



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม
ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 37 ฉบับที่ 1

มกราคม – มีนาคม 2563

บทความวิจัย

1. เตาเผาต้นทุนต่ำแสดงผลและควบคุมระยะไกลผ่านระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ 1
ธงชัย พจน์เสถียร จูติพร สุทธิกุล และ วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์
2. การปรับปรุงคุณสมบัติของยางกะเทาะเปลือกด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต 6
กมลภา เรืองสิริสมบัติ และ อภิชาติ อัจฉนาเสียว
3. การออกแบบและจำลองพลศาสตร์ของไหลของใบกวนผสมในถัง สำหรับของไหลผสม 13
วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล
4. การพัฒนาเขตผลกระทบของโมเมนต์ส่งน้ำจากการขุดลึกข้างเคียง 21
รักษศิริ สุขรักษ์ พรเกษม จงประดิษฐ์ ทศพร แยมกล้า และ สุรเดช เหมัมพกุล

“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 หรือมีส่วนกับงานโดยตรง 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..... |

กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง การอ้างอิงในบทความให้ใช้หมายเลขประจำเอกสารหรือบทความที่อ้างอิง โดยตัว เลขจะอยู่ในวงเล็บใหญ่ โดยรูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิงจะเป็นดังนี้

- [1] P. Choeysuwan 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. Baltes, “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 ส่วนหน้าที่ 9 เป็นต้นไป ต้องเสียค่าตีพิมพ์หน้าละ 500 บาท ผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด โดยหน้าแรกของบทความจะมีชื่อที่อยู่ของผู้เขียน 1 หน้า และหน้าแรกของบทความที่ไม่ระบุชื่อผู้เขียนอีก 1 หน้า รวมทั้งหมด 9 หน้า และกรณารับชื่อ-นามสกุล ที่อยู่ เบอร์โทรศัพท์ติดต่อ และ E-mail address ใช้ชัดเจนในแบบฟอร์มการส่งบทความด้วย ผู้เขียนสามารถส่งผ่านระบบวารสารออนไลน์ โดยลงทะเบียนและส่งบทความ ได้ที่ ลิงก์ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions>

เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบ้ง

กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ (662) 329-8000 # 3464, 3465

โทรสาร (662) 329-8317

ที่ปรึกษา

คมบดี

รองศาสตราจารย์ ดร.คมสัน มาลีสี

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ตั้งศรีรัตน์

กองบรรณาธิการ

นายทนงค์ศักดิ์ ใจชื่นแสน

ออกแบบปก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภศูล วงษ์วานิช

นางสาวชนัญชิตา นอบน้อม

นายสถาพร พงษ์ประยูร

ติดต่อประสานงานและสมาชิกสัมพันธ์

จัดทำต้นฉบับ Artwork

พิสูจน์อักษร และรูปเล่ม

จัดจำหน่ายโดย

คณะวิศวกรรมศาสตร์

นางสาวชนัญชิตา นอบน้อม

นางอาทิสดา ขาววิกรม

โทร. 02-329-8317



LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ทรงคุณวุฒิในกองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง”

ศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย

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.สราวุฒิ สุจิตตรจ

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

ศาสตราจารย์ ดร.โมนาย ไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ สุระกำพลธร

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร. กอบชัย เดชหาญ

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร-

ลาดกระบัง



วิศวกรรมลาดกระบัง

Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันที่ 20 มีนาคม 2563

เรื่อง แจ้งเพื่อทราบ

เรียน อาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และผู้สนใจ

กองบรรณาธิการ “วิศวกรรมลาดกระบัง” มีความประสงค์ขอเรียนแจ้งให้ท่านทราบรายละเอียดเกี่ยวกับงานวิศวกรรมลาดกระบัง ดังนี้

1. เว็บไซต์ใหม่ของวารสาร คือ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej>
2. เนื้อหาของบทความให้มีความยาวจำนวนหน้า ความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์ หากจำนวนหน้าของเนื้อหามากกว่า 8 หน้าขึ้นไป ในส่วนของหน้าที่ 9 เป็นต้นไป คิดราคาค่าตีพิมพ์เพิ่มหน้าละ 500 บาท (ห้าร้อยบาทถ้วน) โดยผู้แต่งต้องชำระเงินค่าตีพิมพ์ในจำนวนหน้าที่เกิน 8 หน้า หลังจากที่ยื่นบทความแก้ไขสมบูรณ์แล้ว และได้รับหนังสือการตอบรับการตีพิมพ์จากงานวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง
3. การส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวิศวกรรมลาดกระบัง ผู้เขียนบทความสามารถเสนอรายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่เกี่ยวข้องในสาขาที่ท่านส่งมา จำนวน 2 ท่าน โดยแนบมาพร้อมแบบฟอร์มการส่งบทความด้วยทุกครั้ง

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ จักขอบพระคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(ศ.ดร.วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์)

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

เตาเผาต้นทุนต่ำแสดงผลและควบคุมระยะไกลผ่านระบบ ประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ

Low Cost Furnace for Monitoring and Control via Remote Wireless Network in Cloud Service

ธงชัย พจน์เสถียร^{1,2,*} ธิติพร สุทธิกุล^{2,3} วรพงษ์ ตั้งศรีรัตน์⁴

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมวัดและระบบอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง

²กลุ่มวิจัยเฉพาะทางเทคโนโลยีพลาสมาและไฟฟ้าอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง

³สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมกระบวนการเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง

⁴ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Thongchai Pothsatien^{1,2,*} Thitiporn Suttikul^{2,3} Warapong Tangsrirat⁴

¹Department of Instrumentation and Automation Engineering Technology Faculty of Engineering and Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Rayong Campus.

²Specialized Research Group in Plasma and Automatic Electrical Technology King Mongkut's University of Technology North Bangkok Rayong Campus.

³Department of Chemical Process Engineering Technology Faculty of Engineering and Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Rayong Campus.

