฉนวนของไดอิเล็กทริก จากการใช้ผงวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าจะช่วยลดช่องว่างเส้นทางการสปาร์ค (Discharge gap) เมื่อศักย์ไฟฟ้าเกิดการข้ามอิเล็กโทรดไปยังชิ้นงาน พลังงานที่เกิดขึ้นมีลักษณะไม่เป็นระเบียบตามการกระจายของอนุภาค เมื่อกระแสไฟฟ้าในการสปาร์ค (Discharge current) เพิ่มขึ้น พลังงานพัลส์ (Pulse energy) จะเพิ่มขึ้นทำให้เกิดพลังงานความร้อนสูงที่ระหว่างชิ้นงานและอิเล็กโทรดนำไปสู่การหลอมละลาย

ของอิเล็กโทรดและชิ้นงานซึ่งเป็นสาเหตุให้อิเล็กโทรดสึกหรอระหว่างการตัด [17]



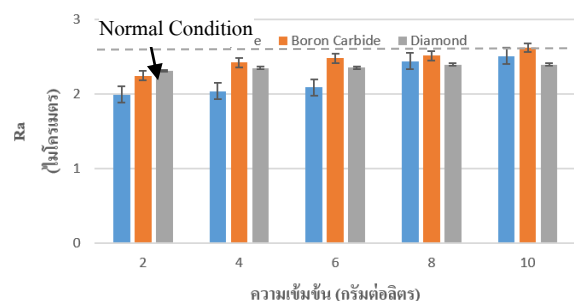
รูปที่ 4 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

3.3 ความหยาบผิว

โดยทั่วไปรูปแบบสมการความหยาบผิวในทอมความหยาบผิวเฉลี่ยเชิงตัวเลข (Arithmetic mean roughness; R_a) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (5) ซึ่งผลจากการสปาร์กโดยไม่มีการเติมผงวัสดุชิ้นงานตัวอย่างมีค่าความหยาบผิวเท่ากับ 2.6700 ไมโครเมตร เส้นประแสดงความหยาบผิวในสภาวะปกติเมื่อเปรียบเทียบกับความหยาบผิวของชิ้นงานจากการเติมผงวัสดุทั้ง 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 5

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L \{h(x)dx\} \quad (5)$$

เมื่อ $h(x)$ คือ ค่า Roughness Profile และ L คือ ช่วงของการวัด



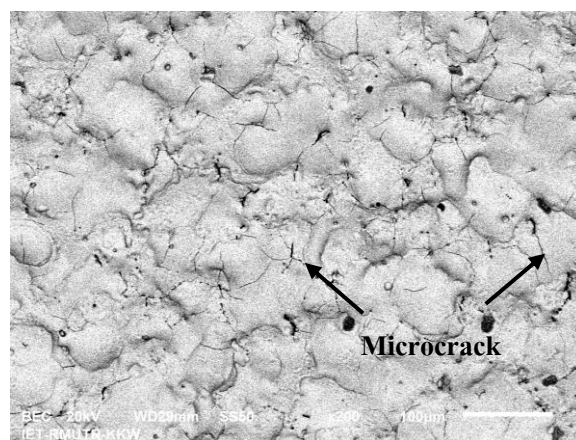
รูปที่ 5 ค่าความหยาบผิว

การเติมผงวัสดุลงในของเหลวไดอิเล็กทริกในทุกสภาวะการทดลองจะทำให้มีคุณภาพผิวที่ดีกว่าการตัดโดยไม่เติมผงวัสดุ สำหรับชิ้นงานที่ตัดด้วยการเติมกราไฟต์จะให้คุณภาพผิวที่ดีกว่าไบรอนคาร์ไบด์ แต่สำหรับกรณี

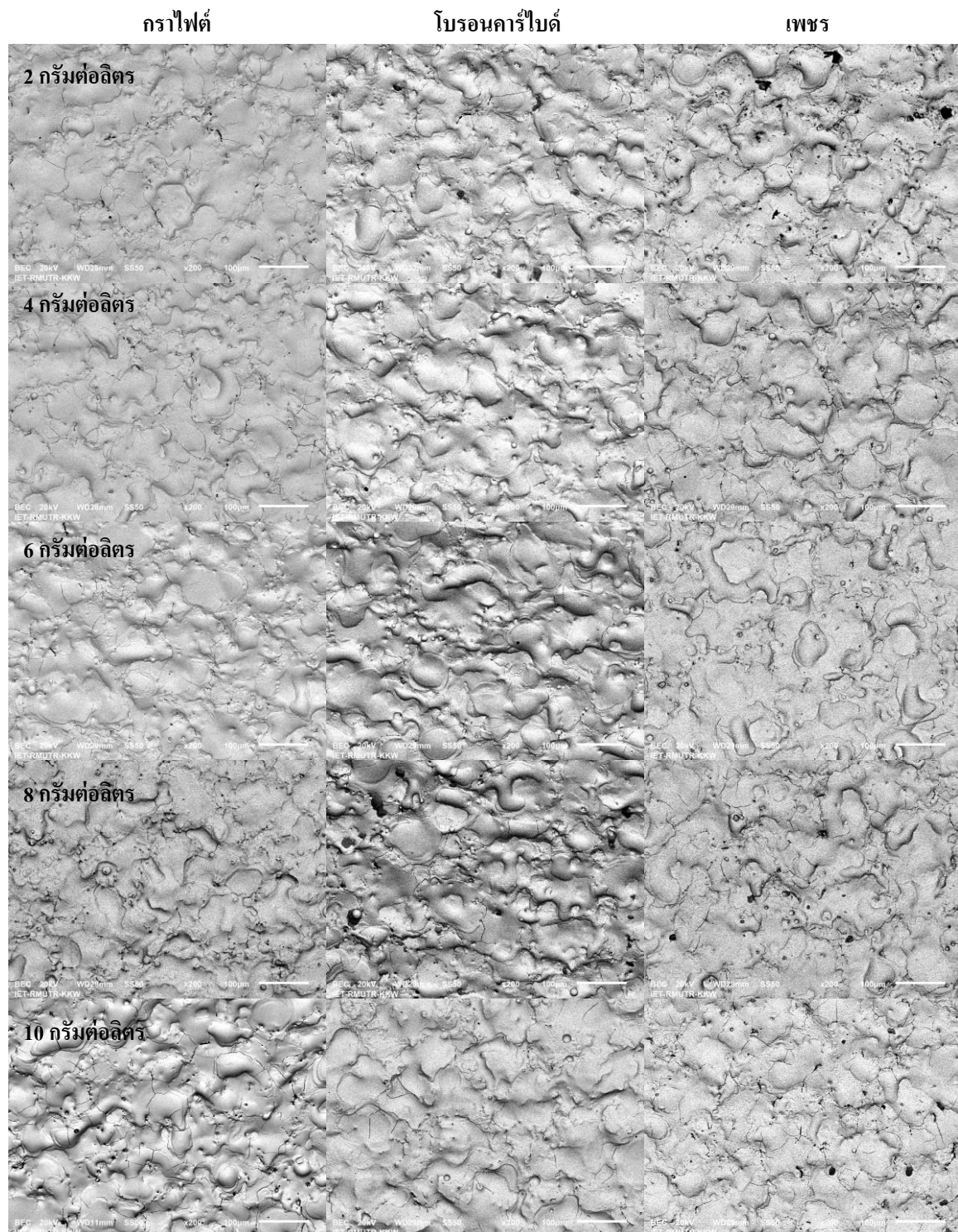
การใช้ผงเพชรความหยาบผิวมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2.310 – 2.393 ไมโครเมตร

3.4 พื้นผิวหลังการตัด

การเกิดความร้อนจากการสปาร์กจนเกิดการหลอมละลายหรือกลายเป็นไอและเกิดการหลุดออกของเนื้อวัสดุอิทธิพลของความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการถึงแม้มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากการกลับสู่ความเป็นฉนวนของไดอิเล็กทริกก็ตาม ผลกระทบจากความร้อนจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคได้ และเกิดบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน ชั้นหลอมเหลวใหม่ (Recast layer) ที่เกิดจากการหลอมละลายและเย็นตัวอย่างรวดเร็วซึ่งเคลือบอยู่บนพื้นผิว ชั้นดังกล่าวมีความหนาเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มพลังงานการสปาร์กและสามารถเกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Microcrack) เนื่องจากความเค้นตกค้างจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของส่วนที่ถูกหลอมละลาย [18, 19] พื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการสปาร์กตัดในกรณีไม่เติมผงวัสดุในของเหลวไดอิเล็กทริกแสดงดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7 แสดงพื้นผิวจากการตัดกรณีผสมผงวัสดุในของเหลวไดอิเล็กทริกที่ความเข้มข้นต่างๆ รอยแตกขนาดเล็กที่ปรากฏบนพื้นผิวบริเวณหลอมเหลวนำไปสู่การลดความต้านทานการกัดกร่อน ลดสมบัติทางกล อย่างไรก็ตามการเพิ่มกระแสไฟฟ้าและความเข้มข้นของผงวัสดุในของเหลวไดอิเล็กทริกความหนาของชั้นหลอมเหลวมีขนาดเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน [20] ซึ่งในบทความแสดงไว้เฉพาะพื้นผิวหลังการตัด (ด้านบนชั้นหลอมเหลว) เท่านั้น ผลปรากฏรอยแตกขนาดเล็กเกิดขึ้นทั่วพื้นผิวหลังการตัด



รูปที่ 6 พื้นผิวชิ้นงานหลังการสปาร์กในสภาวะไม่ผสมผงวัสดุในของเหลวไดอิเล็กทริก



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลังการสปาร์คในสภาวะที่แตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามสมบัติของผงวัสดุ ตัวอย่างเช่น ความเข้มข้น ขนาดอนุภาค ความหนาแน่น ความต้านทานทางไฟฟ้าและการนำความร้อนเป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้มีผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญกับประสิทธิภาพการตัด (Machining performance) การผสมผงวัสดุในของเหลวไดอิเล็กทริก เช่น กราไฟต์ในของเหลวไดอิเล็กทริก

อนุภาคผงวัสดุที่อยู่บริเวณช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงานระหว่างการตัดนำไปสู่การสปาร์คจากการลดความเป็นฉนวน โดยการเพิ่มช่องทางการสปาร์คระหว่างอิเล็กโทรดและชิ้นงาน ทำให้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการตัด เช่น ลดความหยาบผิว ขนาดชิ้นหลอมเหลวใหม่และเพิ่มอัตราการตัดเนื้อวัสดุได้ [21]

ตลอดจนการกัดฟันของเหลวไดอิเล็กทริกในกระบวนการ EDM สามารถส่งผลต่อคุณลักษณะต่างๆจากการตัดได้ เช่น การกัดฟันของเหลวด้วยความดันน้อยๆจะทำให้เกิดการสะสมของเศษที่หลุดออกมาที่ระหว่างช่องว่างของอิเล็กโทรดและชิ้นงานทำให้เกิดการสปาร์คแบบลัดวงจร (Short circuits) [22] ถึงแม้ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ของเหลวในถังหมวนและมีการกัดฟันเพื่อให้ผงวัสดุมีการกระจายตัวทั่วถึงตำแหน่งที่ตัดก็ตาม แต่การตัดด้วยการใช้อิเล็กโทรดทรงกระบอกซึ่งทำให้เกิดรูสึกในชิ้นงานซึ่งเป็นข้อจำกัดในการกระจายตัวของผงวัสดุได้เช่นกันเมื่อความลึกจากการตัดเพิ่มขึ้น

4. สรุป

บทความฉบับนี้ประยุกต์ใช้วัสดุผงสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D2 ด้วยวิธี EDM ซึ่งแสดงให้เห็นประสิทธิภาพการตัดจากการใช้ผงกราไฟต์และโบรอนคาร์ไบด์ผสมในของเหลวไดอิเล็กทริกทำให้อัตราการตัดเนื้อวัสดุและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณผงวัสดุในของเหลว แต่การใช้ผงเพชรอัตราการตัดเนื้อวัสดุลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงวัสดุเนื่องจากความเป็นฉนวนของผงเพชรแต่กระบวนการจะให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่มีแนวโน้มคงที่ และการผสมผงวัสดุในของเหลวไดอิเล็กทริกทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพพื้นผิวที่ดีกว่าการตัดในสภาวะปกติ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนตามสัญญา เลขที่ A49/2558

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. R. Morrow, H. Qi, I. Kim, J. Mazumder, and S. J. Skerlos, "Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing," *Journal of Cleaner Production* 15, pp. 932–943, 2007.
- [2] D. Tang, W. Eversheim, and G. Schuh, "A new generation of cooperative development paradigm in the tool and die making branch: strategy and technology," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 20, pp. 301–311, 2004.
- [3] H. W. Wagener, "New developments in sheet metal forming: sheet materials, tools and machinery," *Journal of Materials Processing Technology* 72, pp. 342–357, 1997.
- [4] O.N. Cora, A. Agcayazi, K. Namiki, H. Sofuoglu, and M. Koc, "Die wear in stamping of advanced high strength steels – Investigations on the effects of substrate material and hard-coatings," *Tribology International* 52, pp. 50–60, 2012.
- [5] H. Yan, J. Hua, and R. Shivpuri, "Flow stress of AISI H13 die steel in hard machining," *Materials and Design* 28, pp. 272–277, 2007.
- [6] H. Coldwell, R. Woods, and M. Paul, "Rapid machining of hardened AISI H13 and D2 moulds, dies and press tools," *Journal of Materials Processing Technology* 135, pp. 301–311, 2003.
- [7] K. Kanlayasiri, and S. Boonmung, "Effects of wire-EDM machining variables on surface roughness of newly developed DC 53 die steel: Design of experiments and regression model," *Journal of Materials Processing Technology* 129–193, pp. 459–464, 2007.
- [8] M. Kiyak, and O. Cakir, "Examination of machining parameters on surface roughness in EDM of tool steel," *Journal of Materials Processing Technology* 191, pp. 141–144, 2007.
- [9] K. A. Hascaly, and U. Caydas, "Experimental study of wire electrical discharge machining of AISI D5 tool steel," *Journal of Materials Processing Technology* 148, pp. 362–367, 2004.
- [10] K. K. Dadsena, S. Sivasankar, and C.R. Jeyapaul, "A Study on Electrical Discharge Machining of

- ZrB₂-SiC Composite using Grey Entropy,” IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS, pp. 1-6, 2013.
- [11] H. Zarepour, A.F. Tehrani, D. Karimi, and S. Amini, “Statistical analysis on electrode wear in EDM of tool steel DIN 1.2714 used in forging dies,” *Journal of Materials Processing Technology* 187–188, pp. 711–714, 2007.
- [12] Y. Zhang, Y. Liu, Y. Shen, R. Ji, B. Cai, H. Li, and F. Wang. “A Review of the Current Understanding and Technology of Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM),” *Mechatronics and Automation (ICMA)* 5-8, pp. 2240-2247, 2012.
- [13] N. M. Abbas, D. G. Solomon, and M. F. “A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, pp. 1214–1228, 2007.
- [14] H. K. Kansal, S. Singh, and P. Kumar, “Technology and research developments in powder mixed electric discharge machining (PMEDM),” *Journal of Materials Processing Technology* 184, pp. 32–41, 2007.
- [15] H. K. Kansal, S. Singh, and P. Kumer, “Effect of Silicon Powder Mixed EDM on Machining Rate of AISI D2 Die Steel,” *Journal of Manufacturing Processes* 9, pp. 13-22, 2007.
- [16] K. L.Wu, B. H. Yan, F. Y. Huang, and S. C. Chen, “Improvement of surface finish on SKD steel using electro-discharge machining with aluminum and surfactant added dielectric,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, pp. 1195–1201, 2005.
- [17] M. Kolli, and A. Kumar, “Effect of dielectric fluid with surfactant and graphite powder on electrical discharge machining of titanium alloy using taguchi method”. *Engineering Science and Technology, an International journal* 18, pp. 524–535, 2015.
- [18] F. Klocke, S. Schneider, L. Ehle, H. Meyer, L. Hensgen, A. Klink, “Investigations on Surface Integrity of Heat Treated 42CrMo4 (AISI 4140) Processed by Sinking EDM,” *Procedia CIRP* 42, pp. 580 – 585. 2016.
- [19] J. F. Liu, L. Li, Y. B. Guo, “Surface integrity evolution from main cut to finish trim cut in W-EDM of shape memory alloy,” *Procedia CIRP* 13, pp. 137 – 142, 2014.
- [20] C. Sung-Long, L. Ming-Hong, H. Guo-Xin, and W. Chia-Ching, “Research of the recast layer on implant surface modified by micro-current electrical discharge machining using deionized water mixed with titanium powder as dielectric solvent,” *Applied Surface Science* 311, pp. 47–53. 2014.
- [21] K. Murahari, and K. Adepu, “Effect of dielectric fluid with surfactant and graphite powder on Electrical Discharge Machining of titanium alloy using Taguchi method,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, pp. 1–12, 2015.
- [22] G. Alexander, and K. Philip, “Real-time evaluation of gap flushing in electrical discharge machining,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64, pp. 241–244, 2015.

การจัดทำระบบการบำรุงรักษาเครื่องจักรด้วยเทคนิค FMEA

กรณีศึกษา กระบวนการแปรรูปเนื้อสัตว์ตัวอย่าง

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) for a Maintenance System Development:

A Case Study of Meat Processing

วราธร ปัญญางาม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Punyangarm@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ประยุกต์แนวคิดการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effects Analysis : FMEA) ซึ่งเป็นเครื่องมือในการจัดการความเสี่ยง มาใช้ในการวางระบบการบำรุงรักษาเครื่องจักร โดยแนวคิดดังกล่าวถูกนำมาใช้กับเครื่องจักรที่แตกต่างกัน 14 เครื่องของกระบวนการแปรรูปเนื้อสัตว์ในโรงงานตัวอย่าง เพื่อให้ระบบการบำรุงรักษาเครื่องจักรมีความสอดคล้องกับสภาพการทำงานจริง บทความนี้จึงได้ปรับนิยามและระดับการประเมินค่าความรุนแรง (Severity: S) โอกาส (Occurrence : O) และการตรวจจับ (Detect : D) ให้สอดคล้องกับสภาพการผลิตจริง ภายใต้แนวคิดความสูญเสียหลัก 6 ประการ (Six Major Losses) ซึ่งภายหลังจากการนำ FMEA เข้ามาใช้ประเมินความเสี่ยง พบว่า สามารถสร้างระบบการบำรุงรักษาที่ไม่มีความเสี่ยงในระดับสูง (High Risk) และลดความเสี่ยงในระดับปานกลาง (Medium Risk) ได้

คำสำคัญ : ระบบการบำรุงรักษาเครื่องจักร การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ กระบวนการแปรรูปเนื้อสัตว์

Abstract

This paper proposed the concept of the Failure mode and effects analysis (FMEA) in the context of risk management to develop maintenance system. There are fourteen different machine of meat processing which are focused. The definition and level of Severity (S) Occurrence (O) and Detect (D) are revised to link with the Six major losses and the real operation management of a case study. After implement new maintenance system, there are not only number of high risk causes of machine losses which was treat to be zero, but also number of medium risk can be decreased.

Keywords : Machine Maintenance System, Failure Mode and Effects Analysis, Meat Processing

1. บทนำ

โดยพื้นฐาน เป้าหมายของการผลิตใดๆ จะเกี่ยวพันโดยตรงกับการผลิตให้มีคุณภาพที่ตอบสนองความพึงพอใจของลูกค้า การส่งมอบครบให้ถ้วนในเวลาที่ถูกลูกค้าต้องการ ภายใต้ต้นทุนที่เหมาะสม ซึ่งการผลิตที่จะสามารถตอบสนองเป้าหมายดังกล่าวได้ ย่อมต้องมีการจัดการปัจจัยป้อนเข้า ซึ่งประกอบด้วย คน เครื่องจักร วัตถุดิบ และวิธีการ ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด แต่อย่างไรก็ตาม การจัดการปัจจัยป้อนเข้าเพื่อตอบสนองเป้าหมายด้านการผลิตอาจเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก หากการผลิตนั้นๆ ไม่มีการเก็บข้อมูลในอดีตที่บ่งชี้ความผิดปกติของปัจจัยการผลิตที่ส่งผลให้การผลิตไม่เป็นไปตามเป้าหมาย ดังนั้นบทความนี้จึงเสนอขั้นตอนการสร้างระบบการจัดการปัจจัยป้อนเข้าในกรณีที่มีขาดข้อมูลและสารสนเทศด้านการผลิตที่สำคัญ โดยอาศัยกระบวนการแปรรูปเนื้อสัตว์ในโรงงานตัวอย่างเป็นกรณีศึกษา

โรงงานตัวอย่างเป็นโรงงานผลิตอาหารสำเร็จรูปที่เติบโตจากธุรกิจครอบครัวที่มีประวัติยาวนานกว่า 40 ปี และถูกจัดอยู่ในกลุ่มวิสาหกิจขนาดกลางและเล็ก (Small and Medium Enterprises : SMEs) โดยในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ผู้ประกอบการได้ทะยอยลงทุนนำเข้าเครื่องจักรจากต่างประเทศ (Capital Intensive) จำนวนมากเข้ามาใช้ในการผลิตทดแทนการผลิตที่ใช้แรงงานเป็นหลัก (Labor Intensive) แต่ก็ยังสามารถรักษานวัตกรรมหลักที่มีความรู้และประสบการณ์ทั้งด้านการผลิตแบบเดิมและคุณลักษณะของสินค้าไว้ได้ อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีการผลิตจากใช้แรงงานไปสู่การใช้เครื่องจักรที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลให้แรงงานทางตรง (Direct Labor) ถูกเปลี่ยนจากการใช้แรงงานผลิตสินค้าไปสู่การใช้ความรู้เพื่อควบคุมเทคโนโลยีการผลิตสินค้า (Machine Based Production) ที่มีต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) ในการผลิตที่สูงกว่าเดิม ดังนั้นเวลาที่สูญเสียไปจากการหยุดชะงักในกระบวนการจึงมีต้นทุนสูง นอกจากนี้ การใช้เครื่องจักรที่มีความเร็วมักมากกว่าแรงงานยังเป็นอีกสาเหตุของการเกิดของเสียใน

อัตราส่วนที่มากกว่าเดิม เช่น การตั้งค่าเครื่องผลิต การหยุดความเสียหายของสินค้าไม่ทันเวลา หรือกลไกการทำงานของเครื่องจักรไม่สมบูรณ์ส่งผลต่อของเสีย เป็นต้น ดังนั้นระบบการบำรุงรักษาเครื่องจักร (Machine Maintenance System) ที่นำเสนอในบทความนี้ จึงเป็นระบบที่ออกแบบโดยคำนึงถึงผลกระทบ (Effect) ทั้งด้านเวลาที่สูญเสียไปจากการหยุดของเครื่องจักร (Major and Minor Stopping) และทั้งด้านคุณภาพ (Quality) ของสินค้า

2. การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ

(Failure Mode and Effects Analysis : FMEA)

เทคนิค FMEA ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับงานด้านอากาศยานและการทหารช่วงปี 1950s โดยในช่วงแรกใช้ชื่อว่า Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA) ต่อมาช่วงปี 1960s ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานด้านวิศวกรรมความน่าเชื่อถือ [1] เทคนิค FMEA เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ความเสี่ยงทางวิศวกรรมที่พยายามระบุข้อบกพร่องที่เป็นไปได้และคาดการณ์ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากข้อบกพร่องนั้น ซึ่งการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้วยเทคนิค FMEA จะจัดลำดับความเสี่ยงของลักษณะข้อบกพร่องที่สำคัญ (Potential Failure Mode) ภายใต้อะเนนความเสี่ยง (Risk Priority Number) ที่ได้จากการประเมิน 3 เกณฑ์ คือ ความรุนแรง (Severity : S) โอกาส (Occurrence : O) และความสามารถในการตรวจจับ (Detect : D) [1, 2] และด้วยการประเมินความเสี่ยงที่หลากหลายมอง มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน รวมถึงสามารถดำเนินการได้ทั้งด้วยการประเมินโดยอาศัยกลุ่มย่อย (Small Group) หรือการประเมินโดยผู้ออกแบบหรือผู้วิเคราะห์เอง (Individual) ทำให้เทคนิค FMEA ถูกพัฒนาและนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินความเสี่ยงของลักษณะความบกพร่องในด้านต่างๆ ทั้งด้านการออกแบบ ด้านกระบวนการ ด้านการจัดการคุณภาพ ในหลายกลุ่มธุรกิจ อาทิ กลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์ ธุรกิจด้านสุขภาพ ธุรกิจพลังงาน อวกาศยาน อุตสาหกรรมอาหาร ธุรกิจธนาคาร เป็นต้น [3, 4, 5]

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1. ศึกษาหน้าที่ของเครื่องจักร

การวิจัยนี้ได้ดำเนินการที่ห้องแปรรูปเนื้อสัตว์ (Meat Processing Room) ในโรงงานตัวอย่าง ซึ่งทำหน้าที่เตรียม ตกแต่ง และผสมวัตถุดิบตามสูตรผสม ภายใต้เวลาและ อุณหภูมิที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน เพื่อส่งไปกระบวนการ ถัดไป โดยมีเครื่องจักรทั้งหมด 19 เครื่อง 5 กลุ่ม ได้แก่

(1) กลุ่มเครื่องฉีกเนื้อสัตว์ ทำหน้าที่ฉีกเนื้อสัตว์เข้า ในเนื้อสัตว์กลุ่มขาหมูและเบคอน เพื่อปรับรสชาติและเพิ่ม อายุจัดเก็บเนื้อสัตว์ โดยมีเครื่องจักรในกลุ่มนี้ 3 เครื่อง

(2) กลุ่มเครื่องนวดผสม ทำหน้าที่นวดเนื้อสัตว์ให้ ผสมเข้ากับน้ำปรุงรส โดยจะแตกต่างกันไปตามขนาดถึง บรรจุขณะนวด คือ ขนาดจุ 130 กิโลกรัม จำนวน 2 เครื่อง และขนาดจุ 150, 300 และ 600 กิโลกรัม ขนาดละ 1 เครื่อง

(3) กลุ่มกระแทบผสม ทำหน้าที่สับเนื้อและไขมัน สัตว์ให้ละเอียดพร้อมผสมคลุกเคล้าผงบเครื่องปรุงลงใน เนื้อสัตว์ โดยมีกระแทบผสม 2 ขนาด คือ เครื่องสับผสม ขนาดความจุกระแทบ 80 และ 180 กิโลกรัม

(4) กลุ่มเครื่องอัดไส้กรอก ทำหน้าที่อัดเนื้อสัตว์ที่ ผ่านการสับผสมลงในไส้ก่อนนำไปสู่ขั้นตอนทำสุกอื่นๆ โดยเครื่องอัดไส้กรอกมีทั้งหมด 4 เครื่อง แบ่งเป็นเครื่อง อัดไส้กรอกระบบอัตโนมัติขนาดใหญ่ 1 เครื่อง และเครื่อง อัดไส้กรอกกึ่งอัตโนมัติ 3 เครื่อง

(5) กลุ่มเครื่องจักรรอง (Minor Machine) จำนวน 5 เครื่อง เป็นเครื่องจักรที่ไม่ถูกใช้ในการผลิตทุกวัน จึงไม่ เลือกมานำเสนอในบทความนี้

3.2. เกณฑ์การประเมินความเสี่ยงของการเสียหายของ เครื่องจักร

ระบบการบำรุงรักษาเครื่องจักร 4 กลุ่มในห้องแปรรูป เนื้อสัตว์ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.1 จะถูกสร้างขึ้นโดย อ้างอิงจากความเสี่ยงของการเสียหายของเครื่องจักรตาม คะแนน RPN ที่ได้จากการประเมินความเสี่ยงด้วยเทคนิค FMEA โดยในขั้นตอนนี้จะกำหนดเกณฑ์การประเมิน ความเสี่ยงให้สอดคล้องกับลักษณะการผลิตที่จะนำมาใช้

เป็นมาตรฐานการประเมินค่า S O และ D สำหรับทุกๆ เครื่องจักร โดยในที่นี้ได้กำหนดนิยามในแต่ละเกณฑ์ ดังนี้

3.2.1. ความรุนแรง (S) ประเมินจากผลกระทบ (Effect) ของการเสียหายของระบบย่อย (Sub-System) ของ เครื่องจักรที่มีต่อลักษณะความเสียหายหลักที่เป็นไปได้ โดยอาศัยพื้นฐานแนวคิดจากความสูญเสียหลักจากการใช้ เครื่องจักร 6 ประการ (Six Major Losses) มาแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ (ก) ลักษณะความเสียหายที่ส่งผลต่อการหยุดของ เครื่องจักรที่มีระดับความรุนแรงเปลี่ยนไปตามเวลาในการ หยุดแก้ไข หรือ (ข) ลักษณะความเสียหายที่ส่งผลต่อ ปริมาณของเสียจากการผลิต โดยมีนิยามคะแนนความ รุนแรง แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงนิยามคะแนนความรุนแรง

คะแนน	ผลกระทบจากลักษณะความเสียหาย	
5	(ก)	หยุดซ่อมแซมเครื่องมากกว่า 1 วัน หรือ
	(ข)	เกิดของเสียที่ต้องทิ้งจำนวนมาก
4	(ก)	เครื่องจักรทำหน้าที่หลักไม่สมบูรณ์ หรือ
	(ข)	หยุดซ่อมแซมเครื่อง 1 ชม. ถึง 1 วัน หรือ
3	(ก)	การหยุดชะงักของเครื่องจักรที่ต้องหยุด
	(ข)	ซ่อมแซมตั้งแต่ 10 นาที ถึง 1 ชม. หรือ
2	(ก)	เกิดการดำเนินงานที่ไม่สะดวก หรือ
	(ข)	การหยุดที่แก้ไขไม่เกิน 10 นาที หรือ
1	(ก)	เกิดของเสียที่แก้ไขได้ง่ายเล็กน้อย
	(ข)	เกิดของเสียที่แก้ไขได้ง่ายเล็กน้อย
1	--- ไม่มีผลกระทบใดๆ ---	

3.2.2. โอกาส (Occurrence : O) ที่ได้มาจากประมาณ โอกาสเกิดเหตุการณ์ที่เป็นสาเหตุ (Causes) ของลักษณะ ความเสียหาย โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ (ก) โอกาสเกิด ความเสียหายที่มีสาเหตุมาจากสภาพชิ้นส่วนของระบบ ย่อย หรือ (ข) โอกาสเกิดความเสียหายที่มีสาเหตุเกี่ยวพัน กับวิธีการทำงาน แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงนิยามคะแนนโอกาส

คะแนน	ผลกระทบจากลักษณะความเสียหาย
5	(ก) ชิ้นส่วนเสื่อมสภาพใกล้สูญเสียเงื่อนไขที่จำเป็น หรือ ใช้งานเกินอายุการใช้งาน
	(ข) กิจกรรมยุ่งยากที่มากกว่า 5 ครั้ง/วัน
4	(ก) ชิ้นส่วนเหลือเฉพาะเงื่อนไขจำเป็น หรือ ใช้งาน 80-100% ของอายุการใช้งาน
	(ข) กิจกรรมยุ่งยากที่ทำ 2 – 4 ครั้ง/วัน
3	(ก) ชิ้นส่วนมีฟังก์ชันการทำงานครบ แต่มีร่องรอยการเสื่อมสภาพที่เห็นได้ชัด หรือ ใช้งานมา 60-80% ของอายุการใช้งาน
	(ข) กิจกรรมยุ่งยากที่ทำวันละครั้ง
2	(ก) ชิ้นส่วนมีฟังก์ชันการทำงานครบ แต่มีร่องรอยการเสื่อมสภาพเล็กน้อย หรือ ใช้งานไม่เกิน 60% ของอายุการใช้งาน
	(ข) กิจกรรมยุ่งยากที่ทำ 2 – 3 ครั้ง/สัปดาห์
1	(ก) ชิ้นส่วนมีสภาพสมบูรณ์
	(ข) มีกลไกป้องกันความผิดพลาด

ตารางที่ 3 แสดงนิยามคะแนนการตรวจจับ

คะแนน	ความสามารถในการตรวจจับ/แก้ไขความผิดปกติที่เกิดขึ้น
5	ตรวจพบความผิดปกติเมื่อเกิดความเสียหาย
4	ตรวจพบความผิดปกติจากการตรวจตามแผนการตรวจสอบโดยหน่วยงานที่ไม่ใช่ฝ่ายผลิต
3	ตรวจจับความผิดปกติตามระดับ 4 และตรวจจับความผิดปกติโดยหัวหน้าสายการผลิต
2	ตรวจจับความผิดปกติตามระดับ 3 และตรวจจับความผิดปกติโดยพนักงานประจำเครื่อง
1	ออกแบบให้ควบคุมความผิดปกติได้ด้วยการมองหรือติดตั้งสัญญาณเตือนความผิดปกติ

3.2.3. ความสามารถในการตรวจจับ (Detect : D) ที่ได้
จากความสามารถในการตรวจจับความผิดปกติ และ/หรือ

ในการแก้ไขเมื่อพบความผิดปกติของหน่วยงานที่มีความเกี่ยวข้อง แสดงดังตารางที่ 3

3.3. ขั้นตอนการประเมินคะแนน RPN

ภายใต้แนวคิดที่ว่า กลไกการทำงานของเครื่องจักรเป็นการทำงานร่วมกันของระบบย่อย (Sub-system) ซึ่งทำหน้าที่สัมพันธ์กันตามที่ได้ออกแบบเครื่องจักรตั้งแต่แรก ดังนั้นเมื่อระบบย่อยของเครื่องจักรมีความผิดปกติย่อมส่งผลให้เครื่องจักรเสียหายหรือด้อยประสิทธิภาพลงไป ดังนั้นในการประเมินคะแนน RPN จึงพิจารณาจากสภาพกลไกการทำงานของระบบย่อยและปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อความผิดปกติของระบบย่อย โดยมีขั้นตอนการประเมินคะแนน RPN ดังนี้

3.3.1. การวิเคราะห์เพื่อแยกเครื่องจักรเป็นระบบย่อยและระบุหน้าที่ของระบบย่อย เช่น การทำงานของเครื่องนวดผสมเริ่มตั้งแต่การใส่เนื้อสัตว์และน้ำปรุงรสลงในถังเมื่อป้อนคำสั่งที่จอบควบคุมตามชนิดของผลิตภัณฑ์ ชุดเปิด/ปิดฝาถังจะทำการปิดฝาให้สนิท จากนั้นชุดปรับระดับองศาจะหมุนยกถังให้ตั้งขึ้น เมื่อได้ระดับองศาที่กำหนดระบบสูญญากาศและระบบความเย็นจะทำงานเพื่อสร้างสถานะที่เหมาะสมกับการผลิต ต่อมาใบพายจะหมุนคลุกเคล้าเนื้อสัตว์ให้เข้ากับน้ำปรุงรส โดยมีใบกวนปิดช่องว่างระหว่างใบพายกับตัวถังให้การคลุกเคล้าทั่วถึง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ระบบควบคุมสั่งปลดสถานะสูญญากาศและสั่งสัญญาณเรียกพนักงานประจำเครื่อง เพื่อนำผลิตภัณฑ์ออกจากเครื่องนวดผสม จึงอาจแบ่งระบบย่อยออกได้เป็น 5 ระบบย่อย แสดงดังรูปที่ 1

3.3.2. การคาดการณ์ลักษณะความเสียหายในระบบย่อย เช่น ระบบนวดผสมคลุกเคล้า มีลักษณะความเสียหายหลัก 6 อาการ ได้แก่ ฝาถังไม่ปิดหรือปิดไม่สนิท ถังหมุนไม่ตรงตำแหน่ง ภายในถังไม่สะอาด ใบกวนหลุดจากตำแหน่ง รอบหมุนใบพายช้า และใบพายไม่หมุน เป็นต้น

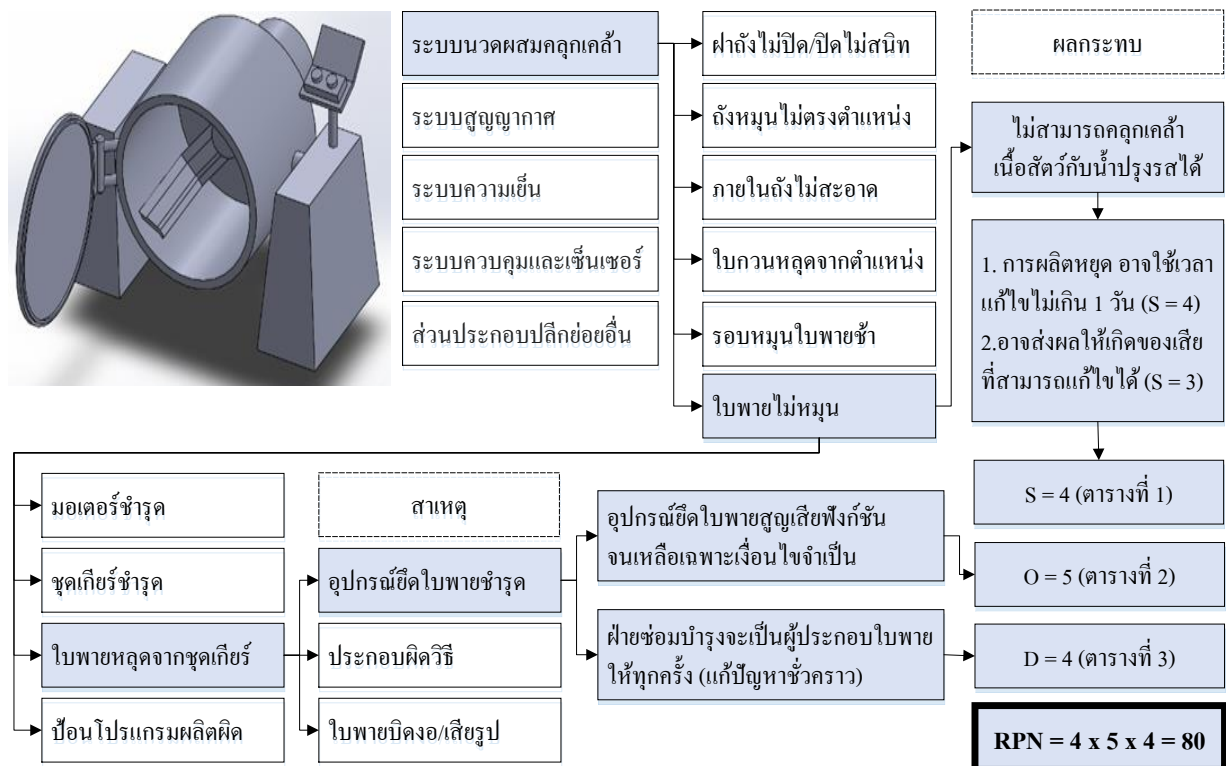
3.3.3. ประเมินผลกระทบและระดับความรุนแรงของลักษณะความเสียหายของระบบย่อย โดยอ้างอิงจากนิยามตามตารางที่ 1 เช่น หากใบพายไม่หมุนจะส่งผลให้เครื่อง

นวดผสมไม่สามารถคลุกเคล้าเนื้อสัตว์กับน้ำปรุงรสได้ ซึ่ง 2 ผลกระทบจากเหตุการณ์ดังกล่าว คือ มีการหยุดชะงักในการผลิตเพื่อรอการแก้ไข ซึ่งคาดการณ์ว่าใช้เวลาเกิน 1 วัน เมื่ออ้างอิงตามตารางที่ 1 จะได้ค่า S เป็น 4 ส่วนผลกระทบอีกอย่าง คือ การต้องนำวัตถุดิบที่เตรียมไว้ไปเก็บรักษาในห้องเย็นเพื่อรักษาอุณหภูมิก่อนผลิตใหม่ ซึ่งเป็นลักษณะของเสียที่แก้ไขได้ง่าย จึงมีค่า S เป็น 3 เนื่องจากผลกระทบในการหยุดชะงักมีค่าความรุนแรงสูงกว่าด้านคุณภาพ ดังนั้นระดับความรุนแรงของใบพายไม่หมูนี้อาจตาม S ที่มากที่สุด คือ S = 4 แสดงดังรูปที่ 1

3.3.4. วิเคราะห์สาเหตุรากเหง้าของแต่ละลักษณะความเสียหาย โดยในการวิจัยนี้ใช้หลักการถามตอบแบบทำไม-ทำไม (Why-Why Analysis) เช่น ใบพายไม่หมูนี้อาจเกิดจาก 4 สาเหตุเบื้องต้น คือ มอเตอร์ชำรุด ชุดเกียร์ชำรุด

ใบพายหลุดจากชุดเกียร์ และพนักงานป้อนโปรแกรมผลิตผิด จากนั้นวิเคราะห์สาเหตุให้ลึกลงไป เช่น ใบพายหลุดจากชุดเกียร์ เกิดจาก 3 สาเหตุ คือ อุปกรณ์ยึดใบพายชำรุด พนักงานผลิตประกอบผิด และใบพายบิดงอหรือเสียรูป

3.3.5. ประเมินโอกาสที่สาเหตุรากเหง้าจะส่งผลให้เกิดลักษณะความเสียหาย โดยอ้างอิงจากนิยามตามตารางที่ 2 เช่น จากการวิเคราะห์ พบว่า อุปกรณ์ยึดใบพายชำรุดเป็นสาเหตุรากเหง้าของอาการใบพายไม่หมูน (ลักษณะความเสียหาย) ดังนั้นจึงตรวจสอบสภาพอุปกรณ์ยึดใบพายในปัจจุบัน ปรากฏว่า อุปกรณ์ยึดใบพายสูญเสียฟังก์ชันจนใกล้สูญเสียเงื่อนไขจำเป็น (สภาพของอุปกรณ์ยึดใบพายเสื่อมสภาพมาก) ดังนั้นเมื่อประเมินโอกาสตามนิยามในตารางที่ 2 จึงได้ O = 5 แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวอย่างขั้นตอนการหาค่า RPN

3.3.6. ประเมินความสามารถในการตรวจจับหรือแก้ไขความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยประเมินจากวิธีปฏิบัติงานและทักษะของส่วนที่เกี่ยวข้องกับสาเหตุรากเหง้าของลักษณะความเสียหาย โดยอ้างอิงการมอบหมายหน้าที่ที่สอดคล้องกับความสามารถของผู้รับผิดชอบ ตามนิยามในตารางที่ 3 เช่น การประกอบและตรวจสอบใบพายกับชุดเกียร์เป็นหน้าที่ของพนักงานประจำเครื่อง ซึ่งมี $D = 2$ แต่เนื่องจากสภาพที่ไม่สมบูรณ์ของอุปกรณ์ชุดใบพาย ช่วงซ่อมบำรุงจึงต้องเป็นผู้ดำเนินการแทน ได้ $D = 4$ ดังรูปที่ 1

3.3.7. คำนวณค่า RPN ของวิธีการปฏิบัติงานที่ไม่ดีและเกี่ยวข้องกับสาเหตุรากเหง้าของลักษณะความเสียหายที่มีผลกระทบสูง (ในบทความนี้จะเรียกว่า สภาวะ) จากผลคูณของค่า S O และ D โดย RPN ที่มีค่าสูงสุด 125 คะแนน จะหมายถึง สภาวะที่มีความเสี่ยงสูงสุด และมีค่าต่ำที่สุดที่ 1 คะแนน จะหมายถึง สภาวะที่ไม่มีความเสี่ยง เช่น คะแนนความเสี่ยง (RPN) จากการใช้อุปกรณ์ชุดใบพายที่มีความเสื่อมสภาพมาก ($O = 5$) จนต้องใช้ช่างซ่อมบำรุงทำหน้าที่ตรวจจับความผิดปกติ ($D = 4$) อาจก่อให้เกิดความเสียหายประเภทใบพายไม่หมุน ซึ่งมีผลกระทบต่อการหยุดชะงักของการผลิตที่ใช้เวลาแก้ไขไม่เกิน 1 วัน ($S = 4$) จะมี RPN ของสภาวะดังกล่าว เป็น 80 คะแนน ดังรูปที่ 1

4. มาตรการปรับปรุงเพื่อลดค่า RPN

4.1. ระดับความเสี่ยงของสภาวะ

เนื่องจากค่า RPN เป็นตัววัดความเสี่ยงของสภาวะที่ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องจักร โดยหากสภาวะมีค่า RPN สูง แสดงว่า สภาวะนั้นมีความพร้อมที่จะก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิต ดังนั้นหัวข้อนี้จึงนำค่า RPN ที่ประเมินผ่านกรอบ FMEA แสดงดังขั้นตอนในข้อ 3.2 มาใช้ในการแบ่งกลุ่มระดับความเสี่ยง โดยในที่นี้จะแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ ความเสี่ยงสูงมี RPN ช่วง 80-125 คะแนน ความเสี่ยงปานกลางมี RPN ช่วง 31-79 คะแนน และความเสี่ยงต่ำมี RPN ช่วง 1-30 คะแนน ทำให้สามารถแบ่งกลุ่มของสภาวะที่มีความเสี่ยงตามเกณฑ์ดังกล่าวได้ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 จำนวนสภาวะที่มีความเสี่ยง (ก่อนปรับปรุง)

เครื่องจักร	จำนวนสภาวะที่มีความเสี่ยง			
	สูง	กลาง	ต่ำ	รวม
เครื่องฉีดน้ำเกลือ - 1	5	7	6	18
เครื่องฉีดน้ำเกลือ - 2	6	6	6	18
เครื่องฉีดน้ำเกลือ - 3	5	7	6	18
เครื่องนวดผสม 130-1	1	11	4	16
เครื่องนวดผสม 130-2	2	10	4	16
เครื่องนวดผสม 150	1	12	5	18
เครื่องนวดผสม 300	1	13	4	18
เครื่องนวดผสม 600	4	14	8	24
กระทะสับผสม 80	2	10	1	13
กระทะสับผสม 180	2	11	3	16
เครื่องอัดไส้กรอก - 1	0	11	13	24
เครื่องอัดไส้กรอก - 2	2	12	0	14
เครื่องอัดไส้กรอก - 3	2	10	2	14
เครื่องอัดไส้กรอก - 4	2	10	2	14

4.2. มาตรการลดความเสี่ยง

4.2.1. มาตรการลดค่า S มุ่งเน้นที่การลดความรุนแรงของผลกระทบตามระดับคะแนนความรุนแรงที่กำหนดไว้ โดยในบทความนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มมาตรการ คือ

1) การลดเวลาซ่อมแซมเมื่อเกิดความเสียหาย (Time to Repair) จัดทำเป็น 2 มาตรการ คือ

1.1) การลดเวลาในการวินิจฉัย โดยจัดทำในรูปแบบตรรกะเชื่อมโยงอาการเสียกับสาเหตุที่เป็นไปได้ เช่น สัญญาณแสดงความผิดปกติ (Alarm) ที่แสดงบนหน้าจอเครื่องอัดไส้กรอก แสดงสัญญาณแบบ A ช่วงซ่อมบำรุงจะมีลำดับการตรวจวินิจฉัยสาเหตุเรียงลำดับจาก (1) ความแน่นขั้วต่อสายไฟโซนอัด (2) เซนเซอร์โซนอัดไม่ทำงาน และ (3) การทำงานของปั๊มสุญญากาศ แสดงดังตารางที่ 5 ซึ่งการลดเวลาการวินิจฉัยสาเหตุจะช่วยให้เวลาในการซ่อมแซมลดลง ทำให้ค่า S และคะแนน RPN ลดลงตามไปด้วย (ดูตารางที่ 1 ประกอบ)

ตารางที่ 5 ตัวอย่างเมตริกซ์สัญญาณความผิดปกติและสาเหตุที่เป็นไปได้ของเครื่องอัดไส้กรอก

สาเหตุ	สัญญาณ			
	A	B	C	D
ข้าวสายไฟโซนอัดหลวม	1	-	-	-
ข้าวสายไฟโซนแบ่งปริมาตรหลวม	-	1	-	-
เซนเซอร์โซนอัดไม่รับสัญญาณ	2	-	-	-
มอเตอร์ไบนเวนหยุดทำงาน	-	-	1	-
ปั๊มสูญญากาศไม่ทำงาน	3	-	-	1

นอกจากนี้ยังมีการทบทวนช่างซ่อมบำรุงในการประชุมย่อยช่วงเช้าก่อนจะเริ่มงาน (Morning Talk) การทำสัญลักษณ์บ่งชี้ตำแหน่งที่มักเกิดการติดขัดที่ส่งผลต่อการหยุดเล็กน้อย และการฝึกอบรมพนักงานประจำเครื่องให้สามารถแก้ไขเบื้องต้นด้วยการอบรมในพื้นที่หน้างานผ่านบทเรียนหนึ่งจุด (One Point Lesson : OPL) อีกด้วย

1.2) การลดเวลานำ (Lead Time) ในการจัดซื้อ โดยการวางแผนจัดซื้ออะไหล่ โดยแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ (ก) ชิ้นส่วนที่มีค่า RPN สูงหรือปานกลางที่มีราคาสูง จะจัดซื้อเมื่อชิ้นส่วนหมดอายุการใช้งานมาสำรองไว้และเปลี่ยนเมื่อเกิดการเสียหาย (Breakdown) เช่น ชุดเกียร์ของเครื่องยนต์ผสม ซึ่งใช้เวลานาน 45 วันและเวลาเปลี่ยนไม่เกิน 6 ชั่วโมง ดังนั้นเมื่อมีการสำรองชุดเกียร์ดังกล่าว และเปลี่ยนเมื่อเกิดการเสียหายจะส่งผลให้ S ลดลงจาก 5 เหลือ 4 คะแนน เป็นต้น (ข) ชิ้นส่วนที่มีค่า RPN สูงและราคาต่ำ จะเปลี่ยนตามรอบเวลา (Time Based Change) รายละเอียดแสดงในหัวข้อ 4.2.2 และ (ค) ชิ้นส่วนที่มี RPN ปานกลาง และราคาต่ำจะเปลี่ยนตามสภาพการใช้งาน (Condition Based Change) ที่กำหนดวิธีและรอบการตรวจสอบสภาพการใช้งาน รายละเอียดแสดงในหัวข้อ 4.2.2 และ 4.2.3

2) การใช้กลไกของหน่วยงานวิจัยและพัฒนา (R&D) นำสินค้าไม่ได้มาตรฐานไปใช้ผลิตไปเป็นสินค้าอื่น เช่น การนำแฮมไก่ที่รสชาติไม่เป็นไปตามมาตรฐานไปทำเป็นเนื้อไก่บดซุบเกล็ดขนมปัง ซึ่งในทางการคำนวณจะลดค่า

S จาก 4 แด้มเหลือ 3 แด้ม แต่อย่างไรก็ตาม แนวคิดต่างๆ เหล่านี้เป็นเพียงโจทย์สำหรับหน่วยงาน R&D แต่จะไม่ถือว่าเป็นมาตรการลดค่า RPN ในบทความนี้

4.2.2. มาตรการลดค่า O มุ่งเน้นที่การลดโอกาสเกิดความเสียหายที่มาจากสภาพของชิ้นส่วนที่ไม่สมบูรณ์ โดยจะแบ่งขั้นตอนการลดค่า O ออกเป็น 4 ระดับ (ดูตารางที่ 2 ประกอบ) ดังนี้

1) ชิ้นส่วนที่มีคะแนน RPN สูง มีราคาต่ำ โดยมีค่า O เท่ากับ 5 จะต้องถูกเปลี่ยนชิ้นส่วนหรือซ่อมแซมให้กลับสู่สภาพปกติ (Corrective Action) ทันที จากนั้นกำหนดการเปลี่ยนตามรักษาค่า O ที่ทำให้คะแนน RPN ไม่เกิน 80 คะแนน (สภาวะที่มีความเสี่ยงสูง) ด้วยการเปลี่ยนตามรอบเวลาตามแผนและระบุลงในแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance : PM) เช่น การประเมินเครื่องอัดไส้กรอก พบว่า ไบนเวน (Vane) สำหรับอัดไส้กรอกมีสภาพสึกหรองจนใกล้สูญเสียเงื่อนไขที่จำเป็น (ค่า O = 5) จึงทำการเปลี่ยนทั้งชุด และทำการทดลองหาอายุการใช้งาน (ตรวจสอบความสมบูรณ์ทุก 1 เดือน พบว่า ไบนเวนมีอายุประมาณ 3 เดือน) จากนั้นระบุในแผน PM ให้มีการเปลี่ยนไบนเวนทุก 3 เดือน เป็นต้น

2) ชิ้นส่วนที่มีคะแนน RPN สูง มีราคาต่ำ โดยมีค่า O น้อยกว่า 5 มี 2 ทางเลือกในการลดค่า RPN คือ (ก) เปลี่ยนชิ้นส่วน ทดลองหาอายุการใช้งานชิ้นส่วน และกำหนดลงในแผน PM หรือ (ข) เพิ่มระดับการตรวจสอบ (ลดค่า D) จนกระทั่งชิ้นส่วนหมดอายุ จึงดำเนินการตามข้อ (ก)

3) ชิ้นส่วนที่มีคะแนน RPN ปานกลาง มีราคาต่ำ จะอาศัยการตรวจสอบสภาพสม่ำเสมอ (ลดค่า D) และเปลี่ยนชิ้นส่วนหรือซ่อมแซมให้กลับสู่สภาพเดิมทันทีที่พบความเสื่อมสภาพ (ค่า O = 5)

4) สภาวะที่มีความเสี่ยงปานกลาง (RPN อยู่ในช่วง 31-79) จะลดค่า O โดยทำการหล่อลื่น (Lubricant) ชันกวด และปรับแต่ง (Tight and Adjust) การทำความสะอาดแบบตรวจสอบ (Cleaning and Inspection) ตามแผน PM

ข้อสังเกต การดำเนินการลดค่า O ทั้ง 4 ระดับข้างต้น จะเห็นว่า ทุกกิจกรรมจะถูกบรรจุไว้ในแผน PM ดังนั้น ปัจจัยที่จะรักษาค่า O ให้อยู่ในระดับต่ำได้ จึงเกี่ยวข้องกับการควบคุมและรักษาให้เป็นไปตามแผน วิธีการที่จะทำให้เป็นเช่นนั้นได้ อาจใช้วิธีให้เกิดการทวนสอบระหว่างหน่วยงาน (Cross Check) เช่น กำหนดความถี่ให้พนักงานทำความสะอาดแบบตรวจสอบรายวัน และให้ช่างซ่อมบำรุงเข้ามาตรวจสอบในตำแหน่งนั้นๆ อย่างสม่ำเสมอ เป็นต้น

4.2.3. มาตรการลดค่า D มุ่งเน้นที่การให้ความรู้และฝึกฝนทักษะของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องให้ตรวจจับความผิดปกติได้ อาทิ การจัดทำมาตรฐานการถอดประกอบอุปกรณ์กับเครื่องจักร การตรวจสอบชิ้นส่วนสำคัญ รวมถึงการทำให้ระบบงานตรวจจับความผิดปกติง่ายขึ้นโดยใช้สัญลักษณ์สีและควบคุมด้วยสายตา (Visual Control) หรือการติดตั้งเซนเซอร์และสัญญาณความผิดปกติ (Andon) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ค่า D อาจมีระดับคะแนนที่แกว่งแตกต่างกันในแต่ละเดือนเช่นเดียวกับค่า O ทั้งนี้จะเกิดขึ้นจากการมีพนักงานใหม่เข้ามาปฏิบัติงาน ดังนั้นจึงมีการเพิ่มเติมรายการสำคัญที่เกี่ยวข้องกับค่า D ลงในหลักสูตรการฝึกอบรมพนักงานใหม่ นอกจากนี้ยังมีการทบทวนผ่าน OPL วันละ 1 เรื่องในทุกเช้าก่อนเริ่มงาน

5. สรุป

ภายหลังการดำเนินมาตรการทั้ง 3 ลักษณะ ดังแสดงในหัวข้อ 4.2 พบว่า ไม่ปรากฏจำนวนสถานะที่มีความเสี่ยงสูงเลย และจำนวนสถานะที่มีความเสี่ยงปานกลางก็มีจำนวนที่ลดลงในทุกเครื่องจักร แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 จำนวนสถานะที่มีความเสี่ยง (หลังปรับปรุง)

เครื่องจักร	จำนวนสถานะที่มีความเสี่ยง			
	สูง	กลาง	ต่ำ	รวม
เครื่องฉีดน้ำเกลือ - 1	0	6	12	18
เครื่องฉีดน้ำเกลือ - 2	0	6	12	18
เครื่องฉีดน้ำเกลือ - 3	0	6	12	18

ตารางที่ 6 (ต่อ) จำนวนสถานะที่มีความเสี่ยง (หลังปรับปรุง)

เครื่องจักร	จำนวนสถานะที่มีความเสี่ยง			
	สูง	กลาง	ต่ำ	รวม
เครื่องนวดผสม 130-1	0	8	8	16
เครื่องนวดผสม 130-2	0	8	8	16
เครื่องนวดผสม 150	0	11	7	18
เครื่องนวดผสม 300	0	12	6	18
เครื่องนวดผสม 600	0	14	10	24
กระแทบผสม 80	0	2	11	13
กระแทบผสม 180	0	2	14	16
เครื่องอัดไส้กรอก - 1	0	9	15	24
เครื่องอัดไส้กรอก - 2	0	6	8	14
เครื่องอัดไส้กรอก - 3	0	6	8	14
เครื่องอัดไส้กรอก - 4	0	6	8	14

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Elsmar, "History of FMEA," Available at <http://elsmar.com/FMEA/sld010.htm>, accessed September 21, 2016.
- [2] Maddox, M.E. "Error apparent," Industrial Engineer, Vol.37, No.5, pp.40-44, 2005.
- [3] Kumar, R.L., "Managing risks in IT projects: an options perspective," Information & Management, Vol.40, No.1, pp.63-74, 2002.
- [4] H. H. Guerrero, and J. R. Bradley, "Failure Modes and Effects Analysis: An Evaluation of Group versus Individual Performance," Production and Operations Management, Vol. 22, No.6, pp.1524-1539, 2013.
- [5] SF. Liua, J.H. Cheng, Y.L. Lee and F.R. Gau, "A case study on FMEA-based quality improvement of packaging designs in the TFT-LCD industry," Total Quality Management, Vol. 27, No.4, 413-431, 2016.

ผลของความเข้มข้นตัวอย่างสลัดจ์ต่อการประมาณค่าyield ของเฮเทอโรโทรฟิคแบคทีเรียด้วยวิธีการวัดอัตราการใช้ออกซิเจน

Influence of Sludge Sample Concentration on Heterotrophic Bacteria Yield Estimation by Using Oxygen Uptake Rate Measurement Method

ปิยะรัตน์ ปรีขมาโนช

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นตัวอย่างสลัดจ์ต่อการประมาณค่าyieldของเฮเทอโรโทรฟิคแบคทีเรียด้วยวิธีการวัดอัตราการใช้ออกซิเจนโดยใช้เครื่องวัดการหายใจอัตโนมัติ ตัวอย่างสลัดจ์นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียชนิดคลองวนเวียน (Oxidation Ditch) โรงพยาบาลมหาราชนครราชสีมา จำนวน 2 ครั้ง ระยะเวลาห่างกัน 1 สัปดาห์ ครั้งแรกนำมาจากถังเติมอากาศความเข้มข้นเฉลี่ย 4,370 มิลลิกรัม/ลิตร และครั้งที่ 2 นำมาจากปลายท่อระบบหมุนเวียนความเข้มข้นเฉลี่ย 5,487 มิลลิกรัม/ลิตร เติมอากาศตัวอย่างสลัดจ์ทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชม. เพื่อไม่ให้มีสารอาหารตกค้างในน้ำและเพื่อปรับสภาพจุลินทรีย์ให้อยู่ในสภาวะการหายใจแบบเอนโดจีนัส การทดลองวัดอัตราการใช้ออกซิเจนแบบกะกับตัวอย่างสลัดจ์ปริมาตร 4.5 ลิตร ความเข้มข้น 880 – 5,297 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยสารอาหารที่ย่อยสลายง่ายซึ่งเตรียมจากสารละลายโซเดียมอะซิเตทความเข้มข้นซีโอดี (COD) อยู่ระหว่าง 7.21 - 57.05 มิลลิกรัม/ลิตร เติมให้กับตัวอย่างสลัดจ์ต่อเนื่องกันจำนวน 4 ครั้ง ควบคุม pH การทดลองเท่ากับ 7.8 ± 0.1 และอุณหภูมิ 28 ± 0.5 °C

ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของตัวอย่างสลัดจ์ไม่มีผลต่อการประมาณค่าyieldโดยใช้หลักการสมดุลมวลและสมการเชิงเส้นตรงบนพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กระบวนการแยกทิวเด็คสลัดจ์ที่ 1 (ASM no.1) ตัวอย่างสลัดจ์จากปลายท่อระบบหมุนเวียนเจือจางมีความเข้มข้นเฉลี่ย 880, 2,186 และ 5,297 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่าyieldเท่ากับ 0.63 ± 0.00 มิลลิกรัมเซลล์ (ซีโอดี)/มิลลิกรัมซีโอดี ($r^2 = 0.9934$) ตัวอย่างสลัดจ์ที่นำมาจากถังเติมอากาศ (ความเข้มข้นเฉลี่ย 3,002 และ 4,081 มิลลิกรัม/ลิตร) มีค่าyieldเท่ากับ 0.56 ± 0.03 มิลลิกรัมเซลล์ (ซีโอดี)/มิลลิกรัมซีโอดี ($r^2 = 0.9802$) สลัดจ์ ความเข้มข้น 880 และ 5,297 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้เวลาวัดอัตราการใช้ออกซิเจนที่ค่าซีโอดีสูงสุด 57.05 มิลลิกรัม/ลิตร ประมาณ 80 และ 23 นาที ทั้งนี้ ค่าyieldที่ได้มีค่าต่างกันเนื่องจากเปลี่ยนตำแหน่งเก็บตัวอย่างสลัดจ์และเวลาห่างกัน 1 สัปดาห์ ซึ่งถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาในการแปลผลจากการทดลอง ตามที่ได้อธิบายไว้โดย Spanjers *et al.* [1] โดยเฉพาะน้ำเสียจากโรงพยาบาลมีการปนเปื้อนจากยาหรือสารเคมีอื่นๆ ที่อาจจะส่งผลต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียในทุกวันได้

คำสำคัญ: แยกทิวเด็คสลัดจ์ yield เฮเทอโรโทรฟิคแบคทีเรีย อัตราการใช้ออกซิเจน

Abstract

The objective of this research is to study the effect of sludge concentration on heterotrophic bacteria yield (Y_H) by using oxygen uptake rate (OUR) with ultimate hybrid respirometer. The microorganisms for oxidation ditch process were collected from Maharaj Hospital, Nakhon Ratchasima Province, Thailand. We sampled the mixed liquor suspended solids (MLSS) from two difference sampling points; aeration tank at 4,370 mg/l, and return sludge pipe at 5,487 mg/l. Sludge samples were aerated overnight in the preparing chamber until reaching the endogenous respiration phase. MLSS sample concentrations were diluted to 880- 5,297 mg/L. Sodium acetate was used as a readily biodegradable COD substrate (rbCOD) and dosed to the MLSS sample. Final COD concentration was varied into 4 dilutions, at which they are between 7.21 -57.70 mg/L. The temperature, pH and dissolved oxygen (DO) were controlled throughout the experiment at 28 ± 0.5 C, 7.8 ± 0.1 and 6-7 mg/L, respectively.