⁴Department of Measurement and Control Engineering Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

*Corresponding author E-mail: Thongchai.golf@outlook.com

Received: February 3, 2020 Revised: March 25, 2020 Accepted: March 25, 2020

บทคัดย่อ

การพัฒนาเตาเผาต้นทุนต่ำที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ (Furnace) เพื่อทดแทนเตาเผาแบบเดิมที่มีราคาสูง และมีข้อจำกัดในการใช้งานได้แก่ การเผาวัสดุในเตาเผาจะเพิ่มอุณหภูมิแบบลำดับตามเวลาที่กำหนดจำนวนหลายลำดับซึ่งใช้เวลาไม่ต่ำกว่า 15 - 20 ชั่วโมงหรือมากกว่าตามงานที่ใช้ โดยผู้ใช้งานไม่สามารถรู้ว่ขณะนี้กระบวนการทำงานของเตาเผาทำงานอยู่ในขั้นตอนไหน ลำดับที่เท่าไร อุณหภูมิเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ ผู้ใช้งานต้องมาดูที่หน้าเครื่องและขั้นตอนสุดท้ายจะต้องรออุณหภูมิภายในของเตาเผาตกลงมาใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องจึงจะเปิดเตาเพื่อนำวัสดุออกมาได้ ช่วงเวลาดังกล่าวผู้ใช้งานไม่สามารถทราบเวลาที่แน่นอนได้ ผู้วิจัยจึงคิดพัฒนาเตาเผาต้นทุนต่ำที่สามารถแสดงผลและควบคุมระยะไกลผ่านระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ (Low Cost Furnace for Monitoring and Control via Remote Wireless Network in Cloud Service) ซึ่งสามารถแสดงสถานะการทำงานในสภาวะต่างๆ และควบคุมการทำงานพร้อมทั้งเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิแบบระยะไกลผ่านระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ โดยใช้คอมพิวเตอร์ สมาร์ทโฟน แท็บเล็ต เป็นอุปกรณ์ควบคุมและตรวจสอบการเข้าใช้งานเตาเผาจากทุกๆ พื้นที่ที่เข้าถึงเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

คำสำคัญ: เตาเผาต้นทุนต่ำ การควบคุมระยะไกลผ่านเครือข่ายไร้สาย ระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ

Abstract

The objective of this work improve a Low Cost furnace used in a laboratory in order to solve the limitations of high price and purchased furnace, unable remote monitor and control. The furnace use in prepare many materials and catalysts by several calcination steps and long operating time requirement (15-20 hours at least). Its step order and temperature were displayed only on a furnace screen that was inconvenient for a user waited for a long time until all steps finished.

Therefore, remote wireless network in cloud service was applied to the furnace for monitoring its status and temperature through a computer, tapeless, or smart phone via internet network. In practical, real-time data monitoring displayed efficiently on the personal devices. The operating system could be controlled and the temperature was able to reset via remote wireless network in cloud service by commanding from the devices.

Keywords: Low Cost Furnace, Remote Control via Wireless Network, Cloud Service

1. บทนำ

เตาเผาต้นทุนต่ำเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการเตรียมวัสดุให้มีคุณสมบัติตามความต้องการ การเผาวัสดุใช้กระแสไฟฟ้าเป็นพลังงานโดยมีฮีตเตอร์ (Heater) ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้เป็นความร้อน เตาแบบนี้มีข้อดีกว่าแบบอื่นคือปราศจากสิ่งเจือปนที่เกิดจากการเผาไหม้ การเผาแบบนี้จะไม่มีเปลวไฟ ไม่มีควัน เรียกสภาวะการเผาแบบนี้ว่าการเผาสันดาปสมบูรณ์ (Absolute Oxidation Conduction) จุดประสงค์การใช้เตาเผาเนื้อคือใช้หลอมโลหะเผาเซรามิก ทำให้อายุการใช้งานเพื่อเปลี่ยนรูปร่าง หรือเผาเพื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้ได้คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีตามต้องการ ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนสภาพวัตถุดิบที่ไม่สามารถเปลี่ยนกลับคืนสู่สภาพเดิมได้อีก เตาเผาสามารถเผาได้สูงสุดที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียสหรือมากกว่า ขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งาน

อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วในทางปฏิบัติเวลาที่ใช้ในกระบวนการเผาวัสดุ เริ่มต้นจากการเพิ่มอุณหภูมิห้องเผาจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิสูงตามต้องการ จากนั้นเผาต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูง หลังจากครบระยะเวลาที่ต้องการฮีตเตอร์จะถูกตัด ส่งผลให้อุณหภูมิของห้องเผาลดลง จะเห็นได้ว่าเวลาดำเนินการทั้งหมดยาวนาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขั้นตอนการลดลงของอุณหภูมิเตาเผาไม่สามารถคาดการณ์ระยะเวลาการเย็นตัวของวัสดุที่แน่นอนได้ เพื่อนำวัสดุออกจากเตาเผาที่อุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง [1]-[3] จากรูปที่ 1 การทำงานของเตาเผาเริ่มจากอุณหภูมิห้องที่ 25 องศาเซลเซียส มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสต่อวินาที ไปจนถึง 500 องศาเซลเซียส และควบคุมให้อุณหภูมิคงที่ ณ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

หลังจากนั้นเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 800 องศาเซลเซียส มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 2.5 องศาเซลเซียสต่อวินาที และควบคุมให้อุณหภูมิคงที่ ณ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิห้องโดยให้เตาเผาลดความร้อนตามธรรมชาติ เตาเผาที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมีราคาสูง และมีข้อจำกัดในการใช้งานจากการที่ต้องเฝ้าตรวจสอบการทำงานว่าทำงานอยู่ในสถานะใด อุณหภูมิปัจจุบันอยู่ที่เท่าใด และระหว่างการทำงาน ถ้ามีข้อผิดพลาดในกระบวนการทำงานก็ไม่สามารถหยุดการทำงานหรือเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิจากระยะไกลได้ [1]-[5]

ข้อจำกัดดังกล่าวทำให้เกิดการพัฒนาเตาเผาต้นทุนต่ำเพื่อทดแทนเตาเผาแบบเดิมที่มีราคาสูง และแก้ไขข้อจำกัดในการใช้งานต่างๆ ให้สามารถแก้ไขค่าอุณหภูมิของเตาเผาได้ สังเกตการทำงานและแสดงสถานะการทำงานของเตาเผาจากระยะไกลผ่านระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ (Cloud Computing) โดยใช้โทรศัพท์มือถือ หรือเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เข้าถึงเครือข่ายอินเทอร์เน็ตสำหรับการควบคุมระยะไกลได้ [6]-[11]

2. เตาเผาต้นทุนต่ำสำหรับแสดงผลและควบคุมระยะไกลผ่านระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ

โครงสร้างการทำงานของเตาเผาต้นทุนต่ำแสดงผลและควบคุมระยะไกลผ่านระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆแสดงดังรูปที่ 2 แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ 1. เตาเผา 2. ระบบควบคุม 3. ระบบสื่อสารไร้สายระยะไกลผ่านระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ มีการทำงานดังต่อไปนี้

2.1 เตาเผา

รูปที่ 3 แสดงเตาเผาต้นทุนต่ำที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ โดยมี จนวนกันความร้อนปิดด้านนอกของอิฐทนไฟ ซึ่งอิฐทนไฟแต่ละก้อนใช้คอนกรีตชนิดพิเศษที่ทนอุณหภูมิสูงในการประสานและเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน เตาเผาออกแบบให้มีปริมาตร 17 ลิตร มีแท่งวัสดุให้ความร้อนแบบขดลวดขนาด 4000 วัตต์

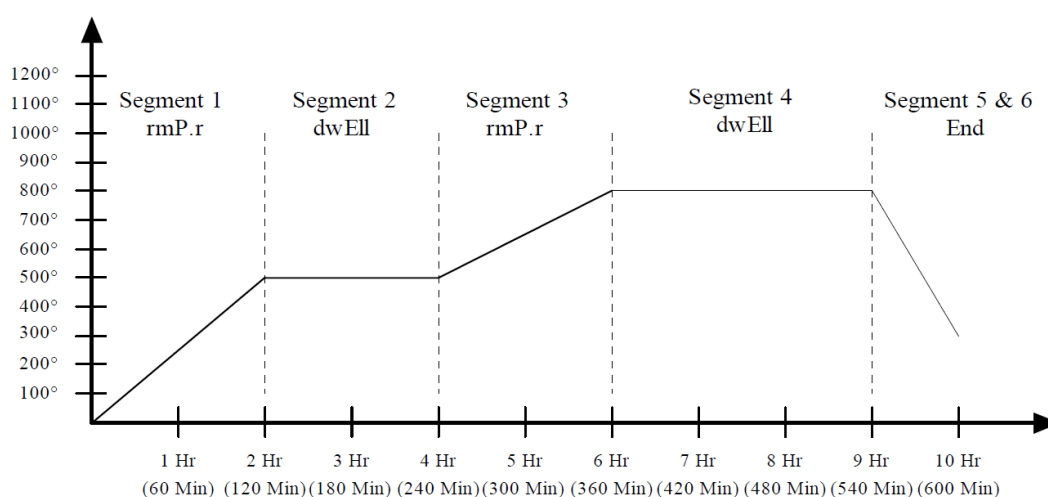
2.2 ระบบควบคุม

อุปกรณ์ควบคุมใช้พีแอลซี (PLC) รุ่น S7-1200 ของบริษัทซีเมนส์ แสดงดังรูปที่ 2 เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของขดลวดความร้อนผ่านทางวงจรขับเคลื่อนโซลิดสเตตรีเลย์ (SSR) แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ อ่านค่าอุณหภูมิเตาเผาจากเทอร์โมคัปเปิลชนิด เค (Thermocouple type K) ที่ติดตั้งบริเวณด้านบนของเตาเผาและทำการตรวจสอบค่าอุณหภูมิของเตาเผาตามที่กำหนดไว้ การควบคุมทำงานแบบ PID พร้อมกำหนดอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียสต่อนาที) ได้สูงสุด 32 ขึ้นตอน ค่าอุณหภูมิของเตาเผา และสถานะการทำงานต่างๆ แสดงผล

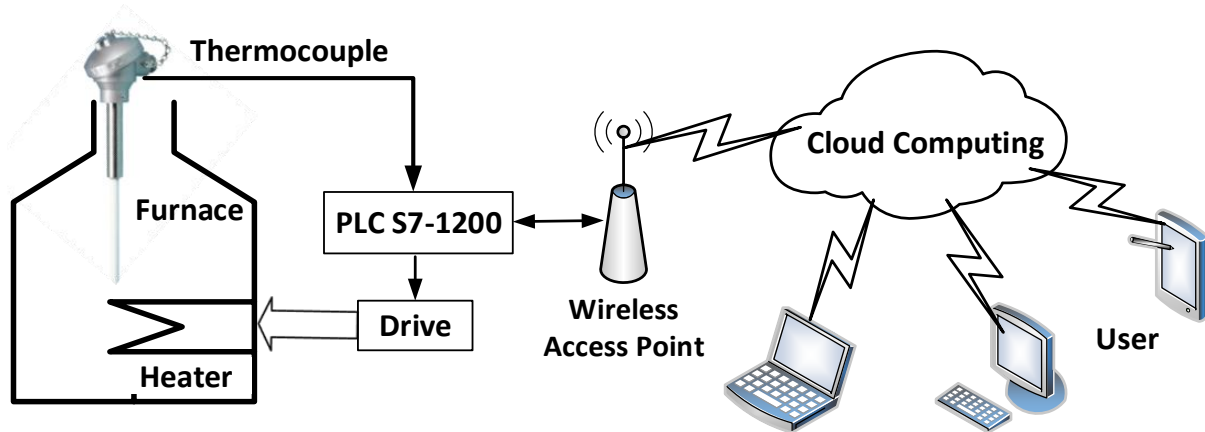
พร้อมทั้งเปลี่ยนแปลงค่าการทำงานต่างๆ ของเตาเผาจากระยะไกลผ่านระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆได้

2.3 ระบบสื่อสารไร้สายระยะไกล

พีแอลซีจะส่งข้อมูลที่อ่านได้ผ่านจุดเชื่อมต่อไร้สาย (Wireless Access Point) ค่าอุณหภูมิปัจจุบันภายในและภายนอกเตาเผา ค่ากระแสไฟฟ้า ระยะเวลาที่ใช้งาน ตรวจเช็คการปิดประตูเตาเผา ข้อมูลทั้งหมดจะถูกนำไปแสดงผลและบันทึกข้อมูลบนระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ เพื่อให้ผู้ใช้งานเข้ามาดูและควบคุมการทำงานของเตาเผาแบบตามเวลาจริง (Real Time) ที่โทรศัพท์มือถือหรือเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิที่ต้องการควบคุม และสั่งหยุดการทำงานของเตาเผาได้เมื่อเกิดสิ่งผิดปกติในระบบ โดยเลือกใช้ระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆของเว็บ <http://v-box.net/> เนื่องจากรองรับการสื่อสารแบบสองทิศทาง กล่าวคือสามารถส่งข้อมูลจากพีแอลซีไปแสดงผลที่ระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆและสั่งงานจากระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆกลับไปยังพีแอลซีได้ และไม่มีค่าใช้จ่ายในการใช้งาน