Based on a simulation model of Activated sludge model 1 (ASM no.1) using liner regression and mass balance basic, the results showed that the MLSS concentrations from different sources have not performed any significant effects on heterotrophic bacteria yield (Y_H). i.e., the yield from (a) the returning sludge pipe and (b) the aerobic tank are 0.63 ± 0.00 mg/mg ($r^2 = 0.9934$) and 0.56 ± 0.03 mg/mg ($r^2 = 0.9802$), respectively. Time spending for OUR measurement for MLSS concentration of 880 and 5,297 mg/l to decompose COD concentration at 57.05 mg/l were 80 and 23 min. The difference of yield results due to the different time and sampling points, in which is a significant parameter, Spanjers et al. [1]. We also have found that the wastewater from hospitals were contaminated by drugs or other chemicals, possibly affect the microorganisms that are in the wastewater treatment plant.

Key words: Activated sludge, Yield; Heterotrophic, Respirometer, OUR

1. บทนำ

พารามิเตอร์จลนศาสตร์ของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ ถือว่าเป็นข้อมูลสำคัญที่จะนำมาใช้ในการออกแบบก่อสร้าง การควบคุม และการติดตามการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสีย [1] ทั้งนี้พารามิเตอร์จลนศาสตร์ของจุลินทรีย์จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพสิ่งแวดล้อม เช่นลักษณะน้ำเสีย และรูปแบบการเดินระบบบำบัดน้ำเสีย [2][3] พารามิเตอร์จลนศาสตร์ที่สำคัญ ได้แก่ ค่าyield (Yield, Y) ค่าคงที่อิ่มตัวสำหรับสารอาหาร (Saturation constant for substrate, K) อัตรา

การเน่าเปื่อย (Decay rate, b) และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุด (Maximum specific growth rate, μ_{max})

ปัจจุบันเทคนิคการวัดอัตราการหายใจหรืออัตราการใช้ออกซิเจน (Oxygen uptake rate, OUR) ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์จลนศาสตร์ของจุลินทรีย์ในกระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์อย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านงานวิจัยและการควบคุมระบบ โดยเฉพาะการสอบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กระบวนการแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ที่

เฉพาะเจาะจงกับระบบบำบัดน้ำเสียนั้นๆ [1], [4]-[12] เทคนิคการวัดนี้มีความแม่นยำสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ การวัดโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ราคาแพง [13] ให้ผลการ ทดลองที่รวดเร็วภายใน 1-1.5 ชม. ก็สามารถจำแนก ค่าพารามิเตอร์จลนศาสตร์ของสลัดจ์ได้โดยไม่ต้อง วิเคราะห์ความเข้มข้นสารอาหารใน ห้องปฏิบัติการ [7] [10] ทั้งนี้ความถูกต้องก็ขึ้นอยู่กับชนิด เครื่องมือวัดและการออกแบบการทดลองที่ เหมาะสมได้แก่ระดับความซับซ้อนของแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ประมวลผล ขั้นตอนการเก็บ รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง [5] แหล่งที่มาของ จุลินทรีย์ ชนิดของสารอาหารที่ใช้และเวลาในการ ทดลอง [1] ดังนั้น ความเข้มข้นของตัวอย่างสลัดจ์จึงเป็น ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการทดลอง โดยทั่วไปความเข้มข้น ของสลัดจ์ในระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ชนิดธรรมดาจะมีค่า

อยู่ระหว่าง 1,500 - 4,000 มิลลิกรัม/ลิตร และในระบบ หมุนเวียนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 8,000 - 12,000 มิลลิกรัม/ ลิตร [14] ขึ้นอยู่กับการออกแบบการเดินระบบและปัจจัย ภายนอกอื่นๆ

ปัจจุบันยังไม่มีรายงานการวิจัยที่แสดงถึงผลของ ความเข้มข้นตัวอย่างสลัดจ์ต่อการประมาณค่าอัตราของ จุลินทรีย์ในระบบแอกทิเวเตดสลัดจ์โดยใช้เทคนิควัดอัตรา การใช้ออกซิเจน เพราะความเข้มข้นของสลัดจ์ในระบบ บำบัดน้ำเสียแต่ละแห่งมีความแตกต่างกัน ดังนั้นการ เตรียมความเข้มข้นตัวอย่างสลัดจ์ที่เหมาะสมสำหรับการ วัดอัตราการใช้ออกซิเจนจึงเป็นขั้นตอนแรกที่จะส่งผลให้ได้ ข้อมูลการทดลองที่สมบูรณ์และนำไปสู่การแปลผลที่ ถูกต้อง ครอบคลุมความเข้มข้นของสลัดจ์ในทุกรูปแบบ กระบวนการแอกทิเวเตดสลัดจ์ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

2. การประมาณค่าอัตราของเฮเทอโรทรอฟิก แบคทีเรีย (Y_H)

ยีสต์ (Y) หมายถึง ปริมาณของจุลินทรีย์ที่ เพิ่มขึ้นจากเดิมต่อหน่วยของอินทรีย์คาร์บอนที่ถูกใช้ไป สำหรับการเจริญเติบโต อัตราการใช้ออกซิเจนของเฮเทอโรทรอฟิกแบคทีเรียและอัตราการกำจัดสารอาหารในรูปของซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD) สามารถแสดงด้วยสมการที่ (1) และ (2) และเมื่อหารสมการที่ (1) ด้วยสมการที่ (2) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3) แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ใต้กราฟอัตราการใช้ออกซิเจนภายใต้สภาวะการหายใจแบบเอกโซจีนัส (OUR_{ex}) มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารอาหาร (S_s) ที่เติมลงไป ดังนั้นค่าความชัน (Slope) ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ไป (Oxygen consumed, OC_{ex}) กับปริมาณสารอาหารที่เติมมีค่าเท่ากับ $(1 - Y_H)$ ดังสมการที่ (4)

$$OUR_{ex} = -\frac{dS_o}{dt} = \frac{(1-Y_H)}{Y_H} \mu_{maxH} \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{OH} + S_o} X_{BH} \quad (1)$$

$$\frac{dS_s}{dt} = -\frac{1}{Y_H} \mu_{maxH} \frac{S_s}{K_s + S_s} \frac{S_o}{K_{OH} + S_o} X_{BH} \quad (2)$$

$$\int OUR_{ex} dt = -(1-Y_H) \int dS_s \quad (3)$$

$$OC_{ex} = (1-Y_H) S_s \quad (4)$$

3. วิธีการทดลอง

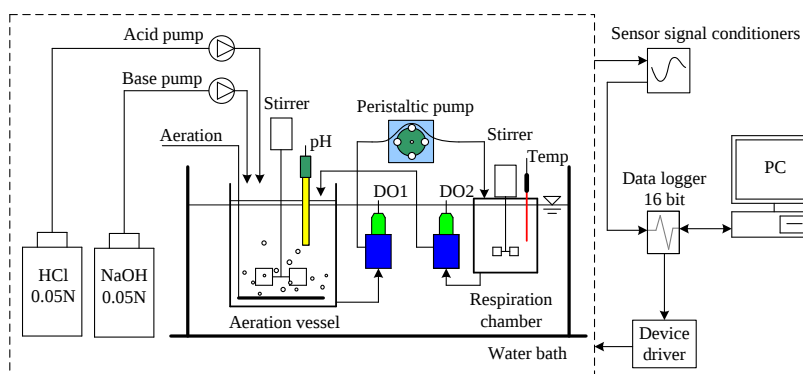
ตัวอย่างสลัดจ์ที่ใช้ในการทดลองนำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียชนิดคลองวนเวียน (Oxidation Ditch) โรงพยาบาลทหาร จ. นครราชสีมา เก็บตัวอย่างสลัดจ์จำนวน 2 ครั้ง ระยะเวลาห่างกัน 1 สัปดาห์ โดยครั้งแรกนำตัวอย่างสลัดจ์มาจากถังเดิมอากาศ และครั้งที่ 2 นำมาจากปลายท่อระบบหมุนเวียนสลัดจ์ ทำการกรองสลัดจ์ด้วยตะแกรงละเอียดเพื่อแยกของแข็งและเศษวัสดุอื่นๆ ที่มีขนาดใหญ่ออกไป จากนั้นเติมอากาศให้กับตัวอย่างสลัดจ์เพื่อให้สารอาหารที่ตกค้างอยู่ได้ถูกนำไปใช้จนหมดและปรับสภาพจุลินทรีย์ให้อยู่ในสภาวะการหายใจแบบเอนโดจีนัสอย่างน้อย 24 ชม. เจือจางตัวอย่างสลัดจ์ด้วยน้ำ

สะอาดที่ผ่านการกรองด้วยเมมเบรนให้ได้ปริมาตร 4.5 ลิตร จำนวน 5 ระดับความเข้มข้นระหว่าง 880 - 5,297 มิลลิกรัม/ลิตร ตามรายละเอียดในตารางที่ 1 ในแต่ละความเข้มข้นทำการวัดอัตราการใช้ออกซิเจนจำนวน 4 ครั้งต่อเนื่องกัน โดยใช้สารละลายโซเดียมอะซิเตทเป็นสารอาหาร โดยค่าซีไอดีที่ได้จากการคำนวณอยู่ระหว่าง 7.21 - 57.05 มิลลิกรัม/ลิตร ทำการตรวจวัดอัตราการใช้ออกซิเจน (OUR) ของตัวอย่างสลัดจ์ด้วยเครื่องวัดอัตราการหายใจแบบอัลติเมทไฮบริด [11] ซึ่ง ประกอบด้วย ภาชนะเดิมอากาศและภาชนะวัดการหายใจปริมาตร 4.5 และ 0.84 ลิตร (รูปที่ 1) โดยภาชนะวัดการหายใจจะปิดสนิทเพื่อป้องกันการกั้นซึมผ่านของอากาศจากภายนอก ทำการควบคุมอุณหภูมิและ pH ในการทดลองเท่ากับ $28 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ และ 7.8 ± 0.1 นำตัวอย่างสลัดจ์ไปวิเคราะห์หาค่าของแฉ่งแฉวนลอย (Mixed liquor

suspended solids, MLSS) ด้วยวิธีมาตรฐาน [15] เมื่อสิ้นสุดการทดลองในแต่ละความเข้มข้น

4. ผลการทดลอง

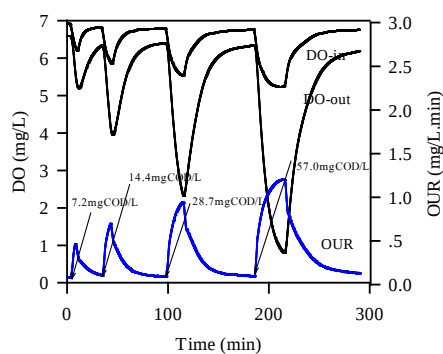
การทดลองวัดอัตราการใช้ออกซิเจนของตัวอย่างสลัดจ์ที่นำมาจากถังเดิมอากาศเจือจางได้ความเข้มข้นเฉลี่ย $3,002 \pm 84$ และ $4,081 \pm 71$ มิลลิกรัม/ลิตร และจากปลายท่อระบบหมุนเวียนสลัดจ์เจือจางได้ความเข้มข้นเฉลี่ย 880 ± 112 , $2,186 \pm 27$ และ $5,297 \pm 61$ มิลลิกรัม/ลิตร สารอาหารที่ใช้เติมให้กับตัวอย่างสลัดจ์ จำนวน 4 ครั้งมีค่าซีไอดีที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 7.21, 14.40, 28.71 และ 57.05 มิลลิกรัม/ลิตร ตัวอย่างกราฟแนวโน้มค่าออกซิเจนและอัตราการใช้ออกซิเจนแสดงในรูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงแต่ละความเข้มข้นตัวอย่างสลัดจ์แสดงในรูปที่ 3 - 7 และสรุปผลการทดลองทั้งหมดแสดงในตารางที่ 2



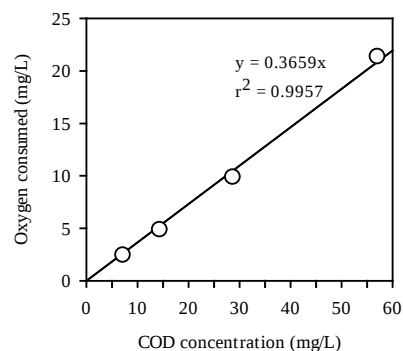
รูปที่ 1 เครื่องวัดการหายใจแบบอัลติเมทไฮบริด [11]

ตารางที่ 1 การเตรียมความเข้มข้นตัวอย่างสลัดจ์

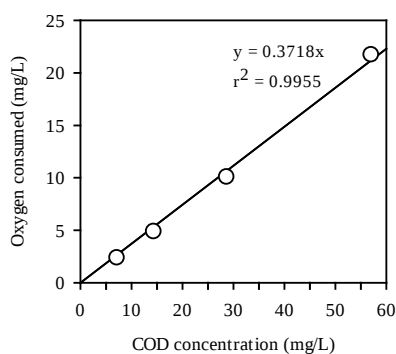
ครั้งที่	ตำแหน่งเก็บสลัดจ์	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นตัวอย่างสลัดจ์เจือจาง (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	ถังเดิมอากาศ	$4,370 \pm 35$	$3,002 \pm 84$
			$4,081 \pm 71$
2	ปลายท่อหมุนเวียนสลัดจ์	$5,487 \pm 101$	880 ± 112
			$2,186 \pm 27$
			$5,297 \pm 61$



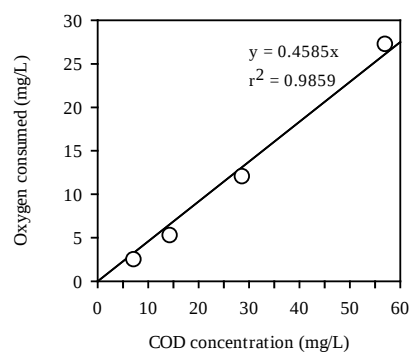
รูปที่ 2 ตัวอย่างกราฟแนวโน้มค่าออกซิเจนและอัตราการใช้ออกซิเจน



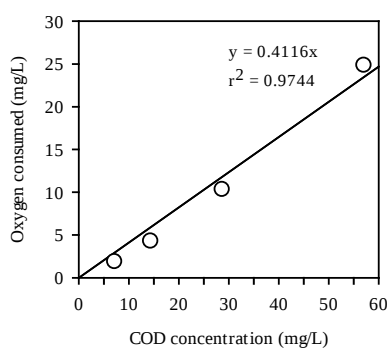
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเฉลี่ยความเข้มข้นตัวอย่างสัปดาห์ที่ 880 ± 112 มิลลิกรัม/ลิตร



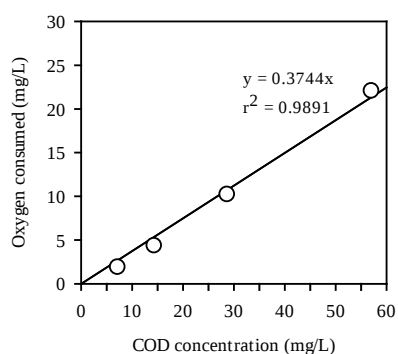
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเฉลี่ยความเข้มข้นตัวอย่างสัปดาห์ที่ 2,186 ± 27 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเฉลี่ยความเข้มข้นตัวอย่างสัปดาห์ที่ 3,002 ± 84 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเฉลี่ยความเข้มข้นตัวอย่างสัปดาห์ที่ 4,081 ± 71 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงเฉลี่ยความเข้มข้นตัวอย่างสัปดาห์ที่ 5,297 ± 61 มิลลิกรัม/ลิตร

ตารางที่ 2 ค่าผิดพลาดที่ไดจากการทดลองโดยแยกตามจุดเก็บตัวอย่างสถิติ

ครั้งที่	จุดเก็บสถิติ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นเจือจาง (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความชัน (slope)	ค่าผิดพลาด (1-slope)	Coefficient of determination (r^2)
1	ถึงเต็มอากาศ	4,370 ± 35	3,002 ± 84	0.4585	0.5415	0.9859
			4,081 ± 71	0.4116	0.5884	0.9744
2	ปลายท่อหมุนเวียนสถิติ	5,487 ± 101	880 ± 112	0.3659	0.6341	0.9957
			2,186 ± 27	0.3718	0.6282	0.9955
			5,297 ± 61	0.3744	0.6256	0.9891

ค่าผิดพลาดที่ไดจากการทดลองทั้งหมดมีค่าเฉลี่ย 0.60 มิลลิกรัมเซลล์ (ซีไอดี)/มิลลิกรัมซีไอดี ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่เคยศึกษาไว้โดย Premanoch [12] เท่ากับ 0.69 มิลลิกรัมเซลล์ (ซีไอดี)/มิลลิกรัมซีไอดี ซึ่งนำตัวอย่างสถิติมาจากระบบบำบัดน้ำเสียและเงื่อนไขการวิเคราะห์ตัวอย่างเหมือนกัน และใกล้เคียงกับค่าผิดพลาดที่อ้างอิงไว้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กระบวนการแยกที่เต็ดสถิติที่ 1 (ASM no.1) เท่ากับ 0.67 มิลลิกรัมเซลล์ (ซีไอดี)/มิลลิกรัมซีไอดี ที่อุณหภูมิมาตรฐาน 20°C [3] จากรายงานที่ศึกษาโดย Muller *et al.* [16] ใช้ตัวอย่างสถิติจากระบบบำบัดน้ำเสียนำร่องสำหรับกำจัดไนโตรเจนได้ค่าผิดพลาดเท่ากับ 0.69 มิลลิกรัมเซลล์ (ซีไอดี)/มิลลิกรัมซีไอดี และจากรายงานที่ศึกษาโดย Dricks *et al.* [17] ได้ค่าผิดพลาดเท่ากับ 0.71 มิลลิกรัมเซลล์ (ซีไอดี)/มิลลิกรัมซีไอดี โดยทั่วไปผิดพลาดน้ำเสียชุมชนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.38 – 0.75 มิลลิกรัมเซลล์ (ซีไอดี)/มิลลิกรัมซีไอดี [18]

5. สรุปผลการทดลอง

ผลจากการทดลองพบว่า ตัวอย่างสถิติที่นำมาจากปลายท่อระบบหมุนเวียนความชันของกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ใช้ไปกับความเข้มข้นตัวอย่างสถิติมีค่าเท่ากัน (ค่า slope = 0.37) และ r^2 เฉลี่ยเท่ากับ 0.9934 แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของตัวอย่างสถิติไม่มีผลต่อการประมาณ

ค่าผิดพลาด โดยใช้หลักการสมดุลมวลและสมการเชิงเส้นตรงบนพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กระบวนการแยกที่เต็ดสถิติที่ 1 ตัวอย่างสถิติที่นำมาจากปลายท่อระบบหมุนเวียนมีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 880 - 5,297 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งครอบคลุมตัวอย่างสถิติที่นำมาจากถึงเต็มอากาศ (3,002 – 4,189 มิลลิกรัม/ลิตร) ปัจจัยที่ทำให้ค่าผิดพลาดของตัวอย่างสถิติมีค่าต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างของเวลาและตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง โดยเฉพาะน้ำเสียจากโรงพยาบาลมีการปนเปื้อนจากยาหรือสารเคมีอื่นๆ ที่อาจจะส่งผลต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียในแต่ละวันได้ ซึ่งถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาในการแปลผลจากการทดลอง ตามที่ได้อธิบายไว้โดย Spanjers *et al.* [1] เมื่อความเข้มข้นของตัวอย่างสถิติสูงขึ้นจะใช้เวลาในการทดลองสั้นลง ดังนั้นเราสามารถนำตัวอย่างสถิติจากระบบบำบัดน้ำเสียมาวัดอัตราการใช้ออกซิเจนได้โดยตรงและไม่จำเป็นต้องเจือจางก่อนทำการทดลองซึ่งจะช่วยประหยัดเวลาในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยทั่วไปความเข้มข้นของสถิติในถึงเต็มอากาศระบบแยกที่เต็ดสถิติมีค่าอยู่ระหว่าง 1,500 - 4,000 มิลลิกรัม/ลิตร และในระบบหมุนเวียนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 8,000 - 12,000 มิลลิกรัม/ลิตร ตัวอย่างสถิติความเข้มข้น 880 และ 5,297 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้เวลาวัดอัตราการใช้ออกซิเจนที่ค่าซี ไอ ดี สูง สุด 57.05 มิลลิกรัม/ลิตร ประมาณ 80 และ 23 นาที

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Spanjers, H., Vanrolleghem, P.A., Olsson, G. and Dold, P.L, "Respirometry in Control of the Activated Sludge Process: Principles," IAWQ Scientific and Technical Report No. 7. London: UK, 1998.
- [2] Henze, M., Harremoes, P., Jansen, J. C. and Arvin, E, "Wastewater treatment: Biological and chemical processes," (3th ed.). Berlin: Springer, 2002.
- [3] Henze.M.,Grady, C.P.L.,Gujer, W., Marais, G.V.R., and Matsuo, T, "Activated Sludge model: ASM1, ASM2 andASM3" IWA Scientific and Technical Reports No.9 London: TJ International, 2000.
- [4] Marsili-Libelli, S., Ratini, P., Spagni, A. and Bortone, G, "Implementation, study and calibration of a modified ASM2d for the simulation of SBR processes," Water Sci. Technol. Vol. 43 (3), pp. 69-76, 2001.
- [5] De Pauw, D. J. W. and Vanrolleghem, P. A, "Designing and performing experiments for model calibration using an automated iterative procedure," Wat. Sci. Technol, vol. 53(1), pp. 117-127. 2006.
- [6] Sin, G. and Vanrolleghem, P.A, "A nitrate biosensor-based methodology for monitoring anoxic activated sludge activity," Water Sci Technol, vol. 50 (11), pp. 125-133, 2004.
- [7] Spanjers, H. and Vanrolleghem, "Respirometry as a tool for rapid characterization of wastewater and activated sludge," Water Sci. Technol, vol. 31 (2), pp.105-114, 1995.
- [8] Vanrolleghem, P. A. and Spanjers, H, "A hybrid respirometric method for more reliable assessment of activated sludge model parameters," Water Sci. Technol, vol. 37(12), pp. 237-246, 1998.
- [9] Vanrolleghem, P. A., Spanjers, H., Petersen, B., Ginestet, P. and Takacs I, "Estimating (combinations of) Activated Sludge Model No. 1 parameters and components by respirometry," Wat. Sci. Technol, vol. 39 (1), pp. 195-214, 1999.
- [10] Ficara, E., Musumeci, A. and Rozzi, A, "Comparison and combination of titrimetric and respirometric techniques to estimate nitrification kinetics parameters," Water SA., vol. 26 (2), pp. 217-224, 2000.
- [11] Saensing, P. and Kanchanatawee, S, "Development of combined ultimate hybrid respirometer-Titrate meter to estimate kinetic parameters of activated sludge," Suranaree J. Sci. Technol, vol. 16 (3), pp. 221-233, 2009.
- [12] Premanoch, P, "Estimation of Heterotrophic bacteria coefficient yield by using oxygen uptake rate measurement," Ramkamhaeng University journal. No.1. January-June 2015, pp. 48-59, 2015.
- [13] Gapes, D. and Keller, J, "Analysis of biological wastewater treatment processes using multicomponent gas phase mass balancing," Biotech. Bioeng, vol. 76, pp. 361-375, 2001.
- [14] Metcalf and Eddy, "Wastewater Engineering: Treatment and Reuse," (4th ed.). Botton: McGraw-Hill, 2003.
- [15] American Public Health Association (APHA), "Standard Methods for the examination of water and wastewater," (18th ed). APHa-AWWA-WEF. Washington D.C., 1995.
- [16] Muller, A. W., Wentzel, M. C. and Ekama, G. A, "Experimental determination of the heterotroph anoxic yield in anoxic-aerobic activated sludge systems treating municipal wastewater," Water SA, vol. 30(5), pp. 7-12. 2004.
- [17] Dicks, K, Pind, P.f., Mosbaek, H. and Henze, M, "Yield determination by respirometry – The possible influence of storage under aerobic

-
- condition in activated sludge,” Water SA, vol. 25(1), pp. 69-74, 1999.
- [18] Jeppsson, U, “Modeling aspects of wastewater treatment process. Ph. D. Thesis. Department of Industrial Electrical Engineering and Automation,” Lund Institute of Technology. Sweden [Online], Available:<http://www.iea.lth.se/~ielulf/publications/phd-thesis/PhD-thesis.pdf>,1996.

การพัฒนาสมการเพื่อทำนายการเคลื่อนตัวด้านข้าง ของเสาเข็มจากงานขุดดินลึกข้างเคียง

Development of Equations for Evaluating Lateral Pile Movement due to Nearby Deep Excavation

ดวงกมล ศิริรักษ์¹ ธนพงษ์ รักดีช่วย² พรเกษม จงประดิษฐ์² สุทธิวีร์ สุวรรณสวัสดิ์¹

¹สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

²สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาสมการเพื่อทำนายค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มที่เกิดจากงานขุดดินลึกในบริเวณใกล้เคียงเพื่อการประเมินเบื้องต้น สมการได้พิจารณาอิทธิพลปัจจัยที่ส่งผลต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็ม ได้แก่ ความแข็งแรงของชั้นดิน ความหนาของกำแพงกันดิน ความลึกการขุด ขนาดของเสาเข็ม รวมถึงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน โดยที่ไม่มีค่าตรวจวัดจริงในทางปฏิบัติ การศึกษานี้เสนอวิธีการสร้างข้อมูลเทียม(Artificial Data) จากการจำลองปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และนำข้อมูลที่ได้มาสร้างสมการโดยวิธีการวิเคราะห์เชิงถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปร (Multiple linear regression analysis) จากการศึกษาพบว่าผลการทำนายค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มจากสมการได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

คำสำคัญ : การเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็ม, งานขุดดินลึก, วิธีการวิเคราะห์เชิงถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปร

Abstract

This research presents the development of equations for preliminary evaluation on the lateral pile movement due to nearby deep excavation. All essentially considered parameters, i.e., soil strength, thickness of diaphragm wall, excavation depth, diameter of pile and thickness of soft clay are included in the developed equations. Due to that it is practically impossible to get the measurement data, the artificial data on pile movement have been generated from deformation analyses using finite element method. The equations are constructed by the multiple linear regression analysis of artificial data in conjunction to transformation technique. The prediction of the proposed equations can provide a good satisfaction to the pile movement data.