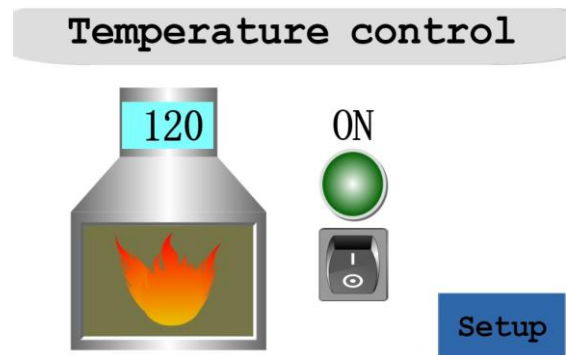
รูปที่ 1 อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่ใช้ในเตาเผา



รูปที่ 2 ภาพรวมของระบบที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 3 เตาเผาไฟฟ้าที่ถูกออกแบบใหม่



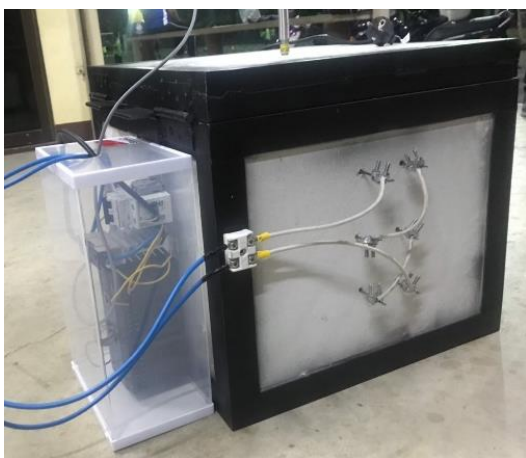
รูปที่ 5 หน้าจอแสดงผลการทำงานของเตาเผาแบบระยะไกลผ่านระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆที่พัฒนาขึ้น

4. ผลการทดลองการทำงาน

รูปที่ 4 แสดงการติดตั้ง PLC เข้ากับเตาเผาที่พัฒนาขึ้น และทำการทดลองการทำงานของเตาเผาโดยการสั่งงานตัวควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาจากระยะไกลผ่านโทรศัพท์มือถือ แสดงผลการทำงานดังรูปที่ 5 โดยการปรับอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่ใช้ในเตาเผาแบบลำดับตามรูปที่ 1 ผลปรากฏว่าสามารถสั่งงาน และแสดงผลการทำงานต่างๆ ของเตาเผาเช่น สถานะการทำงานปัจจุบัน และอุณหภูมิของเตาเผาได้อย่างถูกต้องเป็นไปตามที่ออกแบบ และสามารถสั่งหยุดการทำงานจากระบบได้

5. สรุป

บทความนี้ได้ทำการพัฒนาเตาเผาต้นทุนต่ำที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ให้มีความสามารถในการแสดงผลการทำงานและควบคุมการทำงานต่างๆ ของเตาเผา แสดง



รูปที่ 4 การติดตั้ง PLC เข้ากับเตาเผาไฟฟ้า

สถานการณ์ปัจจุบัน และอุณหภูมิของเตาเผาจากระยะไกลผ่านระบบประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ เพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้งาน สามารถปรับเปลี่ยนอุณหภูมิหรือลำดับในการทำงาน และยังสามารถสั่งควบคุมการทำงานจากระยะไกลได้เมื่อเกิดเหตุผิดพลาดทำให้เตาเผาต้นทุนต่ำที่พัฒนาขึ้นมีความสะดวกในการใช้งาน และความปลอดภัยในการใช้งานมากขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Kim, Y. Lee, Yonghwi Kim, K. Mingle, J. Lauterbach, D.A. Blom, T. Vogt and Y. Lee, "Ethylene Epoxidation Catalyzed by Ag Nanoparticles on Ag-LSX Zeolites formed by Pressure- and Temperature-Induced Auto-Reduction," *Chemistry - A European Journal*, Vol.24, No.5, pp. 1041-1045, Jan., 2018.
- [2] J.E. van den Reijen, S. Kanungo, T.A.J. Welling, M. Versluijs-Helder, T.A. Nijhuis, K.P. de Jong and P.E. de Jongh, "Preparation and particle size effects of Ag-Al₂O₃ catalysts for ethylene epoxidation," *Journal of Catalysis*, Vol.356, pp. 65-74, Nov., 2017.
- [3] H. Wang, J. Hana, B. Zhao, L. Qin, Y. Wang and F. Yu, "Non-thermal plasma enhanced dry reforming of CH₄ with CO₂ over activated carbon supported Ni catalysts," *Molecular Catalysis*, Vol.475, pp. 110486, June, 2019.
- [4] S. Sandesh, G. Shanbhag and A. Bhimmarao Halgeri, "Transesterification of Glycerol to Glycerol Carbonate Using KF/Al₂O₃ Catalyst: The Role of Support and Basicity," *Catalysis Letters*, Vol.143, No.11, pp. 1226-1234, June, 2013.
- [5] N.A. Khan, E.M. Kennedy, B.Z. Dlugogorski, A.A. Adesina and M. Stockenhuber, "Partial oxidation of methane with nitrous oxide forms synthesis gas over cobalt exchanged ZSM-5," *Catalysis Communications*, Vol.53, pp. 42-46, April, 2014.
- [6] M. Logan, M. Safi, P. Lens and C. Visvanathan, "Investigating the performance of internet of things based anaerobic digestion of food waste," *Process Safety and Environmental Protection*, Vol.127, pp. 277-287, May, 2019.
- [7] H. He, T. Zhao, H. Guan, T. Zhong, H. Zeng, L. Xing, Y. Zhang and X. Xue, "A water-evaporation-induced self-charging hybrid power unit for application in the Internet of Things," *Science Bulletin*, Vol.64, No.19, pp. 1409-1417, June, 2019.
- [8] I. Merelli, L. Morganti, E. Corni, C. Pellegrino, D. Cesini, L. Roverelli, G. Zereik and D. D'Agostino, "Low-power portable devices for metagenomics analysis: Fog computing makes bioinformatics ready for the Internet of Things," *Future Generation Computer Systems*, Vol.88, pp. 467-478, May, 2018.
- [9] K. Alexopoulos, S. Koukas, N. Boli and D. Mourtzis, "Architecture and development of an Industrial Internet of Things framework for realizing services in Industrial Product Service Systems," *Procedia CIRP*, Vol.72, pp. 880-885, 2018.
- [10] J. Yang, C. Wang, Q. Zhao, B. Jiang, Z. Lv and A.K. Sangaiah, "Marine surveying and mapping system based on Cloud Computing and Internet of Things," *Future Generation Computer Systems*, Vol. 85, pp. 39-50, Feb., 2018.
- [11] X. Zhao, Z. Kang, Q. Liao, Z. Zhang, M. Ma, Q. Zhang and Y. Zhang, "Ultralight, self-powered and self-adaptive motion sensor based on triboelectric nanogenerator for perceptual layer application in Internet of things," Vol.48, pp. 312-319, March, 2018.

การปรับปรุงคุณสมบัติของยางกะเทาะเปลือก

ด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต

Improving the Properties of Rubber Roll Husker

with Calcium Carbonate

กมลภา เรืองศิริสมบัติ* และ อภิชาติ อาจนาสีขาว

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Kamalapha Ruengsirisombut* and Apichart Artnasaew

Department of chemical engineering, Khonkaen university.

*Corresponding author E-mail: mear_eye16@hotmail.com

Received: January 14, 2020 Revised: March 24, 2020 Accepted: March 25, 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสารตัวเติมในการผสมยางคอมพาวด์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของยางกะเทาะเปลือกให้ทนทานต่อการใช้งานให้นานยิ่งขึ้น ซึ่งสารตัวเติมที่ใช้ในงานนี้ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกา โดยผสมแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน 5 สูตร (CC10-Si50, CC20-Si40, CC30-Si30, CC40-Si20 และ CC50-Si10) เทียบกับสูตรยางคอมพาวด์ทั่วไป (CC00-Si60) และทำการศึกษาความต้านทานแรงดึง ความยืด ความแข็งทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มที่ 80 °C ค่าทอร์กต่ำสุดและค่าทอร์กสูงสุดตามมาตรฐาน จากผลการศึกษาพบว่ายางคอมพาวด์สูตรที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต 20 phr และซิลิกา 40 phr (CC20-Si40) มีค่าความต้านทานแรงดึง 26.3 MPa ค่าความยืด 545% ความแข็งก่อนบ่ม 77.8 IRHD หลังบ่ม 77.9 IRHD และค่าทอร์กต่ำสุด 2.21 dN-M ค่าทอร์กสูงสุด 28.52 dN-M ตามลำดับ ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดจากสูตรทั้งหมด และเมื่อเทียบกับสูตรยางคอมพาวด์ทั่วไปให้ผลที่ดีกว่าเช่นกัน

คำสำคัญ: ยางกะเทาะเปลือก ยางคอมพาวด์ แคลเซียมคาร์บอเนต

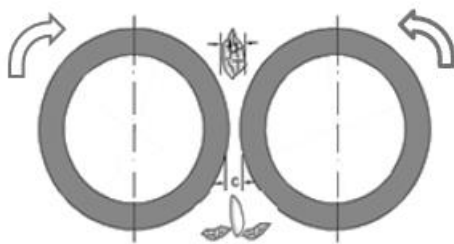
Abstract

This research aimed to study the effect of fillers in a rubber compound for improving the mechanical properties of rubber roll husker to withstand longer usage. There were two types of fillers in this mixture, such as calcium carbonate and silica. In this experiment, five ratios of calcium carbonate and silica were studied (CC10-Si50, CC20-Si40, CC30-Si30, CC40-Si20 and CC50-Si10) by comparing with general rubber compound ratio (CC00-Si60). Additionally, tensile strength, elongation, hardness at pre- and post-accelerated curing and minimum and maximum torques were also investigated. The result was found that calcium carbonate at 20 phr and silica at 40 phr (CC20-Si40) showed highest mechanical properties, that is the tensile strength of 26.3 MPa, elongation of 545%, hardness at pre- and post-accelerated curing of 77.8 and 77.9 IRHD, minimum and maximum torques of 2.21 and 28.52 dN-M, respectively. In addition, this ratio provided better mechanical properties filler than the general rubber compound ratio as well.

Keywords: Rubber roll husker, Compound rubber, Calcium carbonate

1. บทนำ

การกะเทาะเปลือกเป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการสีข้าว ซึ่งเป็นการแยกเปลือกและเมล็ดข้าวออกจากกัน โดยเครื่องจักร ประกอบไปด้วยยางกะเทาะ 2 ลูกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว ความยาว 10 นิ้ว เนื้อยางมีความหนา 1 นิ้ว หล่ออยู่บนแกนเหล็ก ยางกะเทาะด้านซ้ายจะถูกติดตั้งอยู่กับที่ ส่วนยางกะเทาะด้านขวาจะถูกติดตั้งบนเพลาลูกเบี้ยวที่สามารถปรับเข้า-ออกได้เพื่อปรับระยะห่างระหว่างยางกะเทาะซึ่งยางกะเทาะทั้งสองลูกจะหมุนในทิศทางตรงข้ามกัน โดยที่ยางกะเทาะที่เพลาลูกเบี้ยวที่ได้นั้นจะมีความเร็วในการหมุนช้ากว่ายางกะเทาะที่อยู่กับที่ ความเร็วรอบยางกะเทาะที่เหมาะสมที่มีอัตราการกะเทาะสูงสุดคือ รอบเร็ว 1050 รอบ/นาที รอบช้า 865 รอบ/นาที ซึ่งมีผลทำให้ความเร็วเชิงเส้นของยางกะเทาะต่างกันที่ 25 เปอร์เซ็นต์ [1] โดยมีลักษณะการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการทำงานของเครื่องกะเทาะ

ลูกยางกะเทาะเปลือกจะเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากอุณหภูมิของลูกยางสูงขึ้นซึ่งเกิดจากการเสียดสีกันระหว่างเมล็ดข้าวกับลูกยางกะเทาะมีผลให้ในทางปฏิบัติงานพนักงานต้องคอยเปลี่ยนสลับลูกยางกะเทาะอยู่เสมอในระหว่างการสีข้าว หรือทำการพักลูกยางทุก 8 ชั่วโมง เพื่อลดอุณหภูมิของยางกะเทาะ

ยางกะเทาะที่มีอยู่ในท้องตลาดทั่วไปมีข้อกำหนดตามมาตรฐาน มอก.633-2529 [2] โดยมีค่าแรงต้านทานการดึง 9.8 MPa ค่าความยืดร้อยละ 200 ค่าความแข็งก่อนบ่มแรง 80-95(+/-3) IRHD และค่าความแข็งหลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 80 °C 72(+/-10) IRHD แต่จากการศึกษาของอภิชาติ อาจนาลีและคณะ [3] พบว่าเมื่ออุณหภูมิของยางกะเทาะเพิ่มขึ้นข้าวเปลือกที่กะเทาะได้จะมีการแตกหักเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการปรับปรุงคุณสมบัติของยางกะเทาะจึงมีความจำเป็น จากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดที่ทำการปรับปรุงคุณสมบัติของยางกะเทาะเปลือก แต่พบว่าจากงานวิจัยของ

วีรเดช พินเสนา และคณะ[4] ได้ทำการผสมสารตัวเติมชนิดซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนตในยางโพลีเอทิลีน พบว่าสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงมีค่าลดลงมีซิลิกามีค่ามากกว่าที่ 20 phr และปริมาณสารตัวเติมซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมคือ 20 phr และ 20-30 phr ตามลำดับ ในปี 2559 จ्ञานัญวิทย์และคณะ[5] ได้ศึกษาการเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในยางธรรมชาติ พบว่ายางธรรมชาติที่มีการเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีสมบัติเชิงกลได้ดีกว่ายางธรรมชาติทั่วไปคือ ค่ามอดูลัสและความทนทานต่อแรงดึงที่ดีขึ้น และในปี 2550 นุชยา รัตนสุภา และ วิริญญา แก้ววัฒนะ[6] ได้ศึกษาสารตัวเติม 3 ชนิด คือ แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว และซีโอไลต์ที่ได้จากธรรมชาติในยางสังเคราะห์ชนิด EPDM พบว่า เมื่อมีปริมาณสารตัวเติมที่เท่ากัน การเติมด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต จะสูงเร็วที่สุด และมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นพบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลได้ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุงสมบัติของยางกะเทาะเปลือกโดยใช้สารตัวเติมในการผสมยางคอมพาวด์ด้วยการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของยางกะเทาะเปลือกให้ทนทานต่อการใช้งานให้นานยิ่งขึ้น แต่การเติมสารตัวเติมในสูตรยางคอมพาวด์ปกตินั้นจะมีสารตัวเติมไม่เกิน 60 phr (phr หรือ part of hundred of rubber คือ ส่วนโดยมวลของสารนั้นในส่วนผสมของยาง 100 ส่วนโดยมวล) [7] เพราะในกรณีที่มีการเติมมากเกินไปจะทำให้ยางเกิดการบวม การปูด จนไปถึงทำให้ยางขึ้นรูปไม่ได้ ปัจจุบันสารตัวเติมปกติจากสูตรยางคอมพาวด์ใช้เฉพาะซิลิกาเท่านั้นซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนตแล้วพบว่าซิลิกามีราคาที่สูงมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต แต่ในการใช้งานจริงต้องมีการเติมซิลิกาดำเนื่องจากต้องการสมบัติบางอย่างของซิลิกาดำนั้นปริมาณของสารตัวเติมทั้งซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตต้องรวมกันไม่เกินที่ 60 phr และเติมสารเคมีที่ใช้สำหรับยางคอมพาวด์เพื่อให้ยางความพาวด์มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานดังแสดงในตารางที่ 1 [8]

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การนำยางกะเทาะเปลือกในท้องตลาดมาทดสอบ

คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกล

เพื่อเป็นข้อมูลในการปรับปรุงยางกะเทาะเปลือกผู้วิจัยได้นำตัวอย่างของยางกะเทาะเปลือกทั่วไปในท้องตลาด ได้แก่ บริษัท ก บริษัท ข บริษัท ค บริษัท ง บริษัท จ บริษัท ฉ บริษัท ช และบริษัท ซ มาทำการทดสอบคุณสมบัติดังนี้ ค่าทดสอบค่าแรงต้านทานการดึงตามมาตรฐาน ASTM D412 [9] ค่าความยืดตามมาตรฐาน ASTM D412[9] ค่าความแข็งทั้งก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่งที่ 80°C ตามมาตรฐาน Shore A [10] นอกจากนี้ยังนำลูกยางกะเทาะจากบางบริษัทมาทำการทดสอบลักษณะทางกายภาพ คือ น้ำหนักของแกนและของยาง น้ำหนักเฉพาะแกน น้ำหนักเฉพาะลูกยาง ความหนาเฉพาะลูกยาง ลักษณะผิวของลูกยาง ชนิดแกน จำนวนรูน๊อต และความหนาของแกนเพิ่มเติมด้วย