Keywords: Lateral pile movement, Deep excavation, Multiple linear regression

1. บทนำ

การก่อสร้างโครงสร้างใต้ดินด้วยการขุดลึกในพื้นที่ตัวเมืองที่มีสิ่งก่อสร้างอยู่ก่อนอย่างหนาแน่นอาจส่งผลกระทบต่ออาคารข้างเคียงที่มักมีฐานรากแบบเสาเข็มถึงแม้ว่าการใช้กำแพงกันดิน (Retaining wall) ป้องกันความเสียหายหากเสาเข็มอยู่ในระยะที่ใกล้มากในขั้นตอนการออกแบบงานขุดจึงจำเป็นต้องสามารถประเมินการเคลื่อนตัวของเสาเข็มจากการขุดลึกดังกล่าวเพื่อนำไปประเมินเสถียรภาพของโครงสร้างต่อไปอย่างไรก็ตามการประเมินในการออกแบบรายละเอียดต้องการการวิเคราะห์ขั้นสูงที่ต้องการผู้เชี่ยวชาญและวิธีวิเคราะห์ที่สามารถทำงานที่ซับซ้อนได้ การทำนายเบื้องต้นจึงมีความสำคัญที่จะประเมินว่าจำเป็นต้องวิเคราะห์รายละเอียดต่อไปหรือไม่ ที่ผ่านมามีการศึกษาถึงผลกระทบจากงานขุดลึกต่อเสาเข็มที่อยู่ใกล้อยู่พอสมควร เช่น [1] ที่มักเป็นการศึกษาที่พิจารณาแต่เฉพาะกรณีศึกษาหนึ่งๆแต่การประเมินแบบทั่วไปมีจำนวนน้อยมาก มีเพียง [2] ที่พัฒนาในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ ที่ทั้งที่ปัญหาดังกล่าวมีผลกระทบอย่างมากในเมืองใหญ่ที่การพัฒนาครุ่นหน้าไปมาก

ในงานขุดลึกมีการศึกษาเพื่อทำนายการเคลื่อนตัวของดิน และกำแพงกันดินรูปแบบต่างๆจำนวนหนึ่งมักนิยมเป็นรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มต่อความลึกการขุด กับ ปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของกำแพงกันดิน เช่น ความหนาของกำแพงกันดิน และอัตราส่วนความปลอดภัย [3,4] และระยะห่างจากบริเวณขุด[5]การศึกษาดังกล่าวต้องใช้ข้อมูลตรวจวัดในอดีตจำนวนที่มากพอในการพัฒนาสมการ จากข้อจำกัดดังกล่าวสมการที่ผ่านมามีมักอยู่ในรูปแบบฟังก์ชันกับปัจจัยอิทธิพลเพียงหนึ่งหรือสองตัว เพื่อแก้ไขข้อจำกัดเกี่ยวกับจำนวนข้อมูลตรวจวัดและปัจจัยอิทธิพล Kung et al.[6] ได้เสนอแนวคิดและวิธีการสร้างข้อมูลเทียมค่าการเคลื่อนตัวของดินและกำแพงกันดินจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขงานขุดลึกโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method, FEM) โดยมีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลวัดจริงกรณีศึกษา ก่อน ด้วยวิธีนี้สามารถได้ค่าการเคลื่อนตัวของดินและกำแพงกันดินจากตัวแปรปัจจัยอิทธิพลที่

หลากหลายมากขึ้นจากการวิเคราะห์ตัวแปร (Parametric study) ส่งผลให้สามารถคำนึงถึงปัจจัยอิทธิพลต่างๆที่มากขึ้นในการสร้างสมการได้สำหรับงานขุดลึกในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ได้มีความพยายามที่จะใช้หลักการดังกล่าว[7] ซึ่งเมื่อนำมาใช้ทำนายค่าตรวจวัดจริงของกรณีที่มีการเก็บรวบรวม ปรากฏว่าให้การทำนายในระดับที่น่าพอใจ

เนื่องจากการตรวจวัดค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในระหว่างขั้นตอนการก่อสร้างงานขุดลึกไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ขยายการนำวิธีดังกล่าวเพื่อพัฒนาสมการเพื่อทำนายการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ด้วยการวิเคราะห์เชิงถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปร(Multiple linear regression)ครอบคลุมปัจจัยอิทธิพลต่างๆ เช่น ความลึกของการขุดดิน ระยะห่างของเสาเข็มถึงกำแพงกันดิน คุณสมบัติต่างๆของชั้นดินและความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน เพื่อเป็นเครื่องมือในการประเมินเบื้องต้นผลกระทบจากการขุดลึกต่อเสาเข็มข้างเคียง

2. การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

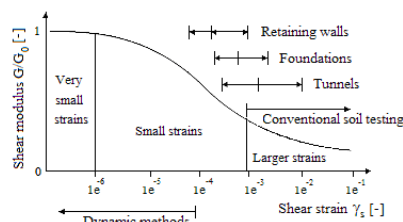
ในการสร้างสมการเพื่อประมาณค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ด้วยการวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบเชิงเส้น ให้ได้สมการที่แม่นยำ และครอบคลุมกับการใช้งาน จำเป็นต้องใช้ข้อมูลในการวิเคราะห์จำนวนมาก ซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมของเสาเข็มที่ได้รับผลกระทบจากการขุดดินลึกนั้นไม่มีการตรวจวัดจริงและการทดลองด้วยการจำลองเสมือนจริงนั้นก็ทำได้ค่อนข้างยาก มีค่าใช้จ่ายที่สูง และใช้เวลาในการทำนาน การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มในแต่ละกรณีด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถจำลองความซับซ้อนต่างๆได้ดี สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้โปรแกรม PLAXIS 3D เวอร์ชัน 2013.1[8]

2.1 ชนิดของแบบจำลองดิน (Soil model)

ชนิดของแบบจำลองดิน (Soil model) ในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นสิ่งที่ส่งผลต่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ โดยแบบจำลองสำหรับดินเหนียวในการศึกษานี้ คือแบบจำลอง HSsmall (Hardening

Soil model with small strain stiffness) [9,10] ซึ่งเป็นแบบจำลองดินแบบอิลาสโตพลาสติกที่พิจารณาค่าสตีเฟนของดินแบบอิลาสติก ในช่วงความเครียดต่ำ (small strain) ซึ่งเป็นช่วงของพฤติกรรมเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินดังรูปที่ 1 การใช้แบบจำลอง HSsmall ในการวิเคราะห์ มีตัวแปรสำคัญ คือ shear modulus (G_0) และ reference threshold shear strain ($\gamma_{0.7}$) ซึ่ง $\gamma_{0.7}$ เป็นค่า shear strain ในช่วงที่ $G/G_0 = 0.7$ [13] แบบจำลองชนิดนี้ได้ถูกตรวจสอบและนำมาใช้ในการวิเคราะห์การก่อสร้างต่างๆในชั้นดินกรุงเทพฯ [11]

สำหรับชั้นดินถม และชั้นทรายใช้แบบจำลองพฤติกรรมของดินแบบอิลาสติก-พลาสติกแบบสมบูรณ์ตามทฤษฎี Mohr-Coulomb (MC) โดยพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาได้อ้างอิงจากการศึกษาก่อนหน้า [11,12] ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะพฤติกรรมระหว่างค่าสตีเฟนและ

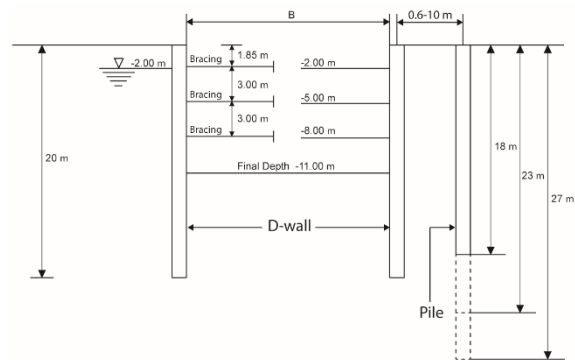
ความเครียดของดินในการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการก่อสร้างชนิดต่างๆ [9]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง ที่ใช้ศึกษา [7,11,12]

ตัวแปร	ดินถม	ดินเหนียวอ่อน	ดินเหนียวแข็ง	ทราย
แบบจำลอง	MC	HSsmall	HSsmall	MC
E' [kPa]	6000	-	-	80000
E_{oed}^{ref} [kPa]	-	4000-9000	34000-53000	-
E_{50}^{ref} [kPa]	-	4000-9000	34000-53000	-
E_{ur}^{ref} [kPa]	-	12000-27000	104000-158000	-
G_0^{ref} [kPa]	-	9000-20300	78300-118800	-
$\gamma_{0.7}$ [-]	-	1×10^{-4}	1×10^{-4}	-
γ_s [kN/m ³]	17	16	18	20
ν' [-]	0.3	0.33	0.33	0.2
ϕ' [°]	22	0	0	36
c [kPa]	15	15-34	87-132	1
m [-]	-	1	1	-

2.2 ลักษณะของแบบจำลอง

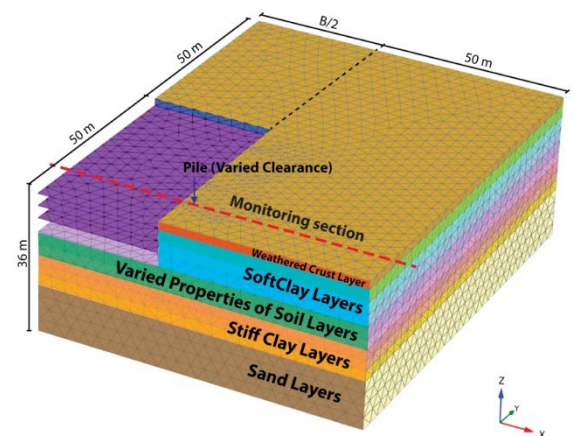
ความลึกของแต่ละชั้นในการขุดดิน รวมถึงขั้นตอนการทำงาน ระดับของค้ำยัน และตำแหน่งของเสาเข็ม ในกรณีต่างๆที่จำลองขึ้นมา แสดงดังรูปที่ 2 ความลึกของการขุดดิน อยู่ที่ 2, 5, 8 และ 11 เมตร ค้ำยันอยู่ที่ระดับ 1.85, 4.85, 7.85 และ 10.85 เมตร



รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของการขุดดินในการศึกษานี้

2.3 โครงข่ายแบบจำลอง

รูปที่ 3 แสดงให้เห็นถึงโครงข่าย (meshes) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยทำการวิเคราะห์ในรูปแบบ 3 มิติ โดยตำแหน่งของเสาเข็ม เป็นบริเวณที่ไม่ได้รับผลกระทบจาก corner effect และจากรูปให้เห็นว่าจะมีชั้นดินที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดิน (varied properties of soil layer) ดินชั้นดังกล่าว จะมีคุณสมบัติเป็นดินเหนียวอ่อน หรือดินเหนียวแข็งตามตารางที่ 1 ขึ้นอยู่กับช่วงความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนที่พิจารณาในแต่ละกรณี ซึ่งความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อนเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ดังจะอธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3 โครงข่ายแบบจำลองของกรณีศึกษา

ขนาดของโครงข่ายแบบจำลองในแนวราบ มีความกว้างและยาวถัดไปด้านหลังกำแพงกันดิน 50 เมตร ในแนวดิ่งจะมีความลึกครอบคลุมไปจนถึงความลึกสุดท้ายของชั้นทรายชั้นแรกประมาณ 36 เมตรจากผิวดิน เพื่อให้ครอบคลุมบริเวณทั้งหมดที่อาจจะได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนตัว นอกจากนี้ แบบจำลองกำหนดความกว้างของบริเวณที่ขุดดินเพียงหนึ่งในสี่เท่านั้น เพราะถือว่าการขุดมีลักษณะสมมาตร (symmetric) ชนิดของแบบจำลองของกำแพงกันดินจะจำลองในรูปแบบของแผ่นบาง (plate) และเสาเข็ม จะจำลองในรูปแบบของ embedded pile โดยพารามิเตอร์ของกำแพงกันดินและเสาเข็ม แสดงในตารางที่

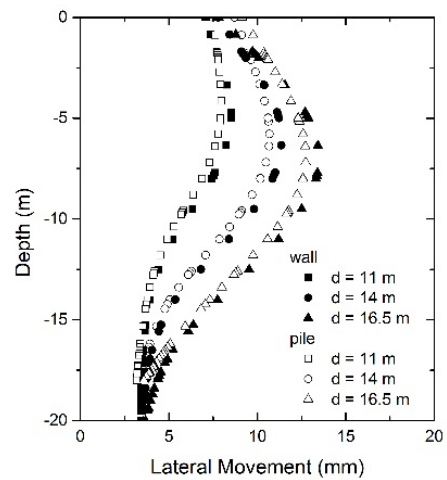
2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของกำแพงกันดินและเสาเข็มที่ใช้ในการศึกษา [7,11]

ตัวแปร	กำแพงกันดิน	เสาเข็ม
E [kPa]	1.5×10^7	2.6×10^7
ν [-]	0.15	0.15

2.4 ปัจจัยที่ใช้ในการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการศึกษาที่ผ่านมา [5,6] ได้แสดงให้เห็นถึงตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อ การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินซึ่งตัวแปรที่จะนำมาพิจารณาเพื่อสร้างข้อมูลเทียบได้แก่ ขนาดของบริเวณที่ทำการขุดดิน (B), ความลึกของการขุดดิน (H_c), ขนาดของกำแพงกันดิน (i) ซึ่งขนาดของกำแพงกันดินจะพิจารณาในรูปของ system stiffness ประกอบด้วย flexural stiffness (EI) ระยะห่างเฉลี่ยของค้ำยัน (h_{avg}) และหน่วยน้ำหนักของน้ำ (γ_w), ขนาดของเสาเข็ม (D) จะพิจารณา flexural stiffness (EI), ความลึกของเสาเข็ม (Depth), ระยะห่างระหว่างเสาเข็มกับกำแพงกันดิน (Clearance), Normalize shear strength (S_u/σ'_v) และ Normalize initial shear modulus (G_0/σ'_v) ของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง โดยงานวิจัยนี้ยังได้พิจารณาเพิ่มเติม ถึงผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นดินเหนียวอ่อน (d) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า เมื่อชั้นดินเหนียวอ่อนหนาขึ้น กำแพงกันดินและเสาเข็ม มีแนวโน้มการเคลื่อนตัวที่มากขึ้นเช่นกัน

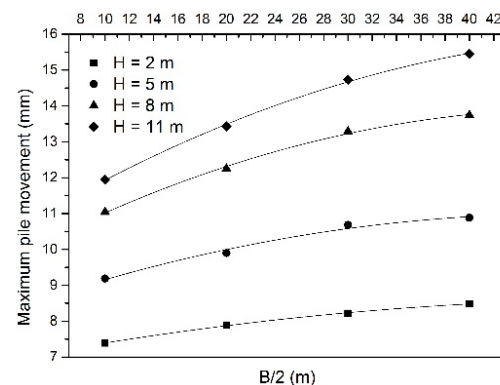


รูปที่ 4 การเคลื่อนตัวของกำแพงกันดินและเสาเข็ม

3. ขั้นตอนการสร้างสมการ

3.1 ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆและค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์

หลังจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แล้ว จะได้ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็ม ในแต่ละกรณี โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของเสาเข็มที่ได้จากแบบจำลองกับปัจจัยต่างๆเป็นความสัมพันธ์เป็นแบบพาราโบลา ตัวอย่างเช่นรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของการขุดดินโดยพิจารณาเพียงครั้งเดียว (B/2) ในแกน x กับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่เกิดขึ้น ในแกน y ซึ่งได้สมการของฟังก์ชันพาราโบลา แสดงในสมการที่ (1) ต้องนำไปเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้นเพื่อเข้าสู่การวิเคราะห์เชิงถดถอยต่อไป



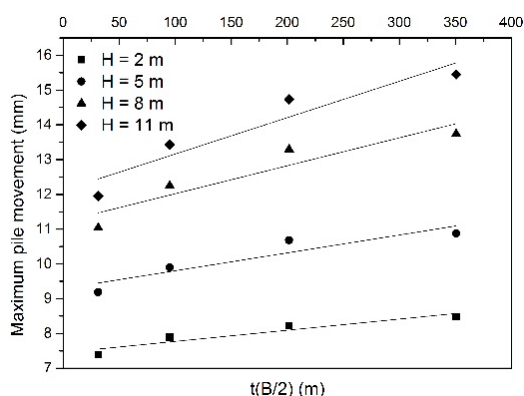
รูปที่ 5 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับตัวแปรที่พิจารณากรณีความกว้างของการขุดดิน โดยพิจารณาเพียงครั้งเดียว

$$X = t(x) = ax^2 + bx + c \quad (1)$$

โดยในงานวิจัยนี้ a , b , c คือสัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลา x คือ ค่าของตัวแปรก่อนการปรับแก้ X คือค่าของตัวแปรหลังการปรับแก้ ซึ่งขั้นตอนการปรับแก้อธิบายในหัวข้อถัดไป

3.2 วิธีการปรับแก้ความสัมพันธ์ของปัจจัยกับการเคลื่อนตัวให้อยู่ในรูปแบบเชิงเส้น

การสร้างสมการโดยวิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปร จำเป็นจะต้องทำให้ปัจจัยมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัว กับปัจจัย (ค่า x ในสมการ 1) ได้แก่ค่าปัจจัยต่างๆของซ้ายมือสุดของตารางที่ 3) ซึ่งยังไม่สัมพันธ์กับแบบเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้หลักการเปลี่ยนรูปแบบ (Transformation) ซึ่งในการศึกษานี้เลือกใช้ความสัมพันธ์แบบพาราโบลา (ตัวอย่างเช่น แทนค่า x ลงในสมการ(1)) เพื่อให้ได้ค่าแปลง (ค่า X ในสมการ(1)) ซึ่งค่าแปลงนี้จะมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด ดังรูปที่ 6 แสดงตัวอย่างของความสัมพันธ์ความกว้างของการขุดดินที่ปรับแก้แล้ว ($t(B/2)$) ในแกน x กับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่เกิดขึ้น ในแกน y



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดกับความกว้างของการขุดดินโดยพิจารณาเพียงครั้งเดียว หลังปรับรูปแบบ

การเลือกใช้ค่าปรับแก้สมการพาราโบลา จะพิจารณาเลือกจากเส้นกราฟที่มี R^2 สูงสุด แล้วนำไปใช้กับกราฟเส้นอื่นๆสำหรับปัจจัยเดียวกัน ซึ่งจากการเลือกใช้ค่า R^2 มีค่าตั้งแต่ 0.97-0.99 ตารางที่ 3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ตัว

คูณของสมการพาราโบลาของแต่ละปัจจัย โดยช่วงที่พิจารณาในตาราง หมายถึงช่วงของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ในการทำนายควรจะอยู่ในช่วงเดียวกันนี้

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลา

ตัวแปร	ช่วงที่พิจารณา	สัมประสิทธิ์ตัวคูณในสมการที่ (1)		
		a	b	c
$B/2$ [m]	10-40	0.213	-0.0019	9.99
H_e [m]	2-11	1.10772	-0.02842	6.04938
$\ln(EI/\gamma_w h_{avg}^4)$	6.1-8.2	-10.38488	0.49041	65.46978
$\ln(EI)[kN \cdot m^2]$	12.2-15	1.29571	-0.05233	2.83726
Depth [m]	15-23	-0.30217	0.00683	13.905
Clearance[m]	0.6-10	-0.53006	0.01075	9.65076
$S_{u,so}/\sigma'_v$	0.27-4	-29.8288	30.95466	17.32238
$S_{u,st}/\sigma'_v$	0.45-1.05	-0.67076	0.31429	8.54234
$G_{0,so}/\sigma'_v$	123-315	-0.13307	1.75E-04	28.66613
$G_{0,st}/\sigma'_v$	375-975	-0.00626	3.23E-06	10.96663
d [m]	11-16.5	0.8257	0.01988	-2.166

3.3 สร้างสมการด้วยการวิเคราะห์เชิงถดถอย

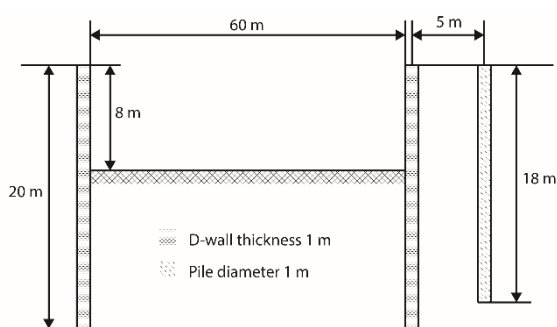
จากขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.2 นำปัจจัยที่ปรับค่าแล้วมาเข้ากระบวนการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปรเพื่อสร้างสมการสำหรับทำนายการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในงานขุดดินลึกแบบมีค้ำยัน ดังสมการที่ (2)และมีค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรสำหรับสมการ ดังตารางที่ 4

$$\delta_m = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + b_6X_6 + b_7X_7 + b_8X_8 + b_9X_9 + b_{10}X_{10} + b_{11}X_{11} \quad (2)$$

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร สำหรับสมการที่ (2)

Subscript	X	b
0	-	5.0462
1	$t(B/2)$	0.0081
2	$t(H_c)$	0.0481
3	$t(\ln(EI/\gamma_w h_{avg}^4))$	0.0186
4	$t(\ln(EI))$	0.0006
5	$t(\text{Depth})$	0.0053
6	$t(\text{Clearance})$	0.0916
7	$t(S_{u,so}/\sigma'_v)$	-0.7441
8	$t(S_{u,st}/\sigma'_v)$	3.4575
9	$t(G_{0,so}/\sigma'_v)$	0.0008
10	$t(G_{0,st}/\sigma'_v)$	0.0006
11	$t(d)$	0.0467

4. การทำนายค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม



รูปที่ 7 กรณีตัวอย่าง เพื่อแสดงการทำนายโดยใช้สมการ

ตัวอย่างการทำนายค่าการเคลื่อนตัวของด้านข้างของเสาเข็มจากงานชุดดินลึกข้างเคียง ที่มีลักษณะดังรูปที่ 7 และมีตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ ดังนี้

- ขนาดของงานชุด 60 เมตร ($B/2 = 30$ m)
- ชุดดินลึก 8 เมตร ($H_c = 8$ m)
- กำแพงกันดินหนา 1 เมตร ($E = 1.5 \times 10^7$ kPa, $I = 1/12$ m⁴, $\gamma_w = 9.81$ kN/m³, $h_{avg} = 3$ m และ $\ln(EI/\gamma_w h_{avg}^4) = 7.64848475$)
- เสาเข็มมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ($E = 2.6 \times 10^7$ kPa, $I = 0.0491$ m⁴ และ $\ln(EI) = 14.3263362$)
- เสาเข็มลึก 18 เมตร ($\text{Depth} = 18$ m)

- เสาเข็มมีระยะห่างจากกำแพงกันดิน 5 เมตร (Clearance = 5 m)

- บริเวณงานชุดมี Normalize shear strength ของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง 0.35 และ 0.75 ตามลำดับ ($S_{u,so}/\sigma'_v = 0.35$, $S_{u,st}/\sigma'_v = 0.75$)

- บริเวณงานชุดมี Normalize initial shear modulus ของดินเหนียวอ่อนและดินเหนียวแข็ง 210 และ 675 ตามลำดับ ($G_{0,so}/\sigma'_v = 210$, $G_{0,st}/\sigma'_v = 675$)

- บริเวณงานประกอบด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนหนา 14 เมตร อยู่ด้านบน และด้านล่างเป็นชั้นดินเหนียวแข็ง ($d = 14$ m)

ขั้นตอนที่ 1 คือการปรับแก้ค่าตัวแปร โดยแทนค่าของตัวแปรเป็นค่า x ในสมการที่ (1) และมีสัมประสิทธิ์ตัวคูณของสมการพาราโบลิกดังตารางที่ 3

ตัวอย่างเช่น $B/2 = x = 30$ m จากตารางที่ 3 a = 0.213, b = -0.0019 และ c = 9.99 แทนค่าในสมการที่ (1) ได้ $X = 201.633$ m ค่าปรับแก้ของตัวแปรอื่นๆแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตัวอย่างการปรับแก้ตัวแปร

ตัวแปร	x	X
$B/2$ [m]	30	201.633
H_c [m]	8	76.7161
$\ln(EI/\gamma_w h_{avg}^4)$	7.64848475	-538.2877
$\ln(EI)$	14.3263362	268.0241
Depth [m]	18	-83.8751
Clearance [m]	5	-3.547
$S_{u,so}/\sigma'_v$	0.35	24.5025
$S_{u,st}/\sigma'_v$	0.75	8.4008
$G_{0,so}/\sigma'_v$	210	-5840
$G_{0,st}/\sigma'_v$	675	-2840
d [m]	14	159.9495

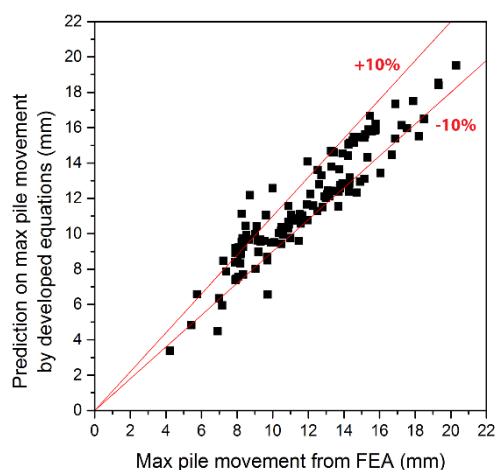
ขั้นตอนที่ 2 คือการนำค่าตัวแปรที่ปรับแก้แล้วมาประมาณค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ด้วยสมการที่ (2) ซึ่งมีสัมประสิทธิ์ของตัวแปร ดังตารางที่ 4 ที่ใช้ในสมการที่ (2) ของกรณีตัวอย่างนี้ แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สัมประสิทธิ์ของตัวแปร สำหรับสมการที่ (2)

Subscript	X	b	bX
0	-	5.0462	5.0462
1	201.633	0.0081	1.6332
2	76.7161	0.0481	3.69
3	-538.2877	0.0186	-10.0122
4	268.0241	0.0006	0.1908
5	-83.8751	0.0053	-0.4445
6	-3.5467	0.0916	-0.3249
7	24.5025	-0.7441	-18.2323
8	8.4008	3.4575	29.0458
9	-5840	0.0008	-4.672
10	-2840	0.0006	-1.7047
11	159.9495	0.0467	7.4696
ค่าการเคลื่อนตัวที่ประมาณได้ (δ_m)			11.685

จากตัวอย่างการใช้สมการ เพื่อทำนายค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของเสาเข็มจากงานขุดดินลึกข้างเคียง ในกรณีนี้ ได้ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของเสาเข็ม 11.685 มิลลิเมตร ซึ่งในเงื่อนไขเดียวกัน ได้ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างจากไฟไนต์เอลิเมนต์ 11.93 มิลลิเมตร

5. ผลการวิเคราะห์



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ทำนายโดยสมการกับค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

จากสมการที่พัฒนาขึ้นเมื่อนำมาใช้ทำนายกลับ การเคลื่อนตัวของเสาเข็มจากค่าปัจจัยอิทธิพลต่างๆ พบว่าค่าการเคลื่อนตัวที่ทำนายได้จากสมการที่ (2) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนตัวจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มีแนวโน้มเป็นที่น่าสนใจดังรูปที่ 7 คือ ชุดข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ใกล้เส้น 45 องศา และมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงขอบเขตร้อยละ 10 ของข้อมูล

6. สรุปผล

งานวิจัยนี้พัฒนาสมการสำหรับประเมินเบื้องต้นค่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มจากการขุดลึกในบริเวณใกล้เคียง โดยเสนอการใช้การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปรกับข้อมูลที่สร้างขึ้นจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ มีรูปแบบการใช้งานโดยการปรับแก้ค่าตัวแปรแต่ละตัวด้วยสมการพาราโบลา จากนั้นนำค่าที่ปรับแก้แล้วมาทำนายการเคลื่อนตัวด้านข้างด้วยสมการเส้นตรง

เมื่อเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวที่ทำนายได้จากสมการกับค่าการเคลื่อนตัวจากไฟไนต์เอลิเมนต์ได้การทำนายที่น่าพอใจถึงแม้ว่าจะมีการกระจายตัวอยู่บ้าง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยและวิชาการตามแผนกลยุทธ์เพื่อพัฒนาภาควิชาวิศวกรรมโยธา มจร. (CE-KMUTT 6001) นอกจากนี้ผู้เขียนขอแรกขอขอบคุณทุนวิจัยจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) และบริษัท ดี ที คอนสตรัคต์ เอเชีย จำกัด ภายใต้สัญญาเลขที่ MSD58I0136

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] C.F.Leung, Y.K. Chow, R.F. Shen, "Behavior of pile subject to excavation-induced soil movement," Journal of Geotechnical and Geoenv. Engrg, vol. 126, pp. 947-954, 2000.
- [2] H.G. Poulos, L.T. Chen, "Pile response due to excavation induced lateral soil movement," Journal of Geotechnical and Geoenv. Engrg, vol. 123(2), pp. 94-99, 1997.

-
- [3] A.I.Mana, and G.W.Clough, "Prediction of movements for braced cuts in clay," *Journal of Geotech. Engrg*, vol.107, pp. 759-777, 1981.
 - [4] C.Moormann, "Analysis of wall and ground movement due to deep excavation in soft soil based on a new worldwide database," *Soils and Foundations*, vol. 44, No. 1, pp.87-98, 2004.
 - [5] G.W.Clough, T.D.O'Rourke, "Construction induced movement of in situ walls," in *Proceeding of Design and Performance of Earth Retaining Structure*, Geotechnical Special Publication No. 25, pp. 493-470, 1990.
 - [6] G. T. C. Kung, C. H. Juang, E. C. L. Hsiao, Y.M. A. Hashash, "Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement cause by braced excavation in clays," *Journal of Geotechnical and GeoenvironmentEngineering*, vol. 133, pp. 731-747, 2007.
 - [7] A. Wonglert, P. Jongpradist, T. Kalasin, C. Submaneewong, W. Kongkitkul, S. Youwai, "Semi-Empirical Equations for Predicting Wall Movements Due to Deep Excavation in Bangkok Soft Soil" in *Proceeding of World Tunnel Congress 2012*, Bangkok.
 - [8] PLAXIS Version 8 Manual. A.A. Balkema Publishers, 2013.
 - [9] J.H. Atkinson, G.Sallfors, "Experimental determination of stress-strain-time characteristics in laboratory and in situ tests," in *Proceedings of 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Florence, vol. 3, pp. 915-956, 1991.
 - [10] T.Schanz, P.A.Vermeer, P.G.Bonnier, "The hardening soil model: formulation and verification," in *Proceedings of Beyond 2000 in Computational Geotechnics-10 years of Plaxis*, pp. 281-296, 1999.
 - [11] P.Jongpradist, T.Kaewsri, A.Sawatpanich, S.Suwansawat, S.Youwai, W.Kongkitkul, J.Sunitsakul, "Development of tunneling influence zones for adjacent pile foundationsby numerical analyses," *Tunnelling and Underground Space Technology* 34, pp.96-109, 2013.
 - [12] R.E.Prust, J.Davies, S.Hu, "Pressure meterinvestigation for mass rapid transit in Bangkok,Thailand," *Journal of the Transportation ResearchBoard*, Transportation Research of the NationalAcademies, Washington, DC, 1928, pp.207-217, 2005.
 - [13] S.Likitlersuang, S.Teachavorasinskun, C.Surarak, E.Oh, A.Balasubramaniam, "Small Strain stiffness and stiffness degradation curve of Bangkok Clays," *Journal of Soils and Foundations* 53(4), pp. 498-509, 2013.

การศึกษาสมรรถนะของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กรูปแบบ ต่างๆ ในการรับสรวายน้ำ

Study on Performance of Different Reinforced Concrete Structural Systems for Supporting Swimming Pool

กรกฎ สรณะสังจะชีพ รักติพงษ์ สหมิตรมงคล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยเฉพาะเรื่องฉบับนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตรับน้ำหนักสรวายน้ำ การศึกษาเริ่มจากการเปรียบเทียบพฤติกรรมของโครงสร้างระบบพื้น-คานจริงที่วัดได้กับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรม CSI ETABS จนได้แบบจำลองที่สามารถแสดงพฤติกรรมของโครงสร้างได้อย่างถูกต้อง จากนั้นนำแบบจำลองดังกล่าวไปวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างในระบบต่างๆ เช่น ระบบคานพื้น ระบบคานแบน ระบบพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา และระบบพื้นท้องเรียบ และทำการเปรียบเทียบโดยคำนึงถึงพฤติกรรม และความคุ้มค่า รวมถึงข้อควรระวังในการออกแบบและก่อสร้าง เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกวิธีการก่อสร้างโครงสร้างสรวายน้ำที่มีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างตัวอย่างได้อย่างเหมาะสม การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างสรวายน้ำในสภาวะการรับน้ำหนักด้วยโปรแกรม CSI ETABS เปรียบเทียบกับพฤติกรรมของโครงสร้างจริงที่วัดได้ พบว่าค่าการแอ่นตัวของพื้นและคานในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างอยู่ที่ร้อยละ 11.50 และ 10.18 ตามลำดับ เมื่อนำแบบจำลองดังกล่าวไปวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างในระบบต่างๆ ด้วยโปรแกรม CSI SAFE พบว่าค่าการโก่งตัวสูงสุด ค่าหน่วยแรงสูงสุด และค่าความกว้างของรอยร้าวสูงสุด มีค่าสูงขึ้นทั้งในระบบคานแบน ระบบพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา และระบบพื้นท้องเรียบ การก่อสร้างจึงต้องระมัดระวังในเรื่องการเสริมเหล็กในบริเวณที่มีค่าหน่วยแรงสูง รวมถึงบริเวณที่มีค่าความกว้างของรอยร้าวสูง จากการศึกษาในครั้งนี้ยังพบอีกว่าโครงสร้างระบบพื้นท้องเรียบช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายของแบบหล่อคอนกรีต รวมถึงใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างน้อยกว่าระบบคานพื้น

คำสำคัญ: ค่าการโก่งตัวสูงสุด / ค่าความกว้างของรอยร้าวสูงสุด / ค่าหน่วยแรงสูงสุด / ระบบพื้นคาน / คานแบน / พื้นท้องเรียบ / สรวายน้ำ

Abstract

This study aims to compare behavior of different concrete structural systems for supporting swimming pool under the service load through the use of CSI ETABS software. The study started by comparing between on-site behavior of actual structure and the analyzed behavior. The model was then calibrated and subsequently applied to analyze behavior of various structural systems (e.g., Beam-Slab, Band Beam,

Drop Panel, and Flat Slab). CSI SAFE software was applied to calculate the structural behavior of different floor systems. The comparison was done regarding the structural performance, worthiness, as well as cautions for design and construction. The results could be used as information for a suitable selection of structural system supporting swimming pool. It was found that the computational model applied in this study could predict deflections of slabs and beams in beam-floor system with an average discrepancy of 11.50 % and 10.18 %, respectively. When applying similar numerical model to simulate other structural systems by CSI SAFE, it was found that maximum deflection, maximum stress, and maximum crack width were higher in Band Beam, Drop Panel, and Flat Slab systems. As a result, one must be cautious on sufficient provision of reinforcement in the area with high stress. Additional steel mesh should also be provided in the area with high level of crack width. However, despite these additional requirements, it was found that the use of Flat Slab system can save cost of concrete formwork, and the duration of construction can also be shortened.

Keywords: Band Beam / Beam-Slab / Flat Slab / Maximum Crack Width / Maximum Deflection / Maximum Stress / Swimming pool

1. บทนำ

ในปัจจุบันโครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำมักจะเป็นส่วนประกอบหนึ่งของอาคารหลายแห่ง เช่น อาคารที่เป็นศูนย์กีฬา, โรงแรม รวมทั้งอาคารชุด ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะก่อสร้างโครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำเป็นระบบคานพื้น (beam – slab) โดยพื้นของสระว่ายน้ำจะก่อสร้างเป็นพื้นวางบนคาน ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองไม้แบบและเวลาในการก่อสร้าง เนื่องจากในการก่อสร้างต้องทำทีละชั้นตอนโดยจะต้องผูกเหล็กคาน ตั้งแบบคาน เทคอนกรีตคาน แล้วต้องเสียเวลาในการรื้อถอดแบบคาน จึงจะดำเนินการตั้งแบบพื้นผูกเหล็กพื้นและเทคอนกรีตพื้น และต้องรื้อระยะเวลาในการถอดแบบพื้นก่อนจึงจะสามารถดำเนินการในชั้นตอนต่อไปได้ นอกจากนี้โครงสร้างคานที่มีขนาดใหญ่อาจจะทำให้เกิดความยุ่งยากในการติดตั้งงานระบบอาคารได้ ดังกล่าวบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักในการเปรียบเทียบพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตรับน้ำหนักสระว่ายน้ำรูปแบบต่างๆ ซึ่งรวมถึง ระบบคาน-พื้น

(beam-slab) , ระบบคานแบน (band beam) , ระบบพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา (drop panel) และ ระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab) โดยคำนึงถึง สมรรถนะเชิงโครงสร้างและความคุ้มค่า เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินความเป็นไปได้ในการปรับเปลี่ยนรูปแบบของโครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำเป็นรูปแบบอื่นๆ ได้อย่างเหมาะสม

2. ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างและข้อกำหนดที่อ้าง

2.1 โครงสร้างสระว่ายน้ำต้นแบบที่ทำการศึกษา

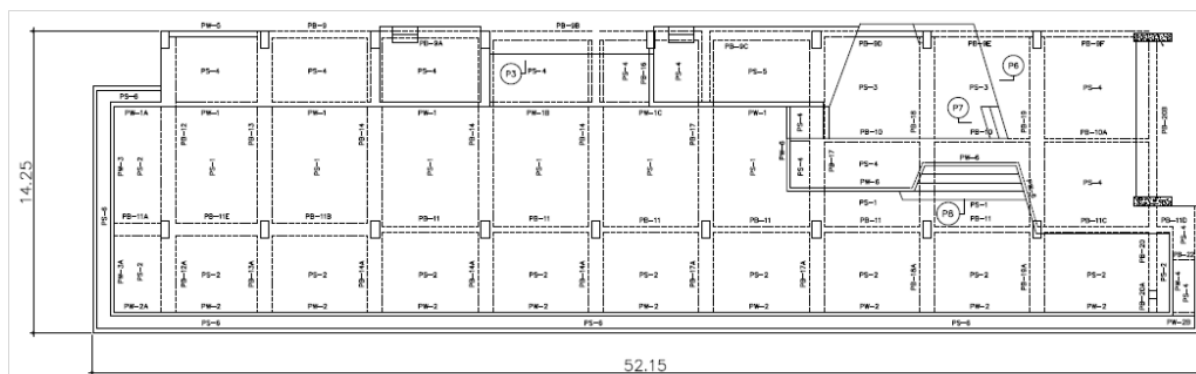
โครงสร้างที่ใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาครั้งนี้ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของอาคารชุด 24 ชั้น จากรูปที่ 1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

(1) สระว่ายน้ำมีขนาดกว้าง 5 เมตร, ยาว 50 เมตร, มีความลึกอยู่ระหว่าง 1.20-1.25 เมตร (ความลึกของสระว่ายน้ำไม่คงที่เนื่องจากพื้นสระน้ำมีความลาดเอียง

(2) รับน้ำหนักบรรทุกทุกตายตัวที่ไม่ใช่ น้ำหนักของตัวพื้นเอง (super-imposed dead load) $1,000\text{kg./m.}^2$ และ

รับน้ำหนักบรรทุกจรที่เป็นน้ำหนักของน้ำ 1,200-1,250

kg./m.² (ขึ้นอยู่กับความลึกของสระว่ายน้ำ)



รูปที่ 1 แพลนโครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำระบบคานพื้น (beam-slab)

(3) กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบก้อนตัวอย่าง 28 วัน ของพื้นและผนังมีค่าเท่ากับ 331 kg./m.² และ กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเสาเท่ากับ 414kg./cm.²

(4) ใช้เหล็กเสริมมีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากเท่ากับ 5,118 kg./cm.² (เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบ)

2.2 ข้อกำหนดและเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้

ในการวิเคราะห์และออกแบบแผ่นพื้น โครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงวิศวกรรมในแต่ละรูปแบบ จะต้องมีการตรวจสอบกับข้อกำหนดและเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้เพื่อเป็นแนวทางในการประเมินสมรรถนะของโครงสร้าง โดยในการศึกษานี้จะมีเกณฑ์พิจารณาดังนี้

ตารางที่ 1 ค่าการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ EN 1992-1-1:2004 , Section 7.4.1 [1]

ลักษณะของแผ่นพื้น	ค่าที่ยอมให้
พื้นที่ไม่รองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (non-structural) ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวมากได้	L/250
พื้นที่รองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (non-structural) ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวมากได้	L/500

ตารางที่ 2 ความกว้างของรอยร้าวสูงสุดที่ยอมให้ตามมาตรฐาน BS 8007:1987 [2]

สถานะเปิดเผยต่างๆ	ความกว้างสูงสุดของรอยร้าว (มม.)
โครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำหรือกันน้ำ	0.2
โครงสร้างที่สัมผัสกับน้ำหรือกันน้ำที่ต้องการความสวยงามของพื้นผิว	0.1

2.3 การวิเคราะห์และออกแบบระบบแผ่นพื้นของ

โปรแกรม CSI SAFE

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองรูปแบบของโครงสร้างเสร็จแล้วจึงกำหนดให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์ตรวจสอบค่าที่ทุกหน้าตัดของการออกแบบ ซึ่งโปรแกรมจะแสดงผลของการวิเคราะห์ให้เห็น เช่น ลักษณะของการโก่งตัวของแผ่นพื้น และแสดงหน่วยแรงที่คำนวณได้นั้นผ่านตามข้อกำหนดของมาตรฐานหรือไม่ และหากมีหน้าตัดของการออกแบบใดที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่ยอมให้จำเป็นต้องเพิ่มเหล็กเสริมรับแรงเฉือนบริเวณหัวเสา หรือบางครั้งกรณีเหล็กเสริมยังไม่เพียงพออาจต้องเพิ่ม Drop Panel บริเวณหัวเสา เมื่อทำการแก้ไขแบบจำลองรูปแบบของโครงสร้างเสร็จแล้วจึงกำหนดให้โปรแกรมตรวจสอบผลอีกครั้ง และเมื่อผลการวิเคราะห์ของโปรแกรมผ่านข้อกำหนดแล้วจึงกำหนดให้โปรแกรมแสดงรายละเอียด

ของเหล็กเสริม โดยโปรแกรมจะทำการกำหนดเหล็กเสริมและคำนวณปริมาณให้โดยอัตโนมัติ

3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 การตรวจสอบพฤติกรรมของโครงสร้างรับสรวายน้ำระบบคาน-พื้น และเปรียบเทียบกับแบบจำลอง

3.1.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำในโปรแกรมวิเคราะห์ CSI SAFE

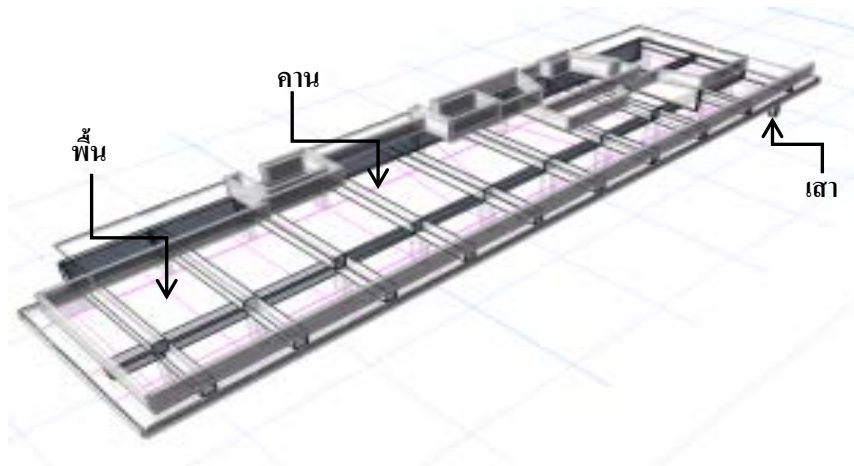
ในขั้นตอนการศึกษานี้ได้นำโปรแกรม CSI SAFE ซึ่งเป็นโปรแกรมที่วิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างมาใช้วิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำ โดยมีขั้นตอนและรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์ของระบบแผ่นพื้นคานคอนกรีตเสริมเหล็กและกำหนดหน่วยที่ใช้สำหรับการแสดงผลของโปรแกรมเป็นกิโลกรัมและมิลลิเมตร โดยกำหนดคุณสมบัติวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ได้จากการทดสอบก่อนตัวอย่าง 28 วันเท่ากับ

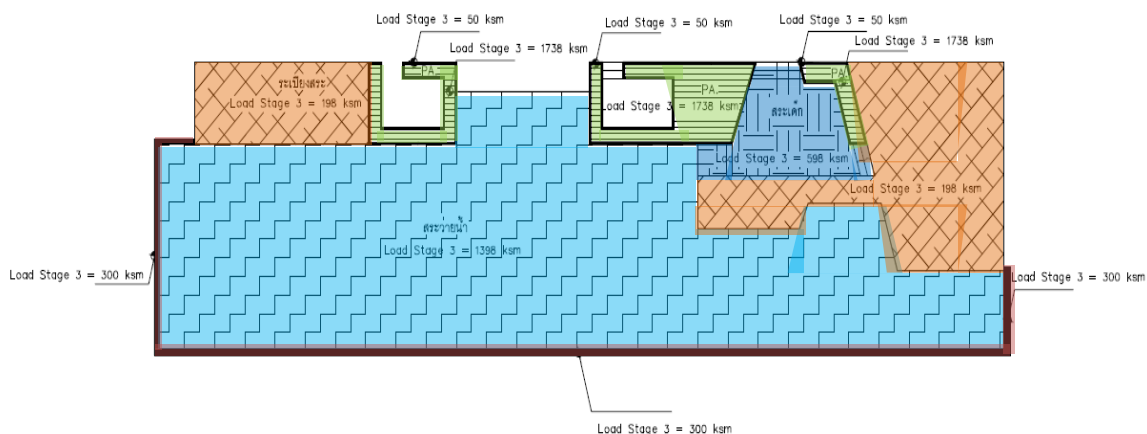
331 kg./cm.² กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเสาเท่ากับ 414 kg./cm.² และใช้เหล็กเสริมมีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากเท่ากับ 5,118 kg./cm.² (เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบ) ตามลำดับให้กับโปรแกรม

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดรูปแบบน้ำหนักบรรทุกให้กับโปรแกรมดังรูปที่ 3

รูปที่ 3 แสดงน้ำหนักบรรทุกตามจริงในสภาวะการรับน้ำหนักเป็นพื้นที่ ซึ่งในแต่ละพื้นที่จะมีน้ำหนักบรรทุกที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากในแต่ละพื้นที่จะมีวัสดุปิดผิวและมีการใช้งานที่แตกต่างกันไป เช่น พื้นที่ที่เป็นสรวายน้ำวัสดุปิดผิวจะเป็นกระเบื้องเพราะฉะนั้นน้ำหนักบรรทุกจะเกิดจากการรวมน้ำหนักกระเบื้องและน้ำหนักของน้ำ ในการคิदनน้ำหนักบรรทุกตามจริงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม CSI SAFE ให้ผลที่ถูกต้อง



รูปที่ 2 แบบจำลองไฟไนต์อีลีเมนต์ของระบบแผ่นพื้นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



รูปที่ 3 ลักษณะน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำที่กำหนดให้กับโปรแกรม

ขั้นตอนที่ 3 อ่านค่าการแอ่นตัวของพื้นและคาน โครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำจากการวิเคราะห์ของ โปรแกรม CSI SAFE เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการแอ่นตัวของพื้นและคาน โครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำที่วัด ได้จริงว่ามีผลที่เหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร

3.1.2 การตรวจวัดการแอ่นตัวของโครงสร้างรับ น้ำหนักสระว่ายน้ำ

ในการตรวจวัดการแอ่นตัวของโครงสร้างรับสระว่ายน้ำมีขั้นตอนดังนี้

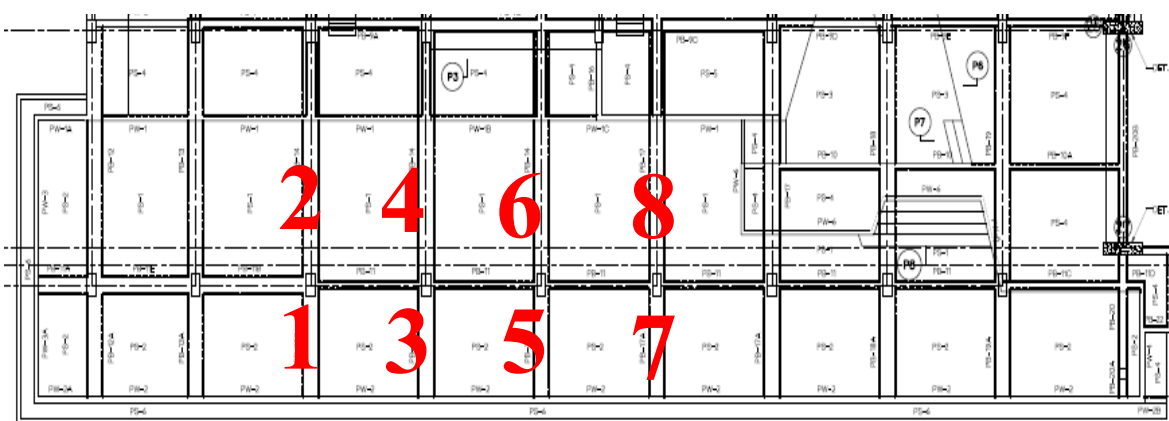
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดตำแหน่งการวัดการแอ่นตัวของ พื้นและคาน โดยคำนึงถึงตำแหน่งที่คาดว่าจะอยู่ในช่วงการ

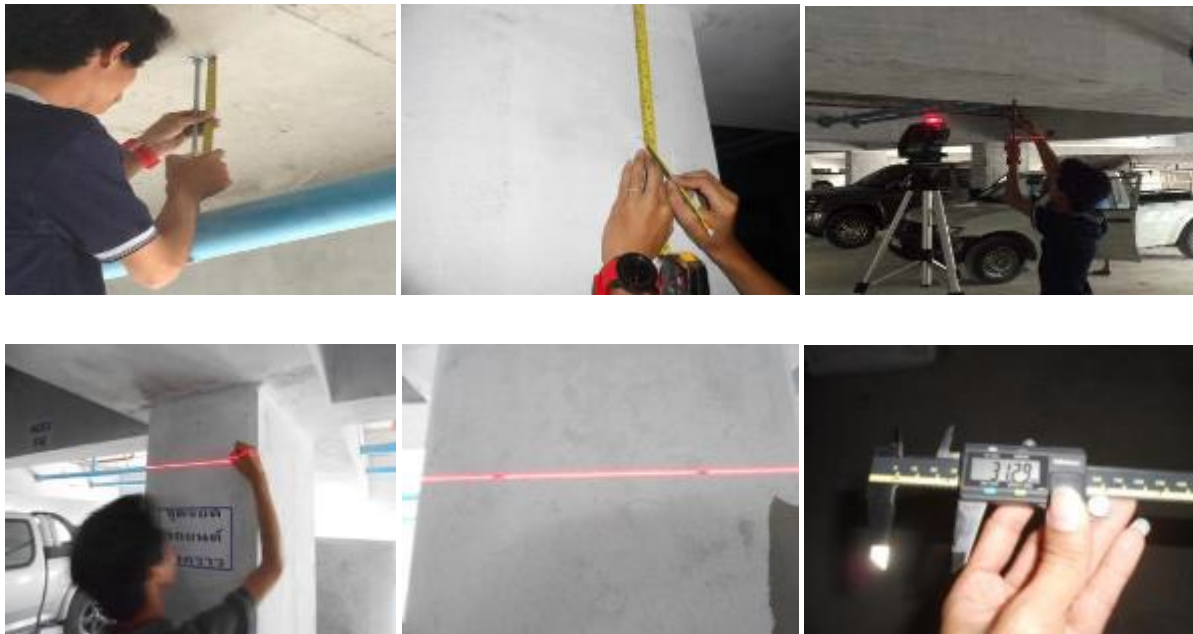
แอ่นตัวสูงสุดของโครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำ ดัง แสดงในรูปที่ 4 และ 5

จากรูปที่ 4 และ 5 แสดงตำแหน่งที่อ่านค่าการแอ่นตัวของ คานรับสระว่ายน้ำและพื้นสระว่ายน้ำ โดยกำหนดเป็น ตัวเลขเพื่อแสดงตำแหน่งในการวัดค่าการแอ่นตัวในแต่ละ ตำแหน่ง ซึ่งในการกำหนดตำแหน่งในการวัดค่าการแอ่น ตัวเหล่านี้จะคำนึงถึงตำแหน่งที่น่าจะเกิดการแอ่นตัวสูง เนื่องจากตำแหน่ง 2,4,6 และ 8 เป็นตำแหน่งในโซนสระ ว่ายน้ำจึงทำให้เป็นบริเวณที่รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ส่วน ในตำแหน่งหมายเลข 1,3,5 และ 7 เป็นตำแหน่งที่พื้นและ คานยื่นออกไปจากองค์อาคารหลัก และเพื่อให้ได้ผลการ วัดค่าการแอ่นตัวที่ถูกต้อง จะทำการวัดในสภาวะการรับ



รูปที่ 4 ตำแหน่งที่กำหนดในการอ่านค่าการแอ่นตัวของพื้นสระว่ายน้ำ





รูปที่ 6 ตำแหน่งและระดับอ้างอิงที่หน้างานในการวัดการแอ่นตัวของพื้นและคาน โครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำ

น้ำหนักระดับต่างๆ (load stage) เพื่อเปรียบเทียบผลการวัดในแต่ละตำแหน่งและในแต่ละสถานะการรับน้ำหนัก ระดับต่างๆว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่อย่างไร

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดตำแหน่งและระดับอ้างอิงบริเวณท้องพื้นและคาน เพื่อวัดการแอ่นตัวของพื้นและคาน โครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 6 ระดับอ้างอิงได้รับการกำหนดโดยวัดจากท้องพื้นหรือคานลงมา เป็นระยะ 30 เซนติเมตร เพื่อเป็นระดับอ้างอิงในการใช้เวอร์เนียร์ คาร์ลิปเปอร์วัดค่าการแอ่นตัวของพื้นและคาน โครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำ โดยเมื่อกำหนดระดับอ้างอิงได้แล้ว จะใช้เครื่องเลเซอร์จับระดับตามเส้นที่กำหนดเป็นระดับอ้างอิง แทนการใช้เชือกหรือเอ็นซิง เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดจากการหย่อนตัวของเอ็นซิง

3.2 การวิเคราะห์สมรรถนะของพื้นโครงสร้างรับสรวายน้ำรูปแบบต่างๆ

การศึกษานี้ได้นำโปรแกรม CSI SAFE มาใช้วิเคราะห์และออกแบบแผ่นพื้นโครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

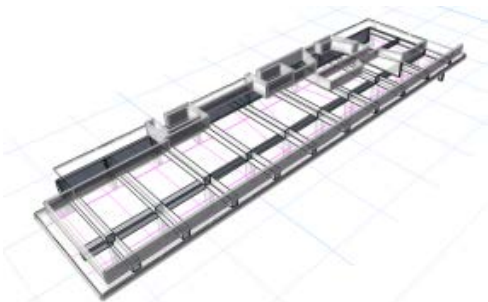
ขั้นตอนที่ 1 กำหนดหน่วยที่ใช้สำหรับการแสดงผลของโปรแกรมเป็น kgf.m. และ ตัวคูณลดกำลังสำหรับ

โมเมนต์ดัด 0.9 และแรงเฉือน 0.75 ตามมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบซึ่งในที่นี้ใช้ของ ACI 318- 14 [3] และกำหนดคุณสมบัติวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ได้จากการทดสอบก่อนตัวอย่าง 28 วันเท่ากับ 331 kg./cm.^2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตเสาเท่ากับ 414 kg./cm.^2 และใช้เหล็กเสริมมีกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก เท่ากับ $5,118 \text{ kg./cm.}^2$ (ค่าจากการทดสอบ)

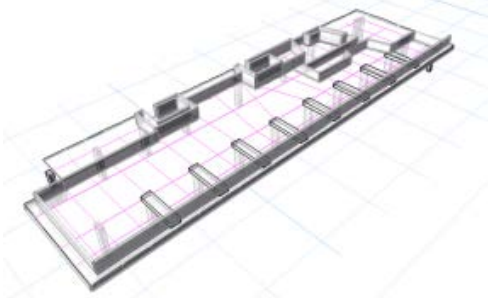
ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์โครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำในรูปแบบต่างๆเพื่อการเปรียบเทียบสมรรถนะในทางวิศวกรรม สำหรับการศึกษานี้ได้กำหนดไว้ 4 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยที่กำหนดระบบโครงสร้างคือระบบคานพื้น (beam-slab), ระบบคานแบน (band-beam), ระบบพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา (drop panel), และระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab)

รูปที่ 7 แสดงแบบจำลองระบบโครงสร้างแต่ละแบบซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

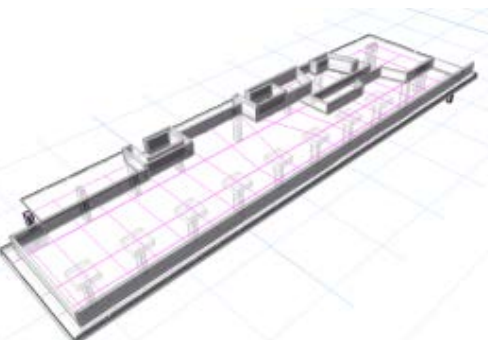
(1) แบบจำลองระบบโครงสร้างคานพื้น (beam-slab) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยคาน และพื้น โดยที่ พื้นของสรวายน้ำจะก่อสร้างเป็นพื้นวางบนคาน ซึ่งเหมือนเสาและคานของ อาคารที่ทำการตรวจสอบ



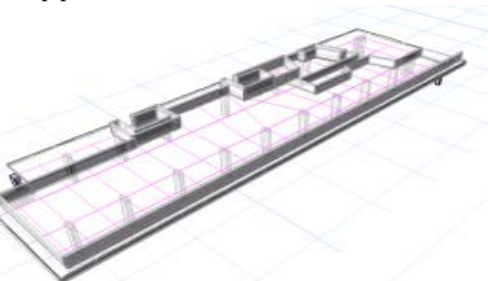
(ก.) แบบจำลองระบบโครงสร้างคานพื้น (beam-slab)



(ข.) แบบจำลองระบบโครงสร้างคาน แบน (band-beam)



(ค.) แบบจำลองระบบโครงสร้างพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา (drop panel)



(ง.) แบบจำลองระบบโครงสร้างพื้นท้องเรียบ (flat slab)

รูปที่ 7 แบบจำลองระบบโครงสร้างที่ศึกษาในโปรแกรม

CSI SAFE

(2) แบบจำลองระบบโครงสร้างคานแบน (band beam) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยคานแบน (band beam) และพื้น ซึ่งคานแบนจะมีขนาดความกว้าง 1.00 เมตร และหนา 0.45 เมตร โดย ที่คานแบนจะถูกจัดวางในตำแหน่งที่เป็นพื้น สระว่ายน้ำที่ขึ้นออกจากกองอาคารหลัก เพื่อช่วยลดค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างรับน้ำหนักสระว่ายน้ำ

(3) แบบจำลองระบบโครงสร้างพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา (drop panel) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วย แป้นหัวเสา (drop panel) เพื่อช่วยในการรับ-ถ่ายแรงเฉือนและโมเมนต์คดขันดลระหว่างแผ่นพื้นกับเสา ซึ่งมีขนาดความกว้างและความยาว 2.25 X 2.25 เมตร และหนา 0.50 เมตร

(4) แบบจำลองระบบโครงสร้างพื้นท้องเรียบ (flat slab) เป็นโครงสร้างระบบแผ่นพื้น ไร้คานที่มีลักษณะของแผ่นพื้นท้องเรียบที่รองรับโดยเสา ซึ่งจะต้องเพิ่มเหล็กเสริมเพื่อรับแรงเฉือนบริเวณหัวเสา รวมถึงจะต้องเพิ่มความหนาของแผ่นพื้นจาก ความหนาเดิม 22 เซนติเมตร เป็น ความหนา 27 เซนติเมตร เพื่อลดค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างรับ น้ำหนักสระว่ายน้ำด้วย

ขั้นตอนที่ 3 วิเคราะห์แผ่นพื้นของแต่ละกรณีศึกษา เพื่อหาค่าและลักษณะการโก่งตัวของแผ่นพื้น, หน่วยแรงที่คำนวณได้ และความกว้างของรอยร้าวสูงสุดที่ตำแหน่งต่างๆ หลังจากนั้นนำค่าดังกล่าวข้างต้น มาตรวจสอบกับค่าตามเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้ โดย ค่าการโก่งตัวสูงสุดของแผ่นพื้นที่โปรแกรมวิเคราะห์ได้จะนำมาตรวจสอบกับเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้ตาม EN 1992-1-1:2004, Section 7.4.1 [1] และค่าความกว้างของรอยร้าวสูงสุดที่โปรแกรมวิเคราะห์ได้จะนำมาตรวจสอบกับเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้ตาม BS 8007:1987 [2] เมื่อผลการวิเคราะห์ของโปรแกรมผ่านข้อกำหนดแล้วจึงกำหนดให้โปรแกรมแสดงรายละเอียดการเสริมเหล็ก รวมถึงปริมาณของเหล็กเสริม

3.3 การเปรียบเทียบเรื่องระยะเวลาการทำงาน และค่าใช้จ่าย

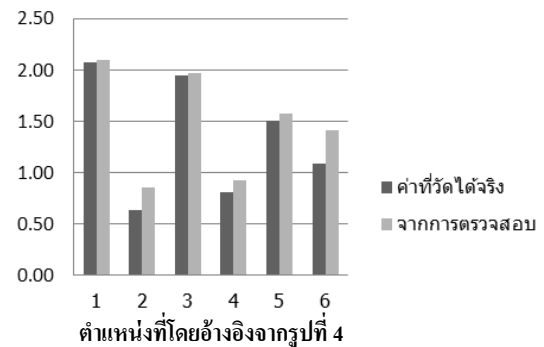
เมื่อออกแบบแผ่นพื้นโครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำของแต่ละกรณีศึกษาเสร็จแล้ว จากนั้นทำการหาปริมาณวัสดุ เพื่อใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบราคาก่อสร้าง และ คำนวณระยะเวลาในการก่อสร้างเพื่อเปรียบเทียบของระบบโครงสร้างในแต่ละรูปแบบ โดยการคำนวณราคาก่อสร้างจะอ้างอิงข้อมูลจากบัญชีค่าวัสดุและค่าแรงงานสำหรับปีงบประมาณ 2558/2559 ของสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน [4] และการคำนวณระยะเวลาในการก่อสร้างจะอ้างอิงข้อมูลจากสถิติปริมาณงานก่อสร้างเฉลี่ยต่อวัน ของสำนักพัฒนามาตรฐานระบบอุตสาหกรรม [5]

4. ผลการวิเคราะห์

4.1 พฤติกรรมของโครงสร้างรับสรวายน้ำระบบคาน-พื้น และเปรียบเทียบกับแบบจำลอง

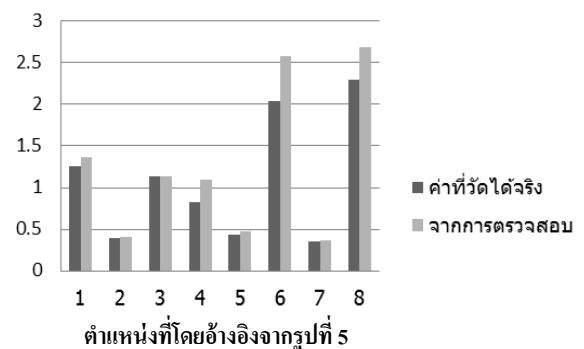
จากผลการวิเคราะห์การแอ่นตัวของพื้นและคานโครงสร้างสรวายน้ำด้วยโปรแกรม CSI SAFE เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการแอ่นตัวของพื้นและคานโครงสร้างสรวายน้ำที่วัดได้จากงานจริงจะได้ผลการเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 8 และ รูปที่ 9

ค่าการแอ่นตัว (มม.)