2.2 การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของยางกะเทาะเปลือก

ขั้นแรกทำการผสมยางคอมพาวด์จากสูตรยางคอมพาวด์สูตรปกติก่อนโดยนำยางไนไตรล์ความบริสุทธิ์ 40% มาทำการผสมสารเคมียางโดยใช้เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ให้ความร้อนที่ 80 °C จึงนำสารเคมียางมาผสมตามลำดับขั้น ดังนี้ ซิงค์ออกไซด์ กรดสเตียริก ซัลเฟอร์ ฟีนอลิกเรซิน ซิลิกา ไทเทเนียมไดออกไซด์ ไดออกทิลพาเลท ไดเอทิลีนไกลคอล แอซซีเลียวทีเอ็มทีดี และมอนฟลักซ์ซีบีเอส ตามลำดับ ซึ่งสมบัติของสารเคมีต่างๆมีผลต่อยางคอมพาวด์ชนิดยางไนไตรล์แสดงในตารางที่ 1 แล้วนำยางทั่วไปอัดเบ้าด้วยเครื่องอัดเบ้าแบบไฮโดรลิก โดยใช้อุณหภูมิ 150 °C ตามเวลา 90% cure time จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ดังนี้ ทดสอบค่าแรงต้านทานการดึงตามมาตรฐาน ASTM D412 ค่าความยืดตามมาตรฐาน ASTM D412 ค่าความแข็งทั้งก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่งที่ 80°C ตามมาตรฐาน shore A ค่าทอร์คต่ำสุดและค่าทอร์คสูงสุดโดยเครื่อง MDR (Moving Die Rheometer) ที่ 150 °C จากนั้นทำการปรับปรุงยางคอมพาวด์โดยนำยางไนไตรล์ความบริสุทธิ์ 40% มาทำการผสมสารเคมียางโดยใช้เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง ให้ความร้อนที่ 80°C จึงนำสารเคมียางมาผสมตามลำดับที่แสดงในตารางที่ 1 โดยใช้สารตัวเติมชนิดซิลิกาเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงและเป็นสารเข้ากับยางมีข้อสูงเช่น NBR ได้ดี ผลของการเสริมแรงของซิลิกาจะทำให้ยางมีความทนทานต่อการฉีกขาดความแข็งแรงและความต้านทานต่อการขาดมากขึ้น ส่วนแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นสารตัวเติมอีกชนิด

หนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง มีหลายเกรด โดยเกรดที่เลือกใช้คือเกรดที่มีการผสมสารสเตียเรท ซึ่งจะช่วยให้ซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตมีการกระจายตัวได้ดีขึ้น การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะทำให้ยางคอมพาวด์มีคุณสมบัติเชิงกลของยางเพิ่มขึ้นแต่เพื่อป้องกันการบวมของยางในการทดลองนี้จึงรักษาผลรวมของปริมาณซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตให้คงที่เท่ากับ 60 phr ทุกการทดลอง ซึ่งสภาวะในการทดลองคือปริมาณโดยน้ำหนักของแคลเซียมคาร์บอเนต-ซิลิกา (CC-Si) เท่ากับ CC10-Si50, CC20-Si40, CC30-Si30, CC40-Si20 และ CC 50-Si10 ตามลำดับ เนื่องจากในยางคอมพาวด์ปกติจะมีการเติมสารตัวเติมไม่เกิน 60 phr เพราะถ้าเติมมากกว่านี้จะทำให้ยางไม่สามารถขึ้นรูปได้หรือเรียกทั่วไปได้ว่ายางบวม จากนั้นนำยางคอมพาวด์ที่ปรับปรุงแล้วอัดเบ้าด้วยเครื่องอัดเบ้าแบบไฮโดรลิก โดยใช้อุณหภูมิ 150 °C ตามเวลา 90% cure time ก่อนนำมาทดสอบค่าคุณสมบัติเชิงกลคือ ค่าแรงต้านทานการดึงตามมาตรฐาน ASTM D412 ค่าความยืดตามมาตรฐาน ASTM D412 ตารางที่ 1 สมบัติของสารเคมีต่างๆที่มีผลต่อยางคอมพาวด์ชนิดยางไนไตรล์

สารเคมี	ผลที่มีต่อยางคอมพาวด์
ซิงค์ออกไซด์	สารกระตุ้นปฏิกิริยาของรูป
แคลเซียมคาร์บอเนต	เพิ่มความแข็งของยางและช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาได้เล็กน้อย
กรดสเตียริก	สารกระตุ้นปฏิกิริยา
ซัลเฟอร์	สารทำให้ยางคงรูป
ฟีนอลิกเรซิน	สารทำให้ยางนิ่มและทำให้ยางเข้ากับสารตัวเติมต่างๆได้ดี
ซิลิกา	สารตัวเติมเสริมแรง
ไทเทเนียมไดออกไซด์	สารเพิ่มสี
ไดออกทิลพาเลท	เพิ่มความยืดหยุ่นและลดความแข็งเปราะ
ไดเอทิลีนไกลคอล	เร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ผลิตยางได้ง่ายขึ้น
แอซซีเลียวทีเอ็มทีดี	สารเร่งสภาพ cure
มอนฟลักซ์ซีบีเอส	สารเร่งปฏิกิริยา

ค่าความแข็งทั้งก่อนบ่มแรงและหลังบ่มแรงที่ 80 °C ตามมาตรฐาน shore A ค่าทอร์คต่ำสุดและค่าทอร์คสูงสุดโดยเครื่อง MDR ที่ 150 °C

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ยางกะเทาะเปลือกที่ใช้ในการทดลองตลอดทั้งไป

ผลการทดสอบค่าแรงต้านทานการดึง ค่าความยืด ค่าความแข็งก่อนบ่มแรง และค่าความแข็ง หลังบ่มแรงที่อุณหภูมิ 80 °C ของยางกะเทาะที่ใช้ทั่วไปในท้องตลาดแสดงตามตาราง 2

ที่ 2 จากผลการทดสอบยางกะเทาะเปลือกข้าวที่นิยมใช้ในท้องตลาดทั่วไปมีสมบัติเชิงกลสูงกว่ามาตรฐาน มอก. มาก มีผลให้การขึ้นของจครับรอง มอก. ของบริษัทต่างๆ มีน้อย โดยยางจากเวียดนาม (บริษัท ค) มีสมบัติดีกว่ายางที่ผลิตในเมืองไทยเกือบเท่าตัว ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีของยางกะเทาะจากเวียดนาม ส่วนสมบัติทางกายภาพของยางกะเทาะที่นิยมใช้ในท้องตลาดแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ยางที่ผลิตในเมืองไทยทั้งหมดใช้แกนเหล็กหล่อมีผลให้น้ำหนักใกล้เคียงกัน ส่วนยางจาก

ตารางที่ 2 ค่าแรงต้านทานการดึง ค่าความยืด และค่าความแข็งก่อนบ่มแรงและหลังบ่มแรงที่ 80 °C ของยางกะเทาะที่นิยมใช้