รูปที่ 8 ค่าการแอ่นตัวของพื้นสรวายน้ำระบบคาน-พื้น (beam-slab) ที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าการแอ่นตัวของพื้นสรวายน้ำที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CSI SAFE

ค่าการแอ่นตัว (มม.)



รูปที่ 9 ค่าการแอ่นตัวของคานสรวายน้ำระบบคาน-พื้น ที่วัดได้เปรียบเทียบกับค่าการแอ่นตัวของคานสรวายน้ำที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CSI SAFE

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบความแตกต่างในด้านสมรรถนะของพื้น โครงสร้างรับสรวายน้ำในแต่ละกรณีศึกษา

ระบบ โครงสร้าง	ค่าการโก่งตัว สูงสุดของพื้น (mm.)	ค่าหน่วยแรงสูงสุด(kg/cm ²)				ค่าความกว้างรอยร้าวสูงสุด (mm.)	
		พื้นผิวล่าง		พื้นผิวบน		พื้นผิวล่าง	พื้นผิวบน
		ดึง	อัด	ดึง	อัด		
คาน-พื้น	1.51	46.42	45.50	194.99	29.69	0.186	0.176
คานแบน	4.19	90.57	442.63	627.64	55.11	0.193	0.193
พื้นที่รองรับ มีเป็นหัวเสา	9.25	74.49	334.86	472.25	42.59	0.196	0.197
พื้นที่รองรับ	13.20	179.16	554.81	939.79	35.11	0.221	0.223

จากรูปที่ 8 และ รูปที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของพื้นและคานจากการวิเคราะห์กับค่าที่วัดได้จริงพบว่าค่าการแอ่นตัวของพื้นในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างอยู่ที่ 11.50 % และ 10.18 % ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์ให้ค่าที่ไม่แตกต่างจากโครงสร้างจริงมากจนเกินไป และน่าจะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของพื้นระบบอื่นๆ ได้ อย่างไรก็ตามผลจากการวิเคราะห์มีแนวโน้มมากกว่าผลจากการตรวจสอบ ซึ่งอาจเป็นเพราะความต่อเนื่องของระบบโครงสร้างระหว่างระบบโครงสร้างสรวายน้ำกับโครงสร้างอาคารจึงทำให้มีการกระจายของสดีฟเนสไปยังโครงสร้างอาคาร และส่งผลให้ค่าการโก่งตัวของพื้นน้อยกว่าค่าการโก่งตัวที่ได้จากการวิเคราะห์เล็กน้อย

4.2 สมรรถนะของพื้นโครงสร้างรับสรวายน้ำรูปแบบต่างๆ

จากผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CSI SAFE นั้นแสดงพฤติกรรมที่ไม่แตกต่างจากโครงสร้างจริงมากจนเกินไป และน่าจะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของพื้นระบบอื่นๆ ได้ ซึ่งค่าการโก่งตัวสูงสุด, ค่าความกว้างรอยร้าวสูงสุด และค่าหน่วยแรงสูงสุดของพื้นในระบบโครงสร้างทั้ง 4 รูปแบบ สามารถแสดงดังตารางที่ 3

(1) ค่าการโก่งตัวสูงสุดของพื้นในระบบคานพื้น (beam-slab) มีค่าน้อยที่สุด และในระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab) มีค่าการโก่งตัวของพื้นมากที่สุด เมื่อ เปลี่ยนรูปแบบระบบโครงสร้างจากคาน-พื้น (beam-slab) เป็นคานแบน (band-beam), ระบบพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา (drop panel) และ ระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab) พบว่าค่าการโก่งตัวมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่าที่มากที่สุดเท่ากับ 13.20 มม. ใน ระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab) จากกระยะการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ตามมาตรฐาน EN 1992-1-1:2004, Section 7.4.1 [1] เมื่อพิจารณาโครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำที่ทำการศึกษาใน ครั้งนี้จัดอยู่ในลักษณะ ของแผ่นพื้นที่ไม่รองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง(non-

structural) ซึ่งอาจเสียหายจากการโก่งตัวมากเกินไป เนื่องจากโครงสร้างรับน้ำหนัก สรวายน้ำดังกล่าวไม่มีส่วนใดที่เชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (non-structural) ดังนั้นการพิจารณาการโก่งตัวตามตารางที่ 1 จะพิจารณาจากการโก่งตัวทันทีเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกจรซึ่งจะต้องมีค่าน้อยกว่า $L/250$ หรือ 15.20 มม.

(2) ในการวิเคราะห์ค่าความกว้างรอยร้าวสูงสุดของโปรแกรม CSI SAFE จะคำนวณค่าความกว้างของรอยร้าวตามสมการในมาตรฐาน EN 1992-1-1:2004, Section 7.3.4 [1] จากตารางที่ 3 พบว่าค่าความกว้างรอยร้าวสูงสุดของพื้นผิวล่างและผิวบนในระบบคานพื้น (beam-slab) มีค่าน้อยที่สุด ส่วนในระบบคานแบน (band beam) และ ระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab) มีค่าความกว้างรอยร้าวสูงสุดของพื้นผิวล่างมากที่สุด ส่วนในระบบพื้น ท้องเรียบ (flat slab) มีค่าความกว้างรอยร้าวสูงสุดของพื้นผิวบนมากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.223 มม. จากตารางที่ 2 ค่าความกว้างของรอยร้าวสูงสุดที่ยอมให้ตามมาตรฐาน BS 8007:1987 [2] คือเท่ากับ 0.2 มม. ดังนั้นโครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำที่ทำการศึกษาในครั้งนี้พบว่าค่าความกว้างรอยร้าวสูงสุดในระบบพื้นท้องเรียบเกินเกณฑ์มาตรฐาน BS 8007:1987 [2]

(3) ในการวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงสูงสุดของพื้นผิวบนและผิวล่าง ค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เป็นบวกคือค่าการรับแรงดึงสูงสุด (tension stress) และค่าที่เป็นลบคือค่าการรับแรงอัดสูงสุด (compressive stress) จากการวิเคราะห์ของโปรแกรม CSI SAFE พบว่าค่าหน่วยแรงสูงสุดที่เป็นหน่วยแรงดึงและแรงอัดของพื้นผิวบนและผิวล่าง ของพื้นในระบบคาน-พื้น (beam-slab) มีค่าน้อยที่สุด ส่วนในระบบคานแบน (band beam) พบว่าค่าหน่วยแรงสูงสุดของพื้นผิวบนซึ่งเป็นหน่วยรับแรงอัดสูงสุดของพื้นมีค่ามากที่สุด และในระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab) จะมีค่าหน่วยแรงสูงสุดของพื้นผิวล่างซึ่งเป็นหน่วยรับแรงดึงและรับแรงอัดมีค่ามากที่สุด

เมื่อเปลี่ยนรูปแบบระบบโครงสร้างจากคาน-พื้นเป็นระบบคานแบน ,ระบบพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา และระบบพื้นท้องเรียบ พบว่าค่าหน่วยแรงสูงสุดมีค่าเพิ่มมาก

ขึ้น ซึ่งค่าที่มากที่สุดคือในระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab) ซึ่งในการวิเคราะห์โครงสร้างของโปรแกรม CSI SAFE ถ้าตำแหน่งใดมีค่าหน่วยแรงสูงสุดมากก็จะมีเสริมเหล็กใน ตำแหน่งนั้นมากขึ้นด้วยเพื่อช่วยในการรับหน่วยแรงสูงสุด และให้ผ่านตามมาตรฐาน ACI 318-14 [3].

4.3 ระยะเวลาการทำงาน และ ค่าใช้จ่าย

เมื่อออกแบบแผ่นพื้น โครงสร้างรับน้ำหนักสรวายน้ำ ของแต่ละกรณีศึกษาเสร็จแล้วจากนั้น ทำการหาปริมาณวัสดุ ซึ่งได้แก่ปริมาณคอนกรีตและไม้แบบที่ใช้ รวมไปถึงถึงปริมาณเหล็กเสริมด้านทานแรงเฉือนและเหล็กตะแกรง เพื่อใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบราคาก่อสร้างและคำนวณระยะเวลาในการก่อสร้างเพื่อเปรียบเทียบของระบบโครงสร้างในแต่ละรูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 4 และตารางที่ 5 โดยการคำนวณราคาก่อสร้างจะอ้างอิงข้อมูลจากเอกสารบัญชีค่าวัสดุและค่าแรงงานสำหรับปีงบประมาณ 2558/2559 ของสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน [4] และการคำนวณระยะเวลาในการก่อสร้างจะอ้างอิงข้อมูลจากเอกสารสถิติปริมาณงาน

ก่อสร้างเฉลี่ยต่อวัน ของสำนักพัฒนามาตรฐานระบบวัสดุภาครัฐ [5]

จากตารางที่ 4 สามารถสรุปได้ดังรายการต่อไปนี้

(1) ในระบบโครงสร้างที่เป็นระบบคานพื้น (beam-slab) มีปริมาณวัสดุที่ต้องใช้และงบประมาณการก่อสร้างสูงที่สุด

(2) ในระบบโครงสร้างที่เป็นระบบพื้นท้องเรียบ (flat slab) มีปริมาณวัสดุที่ต้องใช้และงบประมาณการก่อสร้างต่ำที่สุด

(3) ในระบบโครงสร้างที่เป็นระบบคานแบน (band-beam) และระบบพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา (drop panel) มีปริมาณวัสดุที่ต้องใช้และงบประมาณการก่อสร้างที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งระบบคานแบน (band-beam) จะมีปริมาณวัสดุที่ต้องใช้และงบประมาณการก่อสร้างสูงกว่าระบบพื้นท้องเรียบมีแป้นหัวเสา (drop panel) เพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4 ปริมาณวัสดุและค่าแรงที่ใช้ในการก่อสร้างในแต่ละกรณี

ระบบ โครงสร้าง	รายละเอียด	หน่วย	ปริมาณ	ค่าวัสดุ		ค่าแรง		จำนวนเงิน รวม (บาท)
				ราคา/ หน่วย (บาท)	รวม (บาท)	ราคา/ หน่วย (บาท)	รวม (บาท)	
คาน-พื้น	คอนกรีต	ลบ.ม.	327.16	2,630	860,430	391	127,919	2,577,122
	เหล็กเสริม	ตัน	19.43	20,630	400,840	2,807	54,540	
	ไม้แบบ	ตร.ม.	1,794.22	498.69	894,759	133	238,631	
คานแบน	คอนกรีต	ลบ.ม.	234.55	2,630	616,866	391	91,709	2,070,532
	เหล็กเสริม	ตัน	21.87	20,630	451,178	2,807	61,389	
	ไม้แบบ	ตร.ม.	1,344.63	498.69	670,553	133	178,835	
พื้นท้องเรียบ มีแป้นหัวเสา	คอนกรีต	ลบ.ม.	234.77	2,630	617,445	391	91,795	1,967,609
	เหล็กเสริม	ตัน	17.81	20,630	367,420	2,807	49,992	
	ไม้แบบ	ตร.ม.	1,331.28	498.69	663,896	133	177,060	
พื้นท้องเรียบ	คอนกรีต	ลบ.ม.	180.41	2,630	474,478	391	70,540	1,851,522.
	เหล็กเสริม	ตัน	20.94	20,630	431,992	2,807	58,778	
	ไม้แบบ	ตร.ม.	1,291.35	498.69	643,983	133	171,749	

ตารางที่ 5 ระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างรับน้ำหนักสะพานน้ำของ แต่ละกรณีศึกษา

ระบบ โครงสร้าง	รายละเอียด	ปริมาณ	หน่วย	งานที่ทำได้/วัน (8 ชั่วโมง)		ใช้เวลาในการ ทำงาน (วัน)	ใช้เวลาในการทำงาน รวม (วัน)
				ปริมาณ	หน่วย		
คาน-พื้น	คอนกรีต	327.16	ลบ.ม.	35.00	ลบ.ม.	9.3	1,321.46
	เหล็กเสริม	19,430	กก.	22.50	กก.	863.6	
	ไม้แบบ	1,794.22	ตร.ม.	4.00	ตร.ม.	448.6	
คานแบน	คอนกรีต	234.55	ลบ.ม.	35.00	ลบ.ม.	6.7	1,146.66
	เหล็กเสริม	21,870	กก.	26.00	กก.	841.2	
	ไม้แบบ	1,344.63	ตร.ม.	4.50	ตร.ม.	298.8	
พื้นที่รองรับ มีเป็นหัวเสา	คอนกรีต	234.77	ลบ.ม.	35.00	ลบ.ม.	6.7	962.18
	เหล็กเสริม	17,810	กก.	27.00	กก.	659.6	
	ไม้แบบ	1,331.28	ตร.ม.	4.50	ตร.ม.	295.8	
พื้นที่รองรับ	คอนกรีต	180.41	ลบ.ม.	35.00	ลบ.ม.	5.2	942.45
	เหล็กเสริม	20,940	กก.	29.00	กก.	722.1	
	ไม้แบบ	1,291.35	ตร.ม.	6.00	ตร.ม.	215.2	

จากตารางที่ 5 สามารถสรุปได้ว่า ระบบคาน-พื้น (beam-slab) ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างมากที่สุด และ ระบบพื้นที่รองรับ (flat slab) ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างน้อยที่สุด

5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

(1) ถ้าเป็นโครงสร้างรับน้ำหนักสะพานน้ำที่มีลักษณะแผ่นพื้น ไม่รองรับหรือเชื่อมยึดกับชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (non-structural) ซึ่งอาจเสียหาย จากการโก่งตัวมากเกินไป โดยการศึกษาในครั้งนี้พบว่าโครงสร้างระบบพื้นที่รองรับ มีค่าการโก่งตัวสูงที่สุดซึ่งเท่ากับ 13.20 มม. แต่ยังอยู่ในเกณฑ์ค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐาน EN 1992-1-1:2004, Section 7.4.1 [1]

(2) ในระบบโครงสร้างที่เป็นระบบอื่นๆ ที่ไม่ใช่ระบบคาน-พื้นจะมีค่าความกว้างของรอยร้าวที่สูงขึ้นจึงต้องระมัดระวังในเรื่องการเสริมเหล็กตะแกรงเพื่อลดความกว้างของรอยร้าว โดยเฉพาะระบบโครงสร้างระบบพื้นที่รองรับที่จากการวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม CSI SAFE พบว่ามีค่ารอยร้าวสูงสุดเท่ากับ 0.223 มม. ซึ่งเกินค่าที่ยอมให้ตาม BS 8007:1987 [2]

(3) ในการก่อสร้างระบบพื้นโครงสร้างรับน้ำหนักสะพานน้ำระบบพื้นที่รองรับสามารถลดการสูญเสียไม้แบบได้มากกว่าการก่อสร้างระบบคาน-พื้นและทำให้สามารถนำไม้แบบไปใช้งานในการก่อสร้างหลายๆ โครงการจะทำให้หมุนเวียนไม้แบบและใช้ไม้แบบได้อย่างคุ้มค่า รวมถึงเพิ่มพื้นที่การใช้งานได้โครงสร้างรับน้ำหนักสะพานน้ำได้เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

(4) ในการก่อสร้างระบบพื้นโครงสร้างรับน้ำหนักสะพานน้ำระบบพื้นที่รองรับสามารถลดระยะเวลาและงบประมาณในการก่อสร้างได้สูงที่สุดแต่มีข้อควรระวังในเรื่องความกว้างของรอยร้าวสูงที่สุดเนื่องจากมีค่าเกินเกณฑ์ที่ยอมให้ตามมาตรฐาน BS 8007:1987 [2]

(5) ข้อควรระวังในการออกแบบระบบโครงสร้างที่เป็นระบบอื่นๆ ในกรณีการศึกษาในครั้งนี้โดยเฉพาะระบบโครงสร้างพื้นที่รองรับจะต้องระมัดระวังในเรื่องการเสริมเหล็กในบริเวณที่มีค่าหน่วยแรงสูง และในการเสริมเหล็กพิเศษในบริเวณหัวเสา เพื่อรองรับแรงเฉือนทะลุรวมถึงค่าความกว้างของรอยร้าวสูงขึ้น จึงต้องระมัดระวังในเรื่องการเสริมเหล็กตะแกรงเพื่อลดความกว้างของรอยร้าว

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเพราะได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมโยธามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (CE-KMUTT-FTERO 6002) และความกรุณาจากบริษัท Computer and Structures, Inc. ที่ได้อนุเคราะห์โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้าง CSI ETABS และ CSI SAFE ให้ทางผู้วิจัยได้ใช้และศึกษา

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] British Standard Eurocode 1992-1, 2004, Euro code Design of concrete structure (BS EN 1992-1-1:2004), British Standards Institute, London, pp. 1-230
- [2] British Standard Eurocode 8007, 1987, Design of concrete structures for retaining aqueous liquids (BS 8007:1997), British Standards Institute, London, pp.1-150
- [3] ACI Committee 318, 2014, Building code requirements for structural concrete (ACI318-14) and commentary (ACI318R-14), American Concrete Institute. Farmington Hill, MI, pp. 63-235
- [4] Design and construction team, Office of the basic education commission of Thailand, Cost Reference for construction material and labor for the fiscal year 2015/2016, Bureau of trade and economic indices, Ministry of commerce, pp. 1 – 90. (in Thai)
- [5] Thai government procurement office, 2007, Details of calculation for labor cost and operation cost per unit, The Comptroller General's Department (CGD), pp. 1–81. (in Thai)

การประยุกต์ใช้เทคนิคการจัดตารางการผลิตสำหรับการจัดส่ง

คอนกรีตผสมเสร็จ

Application of Production Scheduling Technique for Dispatching Ready Mixed Concrete.

กิตติพงษ์ ถาวงษ์กลาง ลัดดา ตันวานิชกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จนับเป็นส่วนสำคัญและกลไกหนึ่งในการก่อสร้างที่ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย การเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อความเร็วในการแข่งขันจึงมีความจำเป็นต่อผู้ประกอบการ การศึกษานี้เป็นการสนับสนุนการเพิ่มประสิทธิภาพด้านบริหารระบบการขนส่ง โดยศึกษาแบบจำลองเพื่อจัดแผนการผลิตและการจัดส่งรถบรรทุกคอนกรีตผสมเสร็จแบบล่วงหน้ารายวัน ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาจุดคอขวดของการผลิตที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการจัดส่งคอนกรีตผสมเสร็จ เนื่องจากข้อจำกัดของความเร็วที่เครื่องจักรสามารถผลิตคอนกรีตเพื่อการจัดส่งครั้งละหนึ่งคัน ด้วยสองเทคนิคคือ เกณฑ์เลือกกำหนดส่งเร็วที่สุดทำก่อน(Earliest Due Date, EDD) และเกณฑ์มาก่อนทำก่อน(First Come First Served) ตามกฎของการจัดลำดับความสำคัญ(Priority Rules) ถูกนำมาใช้ในการจัดการจัดส่งคอนกรีตผสมเสร็จเพื่อให้ความเที่ยงตรงและแม่นยำส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการของคอนกรีตผสมเสร็จ ในแบบจำลองได้นำข้อมูลที่เป็นองค์ประกอบของกระบวนการขนส่งคอนกรีตผสมเสร็จได้แก่ ระยะทาง ความเร็วและเวลาในการเดินทางซึ่งหาได้จากโปรแกรม ArcGIS (Geographic Information Systems software) รวมทั้งข้อมูลจากหน่วยงานก่อสร้างเป็นฐานข้อมูลร่วมกับการใช้กฎของการจัดลำดับความสำคัญเพื่อหาตารางการผลิตและจัดส่งคอนกรีตผสมเสร็จ ผลเบื้องต้นของแบบจำลองซึ่งนำมาใช้กับบริษัทต้นแบบที่มีกิจการรูปแบบหนึ่งโรงงานผลิตและมีเครื่องจักรผลิตหนึ่งเครื่องจัดส่งไปยังหน่วยงานก่อสร้างหลายแห่ง(Single Machine – Multiple Sites) ภายในเขตเมือง ประโยชน์ที่ได้รับคือได้เวลาการจัดส่งที่เหมาะสมและลดค่าใช้จ่ายจากการรอคอยที่หน้างาน ส่งผลให้ผู้ประกอบการสามารถจัดสรรเวลารับคำสั่งซื้อเพิ่มซึ่งทำให้มีผลต่อการเพิ่มผลประกอบการ

คำสำคัญ : การจัดตาราง, การขนส่ง, เกณฑ์กำหนดส่งเร็วที่สุดทำก่อน, เกณฑ์มาก่อนทำก่อน, คอนกรีตผสมเสร็จ

Abstract

Nowadays, ready-mixed concrete so called RMC industry has an important role in construction work projects since it becomes as one of mechanism in construction works and has widely been used comparing with previous day. Increasing efficiency is focuses in order to be competitiveness of the business. Therefore, this study aims to increase efficiency of delivery management system by using the modeling of

production planning and management of daily scheduling and dispatching of ready-mixed concrete trucks in order to solve the bottleneck problem of production affecting consequent RMC delivery process .In fact, A capacity of concrete machines seems to be capacity limitation concrete can be mixed for one vehicle at a time. Earliest Due Date (EDD) and First Come First Served (FCFS) are two techniques of priority rules using for RMC scheduling to providing more precision and accuracy of related inputs which can in order improve efficiency of entire RMC process. In the model, factor affecting RMC delivery process such as distances, travel speed and travel times are determined by using GIS – Geographic Information Systems software (ArcGIS) and has also input construction sites data, then builds a model base on priority rules to find the production and dispatching schedule. Preliminary results from the model showed that delivery delays and also reduce daily scheduling and planning time can be reduced. Moreover, the model was applied to a concrete truck freight management company that has one manufacturing machine and delivers to several construction sites (Single Machine-Multiple Sites) in urban areas. By improving efficiency by optimizing delivery times and reducing the cost of waiting time at sites, this could cut operating costs and increase companies' revenue because there will be time for more orders.

Key words : Schedule , Dispatching , Earliest due date, First come first serve, Ready-mixed concrete

1. บทนำ

การวางแผนจัดการขนส่งถือเป็นหัวใจหลักของการดำเนินกิจกรรมต่างๆในอุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จ เนื่องจากกระบวนการส่งมอบหลังจากผลิตเสร็จเป็นช่องทางเดียวที่ก่อให้เกิดรายได้ของอุตสาหกรรมนี้ ดังนั้นหากมีการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการใช้เครื่องมือช่วยในการวางแผนการจัดส่งที่มีความแม่นยำและยืดหยุ่นตามสถานการณ์จะทำให้มีศักยภาพในการแข่งขันด้านธุรกิจคอนกรีตผสมเสร็จเป็นอย่างมาก การวางแผนจัดลำดับรถบรรทุกส่งไปยังหน่วยงานก่อสร้างพบจุดคอขวดในขั้นตอนการเข้ารับผลิตจากเครื่องจักรเนื่องจากข้อจำกัดของความจุที่เครื่องจักรซึ่งสามารถผลิตคอนกรีตได้เพื่อการจัดส่งเพียงครั้งละคัน ส่วนของเวลาในกระบวนการจัดส่งพบว่าขึ้นอยู่กับสองปัจจัยหลักคือระยะเวลาในการเดินทางและเวลาของการเทคอนกรีตที่หน่วยงาน โดยในภาพรวมปัจจัยในการนำมาจัดตาราง

การผลิตและตารางการจัดส่งจำเป็นต้องนำมาประสานกันเพื่อให้เกิดแผนจัดส่งที่มีประสิทธิภาพ

ได้มีผู้ศึกษาการแก้ปัญหาการจัดตารางขนส่งคอนกรีตในประเทศไต้หวัน[1]ได้ใช้เทคนิค Genetic Algorithms(GA) ร่วมกับ Simulation technique สร้างแบบจำลองการจัดตารางเวลาจัดส่งรถบรรทุกคอนกรีตผสมเสร็จเพื่อให้ได้ระยะเวลาการรอคอยที่น้อยที่สุด ณ หน่วยงานก่อสร้าง ต่อมา [2]ใช้เทคนิคเดียวกันร่วมกับหลักการวางแผนทางด้านโลจิสติกส์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เรียกว่า HKCONSIM ศึกษาการจัดตารางการจัดส่งของโรงงานงานผลิตลักษณะ One plant-Multi sites ในประเทศฮ่องกง เพื่อวิเคราะห์หาผลตอบแทนที่มากที่สุดจากต้นทุนที่ใช้ไปอย่างมีประสิทธิภาพ

จากการรวบรวมการศึกษาพบว่าส่วนใหญ่มุ่งเน้นหาตารางจัดส่งที่มีผลลัพธ์ความต้องการใช้จำนวนรถบรรทุกที่น้อยที่สุดซึ่งมีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้ในแต่

ละวันและยังไม่มีกระบวนการแผนการผลิตที่เป็นคอขวดเข้ากับแผนการจัดส่งที่ชัดเจน แท้จริงแล้วความต้องการของเจ้าหน้าที่วางแผนจัดส่งต้องการผลลัพธ์ของแผนจัดส่งที่มีภาวะเชิงโต้ตอบแบบทันทีภายใต้วิธีจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่เดิมให้มีประสิทธิภาพดีที่สุดเนื่องจากไม่สามารถเพิ่มหรือลดจำนวนรถบรรทุกได้แบบทันทีทันใด นอกจากนั้นต้องมีการเชื่อมโยงตารางการผลิตและตารางการจัดส่งเข้าด้วยกันเพราะเหตุจากความจุที่เครื่องจักรสามารถผลิตได้ครั้งละคัน อาจส่งผลให้เวลาของแผนจัดส่งจำเป็นต้องเลื่อนออกไป

ดังนั้นการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาแบบจำลองสำหรับจัดตารางการผลิตและการจัดส่งคอนกรีตผสมเสร็จ สำหรับช่วยตัดสินใจวางแผนล่วงหน้าสำหรับเจ้าหน้าที่วางแผนจัดส่งให้มีประสิทธิภาพ แม่นยำ ยืดหยุ่น ซึ่งจะส่งผลให้ลดข้อผิดพลาดจากการขาดความชำนาญในการวางแผนส่งผลให้มีโอกาสเพิ่มปริมาณการสั่งซื้อและรายได้ให้แก่บริษัทอีกด้วย

2. ปัญหาการจัดตารางการผลิตและตารางจัดส่งคอนกรีตผสมเสร็จ

2.1 การจัดตารางการผลิต

การจัดตารางการผลิตมีหลายแนวคิด [3]ให้นิยามไว้ว่าเป็นการวางแผนหรือการระบุในเอกสารที่ชัดเจนเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ประกอบด้วยเวลาและลำดับงานที่แน่นอน ซึ่งกล่าวได้ว่าการจัดตารางการผลิตเป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการจัดสรรทรัพยากรและการจัดลำดับให้กับงานเพื่อการผลิตและบริการ สำหรับประเภทของตารางการผลิต [3-4]ได้แบ่งตามลักษณะรูปแบบการจัดวางของเครื่องจักรได้ 4 รูปแบบคือ

- 1.แบบผลิตหน่วยเดียว (Single Machine Scheduling)
- 2.หน่วยผลิตหน่วยเดียวแบบขนาน (Parallel Machine Scheduling)
- 3.รูปแบบการจัดตารางการผลิตแบบไหล (Flow Shop Scheduling)

4.รูปแบบการจัดตารางการผลิตแบบตามสั่ง (Job Shop Scheduling)

เทคนิคการจัดลำดับความสำคัญ (Priority Rules) เป็นอีกหนึ่งวิธีการที่นิยมใช้และได้รับการพิสูจน์มาแล้วว่ามีความเหมาะสมทั้งด้านเวลาและค่าใช้จ่ายในการค้นหาคำตอบโดยนำเอาหลักเกณฑ์เชิงประสบการณ์ซึ่งถือเป็นรูปธรรมที่ง่ายต่อความเข้าใจ

จึงมีผู้นำเกณฑ์การแบ่งตารางการผลิตผสมกับเทคนิคการจัดลำดับงานไปแก้ปัญหาหรือเพิ่มประสิทธิภาพ ในรูปแบบการผลิตแบบผลิตหน่วยเดียว [5]ได้แก้ปัญหาการผลิตไม่ทันเวลาของอุตสาหกรรมผลิตหมวกด้วยการประยุกต์เทคนิคการจัดลำดับความสำคัญ (Priority Rules) จากสามเกณฑ์คือ 1.เกณฑ์มาก่อนทำก่อน (FCFS) 2.วันกำหนดส่งเร็วที่สุดทำก่อน (EDD) และ 3.ทำงานที่ใช้เวลานานที่สุดก่อน (LPT) พบว่าวิธีเลือกกำหนดส่งเร็วที่สุดก่อน (EDD) สามารถลดจำนวนครั้งส่งมอบงานล่าช้าได้ผลดีที่สุด นอกจากนี้ [6]ได้นำเทคนิคเดียวกันแก้ปัญหาการใช้เวลานานในการจัดแผนผลิตและความล่าช้าในการทำงานจากการจัดลำดับงานของโรงงานผลิตเคมีภัณฑ์ด้วยการใช้เกณฑ์ Priority Rules หลายรูปแบบมาเขียนโปรแกรมจัดลำดับงานพบว่า การส่งมอบงานล่าช้าและชั่วโมงทำงานล่วงเวลาลดลง สามารถผลิตสินค้าได้มากขึ้น

2.2 การประยุกต์ใช้การจัดตารางการผลิตและตารางจัดส่งคอนกรีตผสมเสร็จ

ปัญหาการผลิตและการจัดตารางขนส่งคอนกรีตผสมเสร็จได้มีการศึกษาและวิจัยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการผลิตและการขนส่งโดยการประยุกต์วิธีการทางคณิตศาสตร์และการค้นหาคำตอบด้วยวิธีวิวิธวิธีมาช่วยในการจัดลำดับเพื่อให้ได้แผนงานที่มีประสิทธิภาพ ในประเทศได้วัน [7] เสนอแบบจำลองการรวมตารางการผลิตและการจัดส่งคอนกรีตผสมเสร็จรูปแบบ Network Flow และเพิ่มเทคนิค Branch and Bound เพื่อคัดเลือกข้อมูลที่เหมาะสมก่อนนำเข้าโปรแกรมวางแผน CPLEX9.0 ทำให้ใช้เวลาประมวลผลสั้นลงต่อมา [8]ประยุกต์ใช้วิธีวิวิธวิธีด้วยเทคนิค Bee

Colony Optimization(BCO) จัดลำดับการผลิตเพื่อให้ได้ตารางการจัดส่งที่เหมาะสมโดยมีเวลารอคอยรวมของรถบรรทุกมีค่าน้อยที่สุดและได้เปรียบเทียบกับการใช้เทคนิคอื่นได้แก่ Genetic Algorithm กับ Tabu Search พบว่ามีประสิทธิภาพดีกว่าและใช้เวลาคำนวณน้อยกว่า

จากการค้นคว้าพบว่าการสร้างตารางจัดส่งคอนกรีตผสมเสร็จจำเป็นต้องคำนึงถึงเงื่อนไขขั้นตอนการผลิตในกระบวนการทำงานเนื่องจากรถบรรทุกไม่สามารถเข้ารับคอนกรีตที่ผลิตเสร็จพร้อมกันหลายคันต่อหนึ่งเครื่องจักร

3. การสร้างแบบจำลอง

ปัญหาการจัดตารางการจัดส่งคอนกรีตผสมเสร็จมีความจำเป็นต้องนำเงื่อนไขเวลาจากตารางการผลิตมาประกอบการพิจารณาเนื่องจากการผลิตถือเป็นคอขวดของกระบวนการรวมทั้งหมด การศึกษานี้จึงได้สร้างแบบจำลองการจัดตารางการผลิตและการจัดส่ง ในที่นี้เรียกโดยย่อว่า PDRMC (Production and Dispatching for Ready Mixed Concrete) ด้วยวิธีการจัดลำดับความสำคัญ(Priority Rules) โดยเลือกเทคนิคเกณฑ์วันกำหนดส่งเร็วที่สุดทำก่อน (EDD) และเกณฑ์มาก่อนทำก่อน(FCFS) ร่วมกันในการจัดลำดับงาน สำหรับดัชนีในการศึกษานี้ใช้การวัดผลการดำเนินงานของการจัดตารางการผลิตโดยการเปรียบเทียบผลรวมของเวลาที่ล่าช้าทั้งหมดระหว่างแผนจากแบบจำลองเทียบกับพนักงานจัดส่งซึ่งแสดงได้ตามสมการที่ 1 ดังนี้

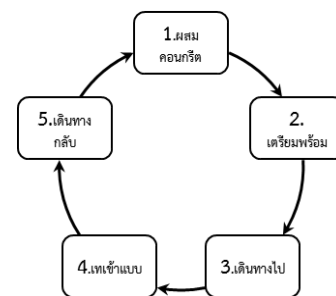
$$\text{Total Tardiness} = \sum_{i=1}^n T_i \quad (1)$$

$$T_i = d_i - d_i' \quad (2)$$

โดยที่ T_i คือคือเวลาส่งไม่ทันกำหนดของงาน i d_i คือกำหนดส่งงาน i d_i' คือกำหนดส่งงานใหม่ของงาน i

การศึกษานี้ยังได้ผสมผลการวิเคราะห์ขั้นตอนการปฏิบัติงานโดย (Yan,Lai,&Chen,2008) ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอนได้แก่ การผสมคอนกรีต การเดินทางไป การเทคอนกรีตและการเดินทางกลับ เพื่อความสอดคล้องกับสถานการณ์จริงจากการสังเกตของผู้ศึกษาจึงเพิ่มขั้นตอนการเตรียมพร้อมภายในโรงงานเพื่อให้

แบบจำลองเหมาะสมยิ่งขึ้น เพื่อให้มองภาพรวมครบทุกด้านรวมเป็น 5 ขั้นตอนในรูปแบบวัฏจักรของคอนกรีตผสมเสร็จ (RMC Cycle) ดังรูปที่ 1 ซึ่งหัวใจหลักในการนำไปประยุกต์ใช้คือการหาเวลาของแต่ละขั้นตอนให้ได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

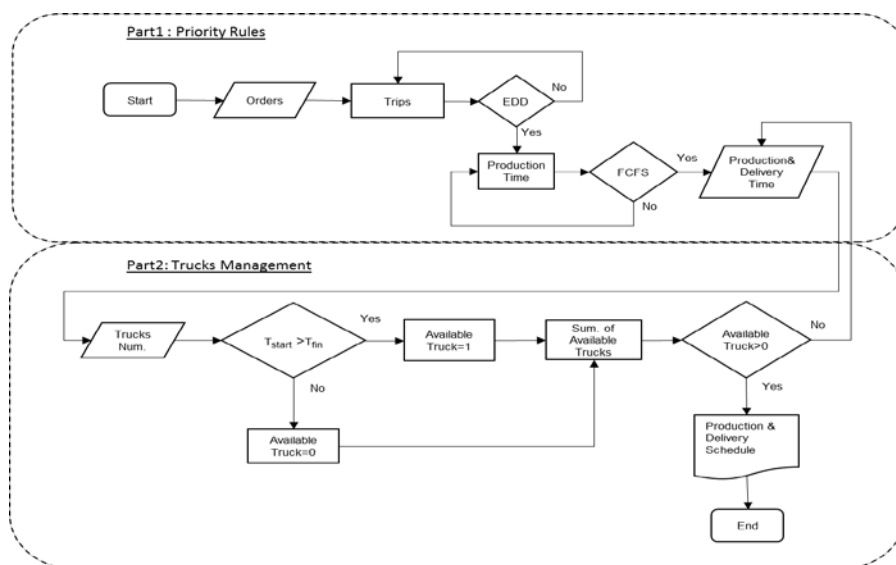


รูปที่ 1 วัฏจักรของคอนกรีตผสมเสร็จ (RMC Cycle)

3.1โครงสร้างแบบจำลอง

แผนผังการไหล (Flow Diagram) ทั้งหมดของกระบวนการดังรูปที่ 2 ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนได้แก่

- ส่วนที่ 1 เป็นวิธีการจัดลำดับงานด้วย Priority Rules จากคำสั่งซื้อที่ประกอบด้วยสถานที่ส่งสินค้า ประเภทสินค้า ปริมาณความต้องการ ประเภทของงาน กำหนดวันและเวลาที่ต้องการ ร่วมกับแนวคิดการขนส่งแบบทันเวลาพอดี (Just in Time) เป็นตัวกำหนดระยะห่างระหว่างรถบรรทุกแต่ละคันผลที่ได้สามารถนำไปจัดลำดับงานด้วยเกณฑ์เลือกกำหนดส่งเร็วที่สุดทำก่อน(Earliest Due Date, EDD) จากนั้นคำนวณหาเวลาเริ่มผลิตของแต่ละเที่ยวโดยใช้เกณฑ์มาก่อนทำก่อน(First Come First Served) เป็นเงื่อนไขตัดสินใจในกรณีที่มียานผลิตชนกัน ผลลัพธ์ที่ได้ในส่วนนี้คือตารางเวลาการผลิตและการจัดส่ง
- ส่วนที่ 2 การบริหารจัดการรถบรรทุก เป็นกระบวนการตรวจสอบผลของตารางเวลาผลิตให้สอดคล้องกับจำนวนรถบรรทุกที่มีอยู่อย่างจำกัดด้วยวิธีการตรวจสอบปริมาณรถบรรทุกพร้อมใช้ซึ่งถ้ามีจำนวนมากกว่าศูนย์ถือว่าเวลาผลิตในเที่ยวนั้นสามารถดำเนินการต่อได้โดยใช้เกณฑ์งานเที่ยวก่อนหน้าที่มีเวลาเริ่มผลิต (T_{start}) มากกว่าเวลาแล้วเสร็จ (T_{fin}) เป็นการใช้รถบรรทุกที่อยู่ในสถานะกำลังทำงาน เวลาผลิตสามารถเลื่อนออกไปได้หากตรวจสอบแล้วไม่มีรถบรรทุกพร้อมใช้งาน (Available Trucks)

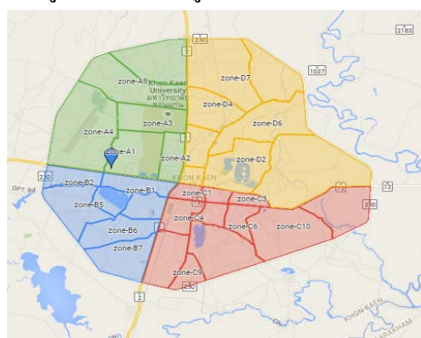


รูปที่ 2 Flow diagram แบบจำลอง PDRMC

3.2 ข้อมูลนำเข้าแบบจำลอง

ตัวแปรหลักที่มีผลต่อความแม่นยำและความถูกต้องของการศึกษานี้คือ

- เวลาการเดินทาง (Travel Time) ในการศึกษานี้ใช้การวิเคราะห์เพื่อหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดจากโปรแกรม ArcGIS โดยใช้โครงข่าย Geometric Network ภายใต้การแบ่งโซนพื้นที่ขนส่งที่ครอบคลุมขอบเขตการศึกษาเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลระยะทางดังรูปที่3และ4



รูปที่ 3 โซนพื้นที่ขนส่งของแบบจำลอง



รูปที่ 4 การวิเคราะห์หาเส้นทางที่เหมาะสมด้วยArcGIS

สำหรับค่าความเร็วพบว่าถนนแต่ละประเภทมีค่าความเร็วแตกต่างกันตามสภาพจราจรและลักษณะกายภาพ ดังนั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำจึงแบ่งถนนออกเป็น 5 ประเภทและคำนวณหาตัวแทนความเร็ว (Travel Speed) ด้วยการสำรวจระยะทางและเวลาเดินทางของรถบรรทุกแต่ละคันตามลักษณะประเภทถนนจาก GPS ที่ติดตามรถบรรทุกของบริษัทต้นแบบ

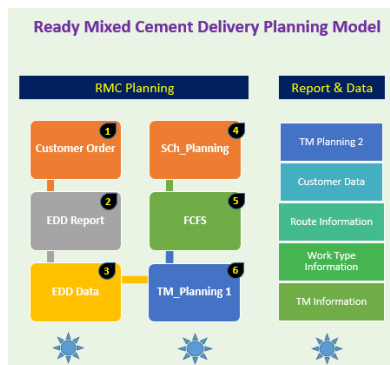
- เวลาเทคอนกรีต (Pouring Time) เป็นเวลาที่ใช้ถ่ายเทคอนกรีตออกจนหมดในหนึ่งเที่ยวด้วยตัวแทนข้อมูลจากการสำรวจและประสบการณ์ของเจ้าหน้าที่จัดส่ง
- ปริมาณความต้องการคอนกรีต (Volume) เป็นข้อมูลความต้องการจากหน่วยงานก่อสร้างที่นำมาวิเคราะห์หาจำนวนเที่ยวการขนส่งทั้งหมด
- ความจุรถบรรทุก (Truck Capacity) เลือกใช้ตัวแทนความจุขนาด 6 ลูกบาศก์เมตรต่อคันซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สอดคล้องกับอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เพื่อนำไปคำนวณหาจำนวนเที่ยวขนส่ง
- เวลาคำหมายส่งสินค้า (Due Date Time) ถือเป็นหนึ่งในข้อมูลสำคัญที่ใช้เป็นเงื่อนไขพิจารณาการจัดลำดับงานและเป็นข้อมูลเวลาตั้งต้นเพื่อหาเวลาเริ่มของวัฏจักรการขนส่งคอนกรีตผสมเสร็จ

4. การประยุกต์ใช้แบบจำลอง

สำหรับแบบจำลองการจัดการตารางการผลิตและการจัดส่งคอนกรีตผสมเสร็จ (Production and Dispatching for RMC, PDRMC) ใช้เครื่องมือช่วยในการประมวลผลและแสดงผลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel โดยการประยุกต์คำสั่งพิเศษ Macro และ Visual Basic for Application ทำงานร่วมกัน ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนหลักในการใช้โปรแกรมดังนี้

4.1 วิธีการนำเข้าข้อมูล

การใช้โปรแกรมประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ หน้าหลักดังรูปที่ 5 ใช้สรุปภาพรวมการใช้งานซึ่งแบ่งได้อีกเป็น 2 ส่วนคือการวางแผนและการรายงานผลลัพธ์



รูปที่ 5 หน้าจอหลักแบบจำลอง PDRMC

สำหรับส่วนต่อมาคือหน้าการนำเข้าข้อมูลและแสดงผลที่จะเป็นการนำข้อมูลเพื่อวิเคราะห์โดยสามารถแบ่งประเภทข้อมูลนำเข้าได้ดังนี้

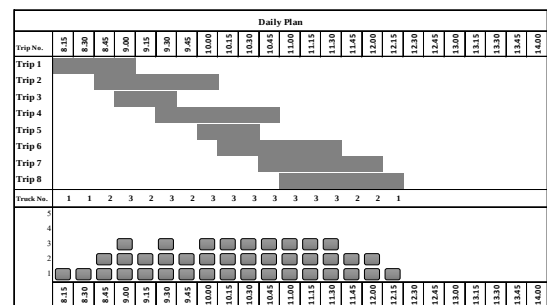
ตารางที่ 1 ประเภทของข้อมูลนำเข้า

ข้อมูลพื้นฐาน	ข้อมูลจากผลวิเคราะห์
1. จำนวนคอนกรีต	1. เวลาเทคอนกรีต
2. ความจุรถบรรทุก	2. เวลาเดินทาง
3. ระยะเวลาผสมคอนกรีต	
4. เวลาคัดหมาย	
5. สถานที่ส่ง	
6. ลักษณะของงาน	

4.2 การแสดงผลลัพธ์

การแสดงผลลัพธ์ของแบบจำลองตามรูปที่ 6 ประกอบด้วยสองส่วนที่มีความสัมพันธ์กันซึ่งได้ตอบคือ ส่วนแรกแสดงผลการจัดลำดับงานขนส่งแต่ละเที่ยวในรูปแบบแผนภูมิแกนต์ที่มีข้อมูลของชื่อสถานที่ส่งสินค้า ปริมาณ

บรรทุกต่อเที่ยว เวลาเริ่มผลิตและเวลารถบรรทุกกลับถึงโรงงาน สำหรับส่วนที่สองเป็นการแสดงจำนวนรถบรรทุกที่ต้องการใช้ตามช่วงเวลาและยังสามารถแสดงผลลัพธ์ได้ทันทีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงลำดับงานจากส่วนแรก จะเห็นได้ว่าวิธีการแสดงผลลัพธ์ของแบบจำลองเอื้อต่อการจัดหาจำนวนรถบรรทุกที่สอดคล้องกับแผนงานที่เปลี่ยนแปลงภายหลังด้วยเงื่อนไขพิเศษบางประการจากหน่วยงานก่อสร้างหรือจากการทวนสอบด้วยประสบการณ์ของเจ้าหน้าที่จัดส่ง



รูปที่ 6 ผลลัพธ์การจำลองสถานะรถบรรทุก

5. สรุป

บทความนี้เป็นการนำเสนอแบบจำลองช่วยการตัดสินใจในการสร้างตารางการจัดส่งคอนกรีตผสมเสร็จเพื่อแก้ปัญหาความไม่สะดวกและการขาดประสิทธิภาพการจัดแผนของเจ้าหน้าที่จัดส่งจากแบบจำลอง PDRMC ภายใต้นโยบายนำข้อจำกัดของกระบวนการผลิตมารวมพิจารณาพบว่าแบบจำลองสามารถคำนวณหาเวลาค่าเช่ารวมของแผนการจัดส่งและจำนวนรถบรรทุกที่เหมาะสมได้ ซึ่งผลที่ได้สามารถนำไปใช้จัดลำดับงานขนส่งที่มีประสิทธิภาพและรวดเร็วกว่าแผนจากเจ้าหน้าที่จัดส่งด้วยเวลาเช่ารวมที่น้อยรวมทั้งนำไปใช้เป็นเครื่องมือช่วยการตัดสินใจรับคำสั่งซื้อเพิ่มในช่วงเวลาที่เหลือจากวิธีการแสดงผลลัพธ์ที่ช่วยให้มองภาพรวมของแผนอย่างชัดเจน ถือว่าเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และช่วยบริหารจัดการรถบรรทุกที่มีจำนวนจำกัดให้มีประสิทธิภาพ จึงเห็นควรนำแบบจำลองนี้ไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จ

อย่างไรก็ตามการศึกษานี้ยังต้องทำการตรวจสอบและประเมินความถูกต้องแม่นยำของโปรแกรมต่อไปพร้อมกับให้ความสำคัญในการนำผลการวิเคราะห์มา

เปรียบเทียบกับผลการจัดตารางการจัดส่งของเจ้าหน้าที่จัดส่ง

6.กิตติกรรมประกาศ

ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) และบริษัท แก่นนครคอนกรีต(2001) จำกัด ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม(พวอ.) ระดับปริญญาโท และความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้วิจัย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และบริษัท แก่นนครคอนกรีต (2001) จำกัด ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] C.-W. Feng, T.-M. Cheng, and H.-T. Wu, "Optimizing the schedule of dispatching RMC trucks through genetic algorithms," *Autom. Constr.*, vol. 13, no. 3, pp. 327–340, May 2004.
- [2] M. Lu and H.-C. Lam, "Optimized concrete delivery scheduling using combined simulation and genetic algorithms," *Proc. 37th Conf. Winter Simul.*, p. 2572, Dec. 2005.
- [3] K. R. Baker and D. Trietsch, *Principles of Sequencing and Scheduling*. John Wiley & Sons, 2009.
- [4] M. L. Pinedo, *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*. Springer, 2009.
- [5] Suthathip Budsaba, "The Production Scheduling Generation with Heuristic Methods : Case Study VIPHAT CO.,TH," Silpakorn University, 2011.
- [6] Wirote Pintaruk, "Application of Single Machine Scheduling Technique for Chemical Process," King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2010.
- [7] S. Yan, W. Lai, and M. Chen, "Production scheduling and truck dispatching of ready mixed concrete," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 44, no. 1, pp. 164–179, Jan. 2008.
- [8] S. Srichandum and T. Rujiranyong, "Production Scheduling for Dispatching Ready Mixed Concrete Trucks Using Bee Colony Optimization," *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 3, no. 1, p. 7, Jan. 2010.

การเปรียบเทียบค่านิยม ความเชื่อ บรรทัดฐานและพฤติกรรมการ ออกแบบโดยคำนึงถึงความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมของผู้ออกแบบ ในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย

Comparison of Value, Belief, Norm and Sustainable Design Behavior of Designers in Thai Construction Industry

นุจรี ป้องแก้ว ปิยนุช เวชยวรณ์

สาขาวิศวกรรมบริหารการก่อสร้าง คณะวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่านิยม ความเชื่อ บรรทัดฐาน และพฤติกรรมการออกแบบโดยคำนึงถึงความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม โดยใช้ทฤษฎี Value-Belief-Norm (VBN) ของกลุ่มผู้ที่เคยออกแบบอาคารเขียวและกลุ่มผู้ที่ไม่เคยออกแบบอาคารเขียว จากการวิเคราะห์แบบสอบถามจำนวน 430 ชุด โดยเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี one-way ANOVA การศึกษาพบว่า กลุ่มตัวอย่างที่เคยออกแบบอาคารเขียวให้ความสำคัญกับค่านิยมด้านสิ่งแวดล้อม มีความเชื่อด้านสิ่งแวดล้อม และบรรทัดฐานด้านสิ่งแวดล้อมสูงกว่ากลุ่มที่ไม่เคยออกแบบอาคารเขียวซึ่งแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และกลุ่มตัวอย่างที่มีประสบการณ์ในการออกแบบสูงให้ความสำคัญกับค่านิยมด้านการเห็นแก่ผู้อื่นและความเชื่อด้านการรับรู้ถึงผลกระทบ มากกว่ากลุ่มที่มีประสบการณ์ในการออกแบบน้อยกว่า และยังพบว่ากลุ่มผู้ออกแบบที่เคยออกแบบอาคารเขียวและมีประสบการณ์สูงมีบรรทัดฐานและพฤติกรรมการออกแบบโดยคำนึงถึงความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมสูงอีกด้วย

คำสำคัญ : พฤติกรรมการออกแบบอย่างยั่งยืน, ค่านิยมด้านสิ่งแวดล้อม, ความเชื่อด้านสิ่งแวดล้อม, การออกแบบอาคารเขียว, สถาปนิกและวิศวกร

Abstract

The study aims to compare the difference of values, beliefs, norms and sustainable design behavior between designers who had experience in green building design and designers who had no such experience using Value-Belief-Norm Theory (VBN). One-way ANOVA was used to analyze 430 sets of questionnaire sent out to designers in Thai construction industry. The results showed that the designers with green building design experiences have higher biospheric value, ecological worldview belief and

green norm than designers without green building design experiences at a significance level of 0.05. Moreover, the designers who have more than 10 years of working experience were found to have higher altruistic value and also higher awareness of consequences than the designers with less than 10 years working experience. It was found that the designers who have both green building design experiences and also have more than 10 years of working experience, have higher sustainable design norms and behaviors.

Keywords : Green design behavior, Biospheric value, Ecological worldview belief, Design green building, Architects and engineers

1. บทนำ

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการก่อสร้างส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก และเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ทรัพยากรสูง [1] โดยใช้ทรัพยากรประมาณ 39% ของการใช้พลังงานทั้งหมด, 68% ของปริมาณการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด, 30% ของการฝังกลบขยะทั้งหมด, 38% ของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดและ 12% ของปริมาณการใช้น้ำทั้งหมด [2] และอุตสาหกรรมก่อสร้างก่อให้เกิดมลพิษในด้านต่างๆเป็นจำนวนมาก ซึ่งอุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีความยั่งยืนต่ำ [3] ซึ่งในส่วนการออกแบบมีความสำคัญต่อการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยผู้ออกแบบสามารถมีส่วนร่วมรับผิดชอบในด้านวัสดุ เช่นการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ หรือเลือกใช้วัสดุเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนั้นอาจมีส่วนในการคิดค้นนวัตกรรมใหม่และขบวนการออกแบบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่ในปัจจุบันผู้ออกแบบในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทยยังมีส่วนร่วมไม่มากนัก [4] จากงานวิจัยที่ผ่านมาในประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่าหากผู้ออกแบบทำการออกแบบอาคารโดยคำนึงถึงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมสามารถช่วยลดผลกระทบได้เป็นอย่างมากโดยช่วยลดการใช้พลังงานลงได้ 40% ลดปริมาณน้ำเสียลงได้ 20% ลดปริมาณขยะลงได้ 30% [5]

หากผู้ออกแบบมิได้ตระหนักถึงความจำเป็นในการออกแบบโดยคำนึงถึงความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมนำมาสู่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก การศึกษา

จึงเน้นถึงการศึกษาพฤติกรรมของผู้ออกแบบโดยใช้ทฤษฎี Value Belief Norm เนื่องจากเป็นทฤษฎีที่ได้รวบรวมทฤษฎีที่ทำการศึกษาพฤติกรรมด้านสิ่งแวดล้อมหลายทฤษฎีเข้าด้วยกันประกอบด้วย Norm-Activation Theory, Theory of reasoned action, Theory of planned behavior และสามารถอธิบายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมได้ [6] โดยงานวิจัยได้ทำการศึกษาศึกษาพฤติกรรมการออกแบบที่คำนึงถึงด้านการใช้พลังงาน เนื่องจากการใช้พลังงานสูงและในส่วนการออกแบบสามารถลดการใช้พลังงานลงได้ถึง 40%

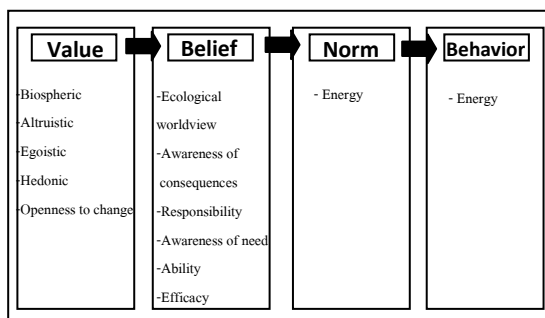
จากข้อมูลข้างต้นพบว่าผู้ออกแบบมีความสำคัญต่อการพัฒนาอาคารให้มีความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมจึงเป็นที่มาของการศึกษาพฤติกรรมผู้ออกแบบโดยคำนึงถึงความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมของผู้ออกแบบในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่านิยม ความเชื่อ บรรทัดฐานและพฤติกรรมผู้ออกแบบโดยคำนึงถึงความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมของผู้ออกแบบในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาให้ผู้ออกแบบในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทยมีพฤติกรรมผู้ออกแบบโดยคำนึงถึงความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมสูงขึ้น

3. ระเบียบวิธีการวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าปัจจัยที่สร้างพฤติกรรมที่แตกต่างกันที่มีผลต่อพฤติกรรมด้านสิ่งแวดล้อม [7] Value-Belief-Norm (VBN) [8] ซึ่งชี้ให้เห็นว่ารูปแบบที่ก่อให้เกิดพฤติกรรมด้านสิ่งแวดล้อมของมนุษย์แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ส่วนที่ 1 ค่านิยม (Value) แบ่งออกเป็น 6 ด้าน คือ ด้านสิ่งแวดล้อม(Biospheric) ด้านการเห็นแก่ผู้อื่น (Altruistic) ด้านการเห็นแก่ตนเอง (Egoistic) ด้านความสุข (Hedonic) ดั้งเดิม (Traditional) และการเปิดกว้างที่จะเปลี่ยน (Openness to change) ซึ่งรวมเป็น 27 ปัจจัย [9] ส่วนที่ 2 ความเชื่อ (Belief) แบ่งออกเป็น 6 ด้าน คือ ด้านสิ่งแวดล้อม (Ecological worldview), การรับรู้ถึงผลกระทบ (Awareness of consequences), การตระหนักถึงความจำเป็น (Awareness of need), ความรับผิดชอบ (Responsibility), ความสามารถ (Ability) และประสิทธิภาพ (Efficacy) ซึ่งรวมเป็น 16 ปัจจัย [10] ส่วนที่ 3 บรรทัดฐาน (Norm) จากการศึกษา Norm-Activation Theory ได้กล่าวว่บรรทัดฐานมีผลต่อการรับรู้ถึงปัญหาของแต่ละบุคคล ซึ่งได้รับอิทธิพลมาจากความเชื่อและส่งผลต่อพฤติกรรมของบุคคลนั้นๆ [11] ส่วนที่ 4 พฤติกรรม (Behavior) โดยศึกษาพฤติกรรมการออกแบบที่คำนึงถึงความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม ได้แบ่งพฤติกรรมด้านพลังงานออกเป็น การจัดทำแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์งานระบบอาคารอย่างเหมาะสม และสม่ำเสมอ การตรวจจัดการใช้พลังงานของอาคารและการออกแบบอาคารให้มีประสิทธิภาพตั้งแต่ต้นการจัดการอาคารภายหลังอาคารได้รับการเปิดใช้งานแล้ว [12] ดังแสดงในรูปภาพที่ 1



รูปภาพที่1 Value-Beliefs- Norm Theory – (VBN Theory) ที่มา P.C. Stern,2000

4. ขั้นตอนการศึกษา

4.1 การรวบรวมข้อมูล

การศึกษานี้รวบรวมข้อมูลจากผู้ออกแบบก่อสร้าง ผ่านแบบสอบถามจำนวนทั้งสิ้น 430 ตัวอย่าง ซึ่งผู้ตอบแบบสอบถามประกอบไปด้วยวิศวกรโครงสร้าง 190 ตัวอย่าง สถาปนิก 170 ตัวอย่างและวิศวกรงานระบบ 70 ตัวอย่าง แบบสอบถามแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือส่วนที่ 1 ถามเกี่ยวกับค่านิยมในด้านต่างๆ ตัวอย่างเช่น ท่านให้ความสำคัญกับการดูแลสิ่งแวดล้อมในระดับใด ส่วนที่ 2 ถามเกี่ยวกับความเชื่อในด้านต่างๆ ตัวอย่างเช่น ท่านเชื่อว่าปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญในระดับใด ส่วนที่ 3 ถามเกี่ยวกับบรรทัดฐานในการออกแบบและพฤติกรรมในการออกแบบ โดยข้อคำถามต่างๆ ใช้มาตรวัดแบบลิเคิร์ตสเกล (Likert's scale) วัดระดับความคิดเห็นโดยแบ่งเป็น 5 ระดับ แบบสอบถามประกอบด้วยตัวแปรด้านลักษณะมูลค่า ความเชื่อ บรรทัดฐาน พบว่าแบบสอบถามมีความน่าเชื่อถือ (Cronbach's Alpha) เท่ากับ 0.90

4.2 การออกแบบแบบสอบถาม

ในการจัดทำแบบสอบถามผู้จัดทำได้ทำการรวบรวมแบบสอบถามจากงานวิจัยที่ผ่านมาโดยได้รวบรวมปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมด้านสิ่งแวดล้อมซึ่งพบว่าแบบออกเป็นด้านค่านิยม (Value) ความเชื่อ (Belief) บรรทัดฐาน (Norm) ได้ข้อคำถามทั้งหมด 101 ข้อ จากนั้นได้นำไปให้ผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ในการทำงานด้านการออกแบบมากกว่า 10 ปี และเลขทำการออกแบบอาคารประหยัดพลังงาน พิจารณา (validate) และทดลองเก็บแบบสอบถาม

4.3 การเก็บข้อมูลกลุ่มตัวอย่างจากแบบสอบถาม

นำข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างโดยแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 4 กลุ่มตัวอย่างคือ กลุ่มที่ 1 กลุ่มตัวอย่างผู้ออกแบบที่มีประสบการณ์ในการออกแบบมากกว่า 10 ปี และเลขออกแบบอาคารเขียว กลุ่มที่ 2 กลุ่มตัวอย่างผู้ออกแบบที่มีประสบการณ์ในการออกแบบน้อยกว่า 10 ปี และเลขออกแบบอาคารเขียว กลุ่มที่ 3 กลุ่มตัวอย่างผู้ออกแบบที่มีประสบการณ์ในการออกแบบ

มากกว่า 10 ปี และไม่เคยอดแบบอาคารเขียว กลุ่มที่ 4 กลุ่มตัวอย่างผู้ออกแบบที่มีประสบการณ์ในการออกแบบ น้อยกว่า 10 ปีและไม่เคยอดแบบอาคารเขียว

4.4 การทดสอบสมมติฐานการวิจัย

ด้วยสถิติ Analysis of Variance : ANOVA เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างการทดสอบค่าเฉลี่ย จากข้อมูลที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างหลายกลุ่ม การวิเคราะห์ ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) การ วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variances) แบบ จำแนกทางเดียว One-Way ANOVA ศึกษาหาความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปร 2 ประเภท คือ ตัวแปรตาม (Dependent) คือปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรม ตัวแปรอิสระ (Independent) ซึ่งแบ่งข้อมูลเป็นกลุ่ม ๆ มากกว่าสองกลุ่มขึ้นไป เพื่อ ทดสอบว่าในแต่ละกลุ่มที่แตกต่างกันนั้น จะทำให้ค่าเฉลี่ย ของตัวแปรตาม แตกต่างกันหรือไม่

5. ผลการศึกษา

จากการเก็บข้อมูลผู้ออกแบบในอุตสาหกรรม ก่อสร้าง โดยใช้แบบสอบถามจำนวน 430 ชุด ได้ทำการ แบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 4 กลุ่มตัวอย่างคือ กลุ่มที่ 1 กลุ่ม ตัวอย่างผู้ออกแบบที่มีประสบการณ์ในการออกแบบ มากกว่า 10 ปีและเคยอดแบบอาคารเขียว กลุ่มที่ 2 กลุ่ม ตัวอย่างผู้ออกแบบที่มีประสบการณ์ในการออกแบบ น้อย กว่า 10 ปี และเคยอดแบบอาคารเขียว กลุ่มที่ 3 กลุ่ม ตัวอย่างผู้ออกแบบที่มีประสบการณ์ในการออกแบบ มากกว่า 10 ปี และไม่เคยอดแบบอาคารเขียว กลุ่มที่ 4 กลุ่มตัวอย่างผู้ออกแบบที่มีประสบการณ์ในการออกแบบ น้อยกว่า 10 ปีและไม่เคยอดแบบอาคารเขียว

5.1 ค่านิยม (value)

การทดสอบข้อมูลของผู้ตอบแบบสอบถามพบว่า กลุ่ม ตัวอย่างที่มีประสบการณ์ในการออกแบบมากกว่า 10 ปี และเคยอดแบบอาคารเขียวให้ความสำคัญกับค่านิยมด้าน สิ่งแวดล้อม (Biospheric Value) สูงกว่ากลุ่มตัวอย่างอื่น และแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ส่วนกลุ่มตัวอย่างที่ ประสบการณ์การออกแบบน้อยกว่า 10 ปีและไม่เคย

อดแบบอาคารเขียวจะความสำคัญกับค่านิยมด้านการเห็น แก่ผู้อื่น (Altruistic Value) น้อยและให้ความสำคัญกับ ค่านิยมด้านความสุข (Hedonic Value) มากซึ่งแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญ และกลุ่มตัวอย่างที่มีประสบการณ์ในการ ออกแบบน้อยกว่า 10 ปีให้ความสำคัญกับค่านิยมด้านการ เห็นแก่ตนเอง (Egoistic Value) และค่านิยมด้านการเปิด กว้างที่จะเปลี่ยนแปลง (Openness to change Value) มาก และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงผลในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยด้านค่านิยม ของกลุ่มตัวอย่าง

Dependent Variable	Mean G1	Mean G2	Mean G3	Mean G4
Biospheric Value	4.56745	4.40147	4.50866	4.39778
Altruistic Value	4.3405	4.19358	4.35169	4.17314
Egoistic Value	3.9402	4.41641	3.92588	4.15449
Hedonic Value	4.6509	4.65606	4.72474	4.68873
Traditional Value	3.8941	3.84247	3.96618	3.88611
Openness to change Value	3.0211	3.31763	2.93099	3.1095

G1 แทน กลุ่มตัวอย่างที่ 1 ผู้ออกแบบที่มีประสบการณ์ในการ ออกแบบมากกว่า 10 ปีและเคยอดแบบอาคารเขียว

G2 แทน กลุ่มตัวอย่างที่ 2 ผู้ออกแบบที่มีประสบการณ์ในการ ออกแบบน้อยกว่า 10 ปีและเคยอดแบบอาคารเขียว

G3 แทน กลุ่มตัวอย่างที่ 3 ผู้ออกแบบที่มีประสบการณ์ในการ ออกแบบมากกว่า 10 ปีและไม่เคยอดแบบอาคารเขียว

G4 แทน กลุ่มตัวอย่างที่ 4 ผู้ออกแบบที่มีประสบการณ์ในการ ออกแบบน้อยกว่า 10 ปีและไม่เคยอดแบบอาคารเขียว

ตารางที่ 2 ค่าความแปรปรวนด้านมูลค่าของกลุ่มตัวอย่าง

Dependent Variable			Mean Difference	Std. Error	Sig.
Biospheric Value	G1	G2	.16598	.08031	.059
		G3	.05879*	.07395	.027
		G4	.16967*	.05938	.004
Altruistic Value	G1	G2	.14692	.07995	.067
		G3	-.01119	.07362	.879
		G4	.16736*	.05912	.005
Egoistic Value	G1	G2	-.47621*	.08083	.000
		G3	.01432	.07443	.847
		G4	-.21429*	.05977	.000
Hedonic Value	G1	G2	-.00516	.08027	.949
		G3	-.07384	.07392	.318
		G4	-.03783*	.05936	.024
Traditional Value	G1	G2	.05163	.06792	.448
		G3	-.07208	.06255	.250
		G4	.00799	.05023	.874
Openness to change Value	G1	G2	-.29653*	.10154	.004
		G3	.09011	.09351	.336
		G4	-.08840*	.07509	.040

* The mean difference is significant at the 0.05 level.

5.2 ความเชื่อ (Belief)

การทดสอบข้อมูลของผู้ตอบแบบสอบถามพบว่า กลุ่มตัวอย่างที่เคยอดแบบอาคารเขียวมีความเชื่อด้านสิ่งแวดล้อมสูงและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ กลุ่มตัวอย่างที่มีประสบการณ์ในการออกแบบมากกว่า 10 ปีจะมีความเชื่อด้านการรับรู้ถึงผลกระทบสูงและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ กลุ่มตัวอย่างที่มีประสบการณ์ในการออกแบบน้อยกว่า 10 ปีมีความเชื่อด้านการตระหนักถึงความจำเป็นต่ำและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงผลในตารางที่ 3 และตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยด้านความเชื่อของกลุ่มตัวอย่าง

Dependent Variable	Mean G1	Mean G2	Mean G3	Mean G4
BEC	4.3261	4.20358	4.28537	4.23371
BAC	4.0198	3.92591	4.02086	3.95969
BAR	3.9844	3.84131	3.94756	3.92666
BAN	3.1650	4.4170	3.2110	4.0660
BAE	3.9980	4.1350	3.9520	4.1160
BAB	3.7060	3.8970	3.7580	3.6830

BEC แทนความเชื่อด้านสิ่งแวดล้อม (Ecological worldview)

BAC แทนความเชื่อด้านการรับรู้ถึงผลกระทบ (Awareness of consequences)

BAR แทนความเชื่อความรับผิดชอบ (Responsibility)

BAN แทนความเชื่อด้านการตระหนักถึงความจำเป็น (Awareness of need)

BAE แทนความเชื่อด้านประสิทธิภาพ (Efficacy)

BAB แทนความเชื่อด้านความสามารถ (Ability)

ตารางที่ 4 ค่าความแปรปรวนด้านความเชื่อของกลุ่มตัวอย่าง

Dependent Variable			Mean Difference	Std. Error	Sig.
BEC	G1	G2	-.12252	.07992	.126
		G3	-.04073*	.07360	.010
		G4	-.09239*	.05910	.019
BAC	G1	G2	-.09389*	.06809	.009
		G3	.00106	.06270	.987
		G4	-.06011*	.05035	.023
BAR	G1	G2	-.14309	.10671	.181
		G3	-.03684	.09827	.708
		G4	-.05774	.07891	.465
BAN	G1	G2	1.252*	.196	.000
		G3	.046	.180	.798
		G4	.901*	.145	.000

ตารางที่ 4 (ต่อ)

Dependent Variable			Mean Difference	Std. Error	Sig.
BAE	G1	G2	.137	.138	.321
		G3	-.046	.127	.717
		G4	.118	.102	.250
BAB	G1	G2	.191	.141	.177
		G3	.052	.130	.688
		G4	-.023	.104	.825

*The mean difference is significant at the 0.05 level.

5.3 บรรทัดฐาน (Norm) และพฤติกรรม (Behavior)

ข้อคำถามจากแบบสอบถามบรรทัดฐานของผู้ออกแบบคือ ท่านคิดว่าในปัจจุบันผู้ออกแบบในอุตสาหกรรมให้ความสำคัญกับการจัดทำแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์งานระบบอาคารอย่างเหมาะสม และสม่ำเสมอ การตรวจวัดการใช้พลังงานของอาคารและการออกแบบอาคารให้มีประสิทธิภาพตั้งแต่ต้น การจัดการอาคารภายหลังอาคารได้รับการเปิดใช้งานแล้วในระดับใด ข้อคำถามจากแบบสอบถามพฤติกรรมของผู้ออกแบบคือ ในปัจจุบันท่านออกแบบโดยให้ความสำคัญกับการจัดทำแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์งานระบบอาคารอย่างเหมาะสม และสม่ำเสมอ การตรวจวัดการใช้พลังงานของอาคารและการออกแบบอาคารให้มีประสิทธิภาพตั้งแต่ต้น การจัดการอาคารภายหลังอาคารได้รับการเปิดใช้งานแล้วในระดับใด การทดสอบข้อมูลของผู้ตอบแบบสอบถามพบว่า กลุ่มที่เคยออกแบบอาคารเขียวมีบรรทัดฐานในการออกแบบโดยคำนึงถึงความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมแตกต่างกับกลุ่มตัวอย่างที่ไม่เคยออกแบบอาคารเขียวอย่างมีนัยสำคัญ และพฤติกรรมการออกแบบโดยคำนึงถึงความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมของกลุ่มตัวอย่างมีความแตกต่างกันแบบมีนัยสำคัญ ดังแสดงผลในตารางที่ 5 และตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยด้านความเชื่อของกลุ่มตัวอย่าง

Dependent Variable	Mean G1	Mean G2	Mean G3	Mean G4
EAN	3.5891	3.35907	3.51906	3.33275
EAB	4.3502	4.2255	4.25381	4.19386

EAN แทนบรรทัดฐาน (Norm)

EAB แทนพฤติกรรม (Behavior)

ตารางที่ 6 ค่าความแปรปรวนด้านบรรทัดฐานและพฤติกรรม ของกลุ่มตัวอย่าง

Dependent Variable			Mean Difference	Std. Error	Sig.
EAN	G1	G2	-.23003 [*]	.11614	.048
		G3	-.07004 [*]	.10695	.013
		G4	-.25635 [*]	.08588	.003
EAB	G1	G2	-.12470 [*]	.09298	.017
		G3	-.09639 [*]	.08563	.021
		G4	-.15634 [*]	.06876	.007

*The mean difference is significant at the 0.05 level

6. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพฤติกรรมการออกแบบโดยคำนึงถึงความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมของผู้ออกแบบในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย โดยใช้ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมด้านสิ่งแวดล้อมตามหลักทฤษฎี Value-Belief-Norm Theory (VBN Theory) พบว่ากลุ่มตัวอย่างแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยกลุ่มตัวอย่างที่เคยออกแบบอาคารเขียวให้ความสำคัญกับค่านิยมด้านสิ่งแวดล้อม ความเชื่อด้านสิ่งแวดล้อม และบรรทัดฐานด้านสิ่งแวดล้อมสูงกว่ากลุ่มที่ไม่เคยออกแบบอาคารเขียว เนื่องจากมีความรู้ความเข้าใจด้านความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมสูงกว่า กลุ่มตัวอย่างที่มีประสบการณ์ในการออกแบบมากกว่า 10 ปีให้ความสำคัญกับค่านิยมด้านการเห็นแก่ผู้อื่นและความเชื่อด้านการรับรู้ถึงผลกระทบการตระหนักถึงความจำเป็นมากกว่ากลุ่มที่มีประสบการณ์ในการออกแบบน้อยกว่า 10 ปี เนื่องจากมีประสบการณ์

ในการออกแบบมากกว่า มีที่อยู่มากกว่า รับรู้ถึงผลกระทบมากกว่าคนที่มีการรับรู้ต่ำ และยังพบว่ามีกลุ่มผู้ออกแบบที่เลือกออกแบบอาคารเขียวและมีประสบการณ์สูงมีบรรทัดฐานและพฤติกรรมการออกแบบโดยคำนึงถึงความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมสูง ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าผู้ออกแบบในอุตสาหกรรมก่อสร้างควรให้ความสำคัญใน 2 ส่วน ส่วนแรกคือ ค่านิยมด้านสิ่งแวดล้อมโดยเพิ่มความรู้ความเข้าใจด้านสิ่งแวดล้อม และส่วนที่ 2 คือ ความเชื่อด้านสิ่งแวดล้อม โดยการตระหนักถึงปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งทั้ง 2 ส่วนนี้จะส่งผลให้บรรทัดฐานและพฤติกรรมในการออกแบบโดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมที่สูงขึ้น ซึ่งผู้ออกแบบมีส่วนช่วยลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมได้มากหากผู้ออกแบบมีพฤติกรรมในการออกแบบโดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อม

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Pollution Control Department. [online]. Available: <http://www.pcd.go.th/>. [August 16, 2016]
- [2] Western North Carolina Green Building Council, [online]. Available: <http://www.wncgbc.org/about/importance-of-green-building/>. [August 16, 2016]
- [3] M. Teo and M. Loosemore, "A theory of waste behaviour in the construction industry", Australia, 2001
- [4] Role of Structural Engineers in the Warming Globe, [online]. Available: <http://www.stbe.Eng.ku.ac.th/>. [August 16, 2016]
- [5] The Global Environmental Impact of Buildings, [online]. Available: <http://www.woodsolutions.com/>. [November 30, 2016]
- [6] Rohini, "Is Social Psychological Model Sufficient: Empirical Research Gaps For Understanding Green Consumer Attitudinal Behaviour" International Journal of Advanced Research in Management and Social Sciences ,vol.1 ,2012
- [7] H. Choi, J. Jang, J. Kandampully, "Application of extended VBN theory to understand consumers' decisions about green hotels", Ohio University, United States, 2015
- [8] P.C. Stern, "New environmental theories: toward a coherent theory of environmentally significant behavior", J. Soc. Issues, 56 (3), 2000
- [9] J. Adriana and L. Steg, " Sustainable transportation in Argentina: value beliefs norms and car use reduction", Argentina, 2013
- [10] L. Steg, L. Dreijerink and W. Abrahamse, "Factors influencing the acceptability of energy policies: A test of VBN theory", Netherlands, 2006
- [11] H. Paul, "Situational and personality factors as direct personal norm mediated predictors of pro-environmental behavior: Questions derived from norm-activation theory", The Hague Police Service, Netherlands, 2007
- [12] Thai's Rating of Energy and Environmental Sustainability for Preparation of New Building Construction & Major Renovation [online]. Available: <http://www.tgbi.or.th/>. [August 16, 2016]

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความฉบับนี้

ทางกองบรรณาธิการวิศวกรรมลาดกระบัง ขอขอบพระคุณท่านผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการพิจารณาบทความด้วยความขอบคุณยิ่ง และหวังว่าคงได้รับความอนุเคราะห์จากท่านด้วยดีในโอกาสต่อไป

ศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ

รศ.ดร.จันทพร ผลากรกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

ผศ.ดร.ธีรเดช วุฒิพรพันธ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

ผศ.ดร.สมบัติ เจริญวิไลศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

ธนบุรี

ผศ.ชัยรัตน์ ตันติไพบูลย์วุฒิ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รศ.ดร.วีรยา นิมอ้อย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผศ.ดร.มณฑล ฐานุตตมวงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ดร.สุริยน เปรมปรำโมทย์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ดร.จักพันธุ์ เทือกไต้ะ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ดร.สุนิรัตน์ กุศลาคัย

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความ

“บทความทางวิชาการ” หมายความว่า บทความที่เขียนขึ้นในลักษณะวิเคราะห์ วิจัย หรือเสนอแนวความคิดใหม่ ๆ จากพื้นฐานทางวิชาการที่ได้เรียบเรียงจากผลงานทางวิชาการของตนเอง หรือของผู้อื่น หรือเป็นบทความทางวิชาการที่เขียนขึ้นเพื่อเป็นความรู้ทั่วไป สำหรับประชาชน

“บทความวิจัย” หมายความว่า บทความที่มีลักษณะเป็นเอกสารที่มีรูปแบบของการวิจัยตามหลักวิชาการ เช่น มีการตั้งสมมติฐาน หรือมีการกำหนดปัญหาที่ชัดเจนสมเหตุสมผล โดยจะต้องระบุถึงวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนแน่นอน มีการค้นคว้าอย่างมีระบบ มีการรวบรวมข้อมูลพิจารณาวิเคราะห์ ตีความ และสรุปผลการวิจัยที่สามารถให้คำตอบบรรลุวัตถุประสงค์ หรือหลักการบางอย่างที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการ หรือการนำวิชาการนั้นมาประยุกต์ใช้

รูปแบบในการพิมพ์บทความ

บทความที่เสนอควรจัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word (หรือซอฟต์แวร์อื่น ที่ขนาดตัวอักษรกำหนดได้ใกล้เคียงกัน) ขนาดกระดาษที่จัดพิมพ์จะเป็นขนาด A4 โดยกำหนดขอบ (Margins) ในการตั้งหน้ากระดาษ (Page Setup) ดังนี้

- ระยะบน (Top Margin) 1” หรือ 2.54 ซม.
- ระยะล่าง (Bottom Margin) 1” หรือ 2.54 ซม.
- กั้นซ้าย (Left Margin) 1” หรือ 2.54 ซม.
- กั้นขวา (Right Margin) 1” หรือ 2.54 ซม.

การแบ่งส่วน (Section) ควรแบ่งเป็นสองส่วน ส่วนแรก กำหนด (format) เป็นคอลัมน์เดียว ส่วนที่สองกำหนดเป็น 2 คอลัมน์ โดยระยะห่างระหว่างคอลัมน์เป็น 0.26” หรือ 0.7 ซม. เนื้อเรื่อง ผู้เขียนและผู้ร่วมงาน สถานที่ทำงาน และบทคัดย่อจะอยู่ในส่วนแรก ส่วนอื่น ๆ ที่เหลือของบทความจะอยู่ในส่วนที่สอง

ขนาดตัวอักษร

รูปแบบของตัวอักษรให้ใช้ Angsana UPC สำหรับบทความที่มีภาษาไทยปนกับภาษาอังกฤษ และให้ใช้รูปแบบตัวอักษร Times New Roman สำหรับบทความซึ่งเป็นภาษาอังกฤษล้วน ขนาด (Pica Size) ของแบบตัวอักษรแบบ Angsana UPC กำหนดดังนี้ (หากเป็นรูปแบบ Times New Roman ให้ใช้ขนาดของตัวอักษรที่มีความสูงเท่ากัน)

- ชื่อเรื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
ขนาด 26 ตัวหนา
- ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน
ขนาด 14 ตัวปกติ
- สถานที่ทำงาน
ขนาด 12 ตัวปกติ
- คำว่า “บทคัดย่อ”
ขนาด 16 ตัวหนา
- ส่วนของเนื้อความในบทคัดย่อ
และส่วนของเนื้อความทั้งหมด
ขนาด 14 ตัวปกติ
- คำว่า “Abstract”
ขนาด 16 ตัวหนา
- ส่วนของเนื้อความใน Abstract
ให้ใช้ Angsana UPC ขนาด 16 ตัวปกติ

- หัวข้อและหมายเลขประจำหัวข้อ
ขนาด 16 ตัวหนา
- หัวข้อย่อยและหมายเลขประจำหัวข้อย่อย
ขนาด 14 ตัวหนา
- คำว่า “กิตติกรรมประกาศ” หรือ “Acknowledgement”
ขนาด 16 ตัวหนา
- คำว่า “เอกสารอ้างอิง” หรือ “Reference”
ขนาด 16 ตัวหนา

การพิมพ์บทความ

ให้ใช้ระยะห่างบรรทัดปกติ (Single space) เมื่อขึ้นหัวข้อใหม่ให้เว้น 1 บรรทัด ในกรณีเมื่อเอกสารจัดพิมพ์ด้วย Times New Roman ทั้งหมด ให้ใช้ระยะห่างบรรทัด เป็นหนึ่งบรรทัด (Single space) หรือ หนึ่งบรรทัดครึ่ง

ชื่อบทความ ชื่อผู้เขียน และสถานที่ทำงาน
ให้จัดพิมพ์ในตำแหน่งกลางหน้ากระดาษ

หัวข้อและหมายเลขหัวข้อ
ให้จัดพิมพ์แบบชิดซ้าย (Right Justified)

บทคัดย่อและเนื้อเรื่อง
ให้จัดพิมพ์แบบเต็มขอบ
(Left & Right Justified)

สมการ หรือ พจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน
ควรเขียนโดยใช้ Equation Editor
(รวมอยู่ใน Microsoft Word แล้ว)
โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับสมการ
ซึ่งอยู่ในวงเล็บเล็ก

คำสำคัญ (Keywords)
ให้ใส่คำสำคัญ 3 – 5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับ
กับบทความที่นำเสนอโดยให้จัดพิมพ์
ใต้บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

การส่งบทความ

บทความที่จะส่งเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกสถาบันฯ โดยเนื้อหาของบทความมีความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์

ติดต่อขอส่งได้ที่ ส่วนวิศวกรรมลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์

E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com

บทความจะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้อ่านที่ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น ๆ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด และซีดีข้อมูลบทความอีก 1 ชุด

ติดต่อสอบถามข้อมูลได้ที่

งานบริหารการวิจัย (วิศวกรรมลาดกระบัง)
ชั้น 2 อาคาร 6 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โทรศัพท์ / โทรสาร 02-329-8317

แบบฟอร์มการส่งบทความ

เลขที่อ้างอิง.....

วันที่ส่ง.....

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

.....

ชื่อบทความ(ภาษาอังกฤษ).....

.....

ประเภทบทความ



บทความวิชาการ



บทความวิจัย

Keywords (คำสำคัญ).....

.....

ชื่อ - นามสกุล ผู้เขียน (ภาษาไทย)

และ

(ภาษาอังกฤษ)

1..... 1.....

2..... 2.....

3..... 3.....

4..... 4.....

5..... 5.....

6..... 6.....

จำนวนหน้า.....หน้า

ชื่อและที่อยู่ผู้เขียนที่สามารถติดต่อได้

ชื่อ - นามสกุล.....

ที่อยู่.....

.....

เบอร์โทรศัพท์.....

E-mail.....

เอกสารประกอบการส่งบทความ

บทความต้นฉบับ 1 ชุด และ

สำเนา 3 ชุด (พร้อมลบชื่อผู้แต่งและที่อยู่)

แบบฟอร์มสั่งซื้อวัสดุสารลาดกระบ้ง และ สมัครสมาชิก

ชื่อ.....นามสกุล.....

สถานที่จัดส่งหนังสือ.....

จังหวัด.....รหัสไปรษณีย์.....โทรศัพท์.....

สมัครสมาชิกวัสดุสารลาดกระบ้ง

- | | |
|--|--|
| ☐ ปี 2555 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2558 ค่าสมัคร 200 บาท |
| ☐ ปี 2556 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2559 ค่าสมัคร 200 บาท |
| ☐ ปี 2557 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2560 ค่าสมัคร 200 บาท |

หมายเหตุ ปีละ 4 ฉบับ (รวมค่าจัดส่ง)

ต้องการซื้อวัสดุสารลาดกระบ้ง

- | | |
|---|--|
| ☐ เล่มที่ 1 / 2558 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 1 / 2559 ราคา 100 บาท |
| ☐ เล่มที่ 2 / 2558 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 2 / 2559 ราคา 100 บาท |
| ☐ เล่มที่ 3 / 2558 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 3 / 2559 ราคา 100 บาท |
| ☐ เล่มที่ 4 / 2558 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 4 / 2559 ราคา 100 บาท |
| ☐ อื่น ๆ ปีที่.....ฉบับที่.....ประจำเดือน.....พ.ศ..... | |

รวมรายการทั้งหมด.....รายการ เป็นเงิน.....บาท

ชำระค่าสั่งซื้อโดย

- ☐ เงินสด แผนกตำรา วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....
- ☐ ธนาณัติสั่งจ่ายในนาม แผนกตำรา
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบ้ง เขตลาดกระบ้ง
กรุงเทพมหานคร 10520 ที่ทำการเคาน์เตอร์บริการเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง 00016
- ☐ ผ่านบัญชีออมทรัพย์ธนาคารไทยพาณิชย์ สาขาซอยเทคโนโลยีฯ เจ้าคุณทหาร
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบ้ง เขตลาดกระบ้ง
กรุงเทพมหานคร 10520
ชื่อบัญชี “แผนกตำราและประชาสัมพันธ์” เลขที่ 088 - 2 15272 - 2

ถ่ายสำเนาใบสั่งซื้อ และส่งเอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่ :

งานบริหารการวิจัย (วัสดุสารลาดกระบ้ง) ส่วนสนับสนุนวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบ้ง เขตลาดกระบ้งกรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 0-2329-8000 ต่อ 3464, 3465

(ท่านสามารถแฟกซ์ใบสั่งซื้อ และเอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่เบอร์แฟกซ์ : 0-2329-8317

การจัดส่งหนังสือจะรวดเร็วขึ้น)

Ladkrabang Engineering Journal

The Ladkrabang Engineering Journal is a technical journal belonging to the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, (KMITL).

Contents:

The journal contains research reports, articles concerning development work and research activities carried out by the faculty staff. The objectives are to publicize and promote the research contributions and innovative works in the field of engineering.

Frequency:

The journal is published quarterly.

Policy:

Articles and reports should have engineering research values whether containing substantial supported theories, innovative works, substantial experiment results and/or fulfilled with useful and constructive discussions or reviews standardized to regional or international acceptance.

Manuscripts:

Four copies which are not exceed 8 pages with two-columns (one copy with author names, three copies without author names) of either Thai or English are to be submitted in camera ready form. The page charge from the 9th page is 500 Baht per page. To ensure that all papers are at the same standard, authors are asked to prepare their manuscripts in computerized format. Microsoft Word for windows[®] is recommended as a text processor. Others associated components such as graphs or figures should be prepared using windows-based packages.

Manuscripts are to be reviewed by at least 3 referees who are specialists in that fields. Comments and suggestions (if any) are summarized before they are passed to authors. Revised form of the manuscripts have to be resubmitted with a copy of the manuscript in a disk file.

For convenience in printing and to common standard in publication, submitted manuscripts should conform to the following orders.

Titles: Should be given in both Thai and English.

Author and co-authors: Are given without any title.

Correspondent address: Specify short address of authors. If authors are students, institution address (department, faculty and institution) is required.

Abstract: Should be given in both Thai and English.

Main theme: Should contain the following sections.

- 1.Introduction
- 2.Theory
- 3.Construction and experimental procedures
- 4.Experimental results and discussions
- 5.Conclusion or Summary

Acknowledgement: (if required)

References: Should follow the pattern given below.

- [1] P. Choeksuwan and S. Choomchuay, "The Economics Analysis of RFID Implementation in Logistic," Ladkrabang Engineering Journal, Vol.30, No.1, pp.7-12, March, 2556.
- [2] I. M. Filanovsky and H.P. Baltas, "Simple CMOS Analog Square-Rooting and Squaring Circuits," IEEE Trans. Circuits and Systems, Vol.39, No.4, pp.312-315, Sept., 1992.
- [3] R. E. Blahut, Theory and Practice of Error Control Codes, Addison-Wesley, Reading, MA, 1983.

Submission:

1. Submit two pdf files Manuscript with and without authors / affiliation at the first page.
 2. Submit the pdf file of the paper submission form.
- At E-mail : kmitl.eng.jnl@gmail.com

Published by

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.

Tel : (662) 329-8000 Ext 3464,3465

Fax : (662) 329-8317

Advisors

Dean of Engineering

Assoc.Prof. Dr.Komsan Maleesee

Editor-in-chief

Prof. Dr. Issarachai Ngamroo

Editorial Staff

Mr.Komol Wadkhean

Cover Design and Photo Books

Mrs.Atisuda Chanvikorn

Liaise & Member Relationships

Create Original Artwork & Proofreading

Distributed by

Faculty of Engineering,

Mrs.Atisuda Chanvikorn

Tel : (662) 329-8317