รายการทดสอบ	หน่วย	มอก	บริษัท ก	บริษัท ข	บริษัท ค	บริษัท ง	บริษัท จ	บริษัท ฉ	บริษัท ช	บริษัท ซ
ค่าแรงต้านทานการดึง	MPa	9.8	18.6	19.3	26.4	15.8	19.8	15	15	24
ค่าความยืด	%	200	288	253	333	273	281	400	400	290
ค่าความแข็ง (ก่อนบ่มแรง)	IRHD	80-95 (+/-3)	87	93	96	92	95	85	90	90
ค่าความแข็ง (หลังบ่มแรง)	IRHD	72 (+/-10)	82	91	94	93	96	80	81	88

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของยางกะเทาะที่นิยมใช้

รายการทดสอบ	บริษัท ก	บริษัท ข	บริษัท ค	บริษัท ง	บริษัท จ
น้ำหนักรวมแกน+ยาง (กก.)	13.7	13.5	7.8	10.1	12.3
น้ำหนักเฉพาะแกน (กก.)	7	7.2	2.2	4	7.1
น้ำหนักเฉพาะลูกยาง (กก.)	6.7	6.3	5.6	6.1	5.2
ความหนาเฉพาะลูกยาง (มม.)	280	260	250	250	230
ชนิดแกน	แกนเหล็กม้วน	แกนเหล็กหล่อ	แกนอลูมิเนียม	แกนเหล็กหล่อ	แกนเหล็กหล่อ
จำนวนรูน็อต (รู)	4	4	4	4	4
ความหนาของแกน (มม.)	4	5	5	3	5

ตารางที่ 4 ส่วนประกอบทางเคมีของยางกะเทาะที่นิยมใช้ในตลาด 2 ชนิด ที่ทดสอบด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) Pyris 1 ของ Perkin Elmer ตามมาตรฐาน ASTM D6370-99 (2009)

ลูกยางที่นำมาทดสอบ	สารที่ระเหยได้ (%)	โพลีเมอร์ (%)	สารตัวเติม และเถ้า (%)
ยางบริษัท ค (เวียดนาม)	4.8	49	46.2
ยางบริษัท ข	5.4	48.7	45.9

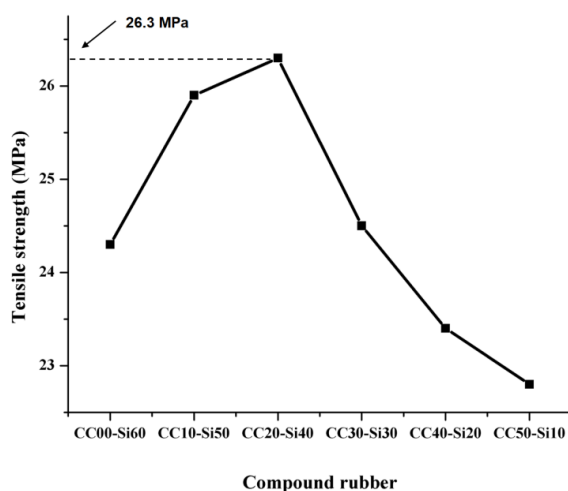
เวียดนามใช้แกนอลูมิเนียมจึงมีผลทำให้มีน้ำหนักมากกว่าเกือบเท่าตัวซึ่งจะมีผลให้ใช้พลังงานน้อยกว่าด้วยถือว่าเป็นข้อดีของยางกะเทาะจากเวียดนาม ส่วนสารประกอบทางเคมี ที่ทดสอบด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) Pyris 1 ของ Perkin Elmer ตามมาตรฐาน ASTM D6370-99 (2009) [10] ทำการทดสอบยางเพียง 2 ชนิด แสดงตามตารางที่ 4 พบว่ายางเวียดนามและยางที่ผลิตในเมืองไทยมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น สมบัติเชิงกลของยางเวียดนามที่ดีกว่าน่าจะเป็นผลมาจากกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน

3.2 ยางกะเทาะเปลือกที่ทำการปรับปรุงสมบัติแล้ว

เนื่องจากต้องการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมชนิดแคลเซียมคาร์บอเนตจึงต้องทำการผสมยางโดยไม่มีสารตัวเติมชนิดนี้ และมีสารตัวเติมชนิดซิลิกาเท่านั้น (CC00-Si60) จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับยางคอมพาวด์ที่มีสารตัวเติมชนิดแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 10-50 phr จะได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

3.2.1 ค่าแรงต้านทานการดึง (Tensile strength)

ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 2 พบว่าเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ค่าแรงต้านทานการดึงมีค่าเพิ่มขึ้นโดยค่าแรงต้านทานการดึงสูงสุดเท่ากับ 26.3 MPa ซึ่งค่าแรงต้านทานการดึงนี้



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของแคลเซียมคาร์บอเนต-ซิลิกา (CC-Si) กับค่าแรงต้านทานการดึงของยางกะเทาะ

มีค่ามากกว่าค่าของยางที่ไม่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตถึง 8.7% ที่ส่วนผสม CC-Si เท่ากับ CC20-Si40 เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีคุณสมบัติเด่นคือ ทำให้ส่วนประกอบต่างๆ ในยางคอมพาวด์กระจายตัวในเนื้อยางได้ดีขึ้นและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากพันธะเสถียร [7] ดังนั้นเมื่อปริมาณ แคลเซียม

3.2.2 ค่าความยืด (Elongation)

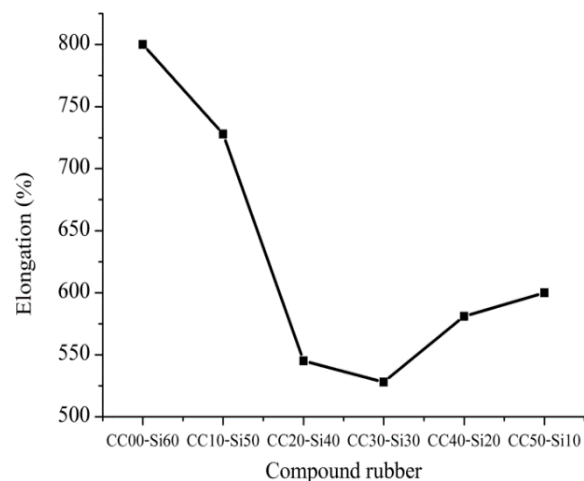
ค่าความยืดคำนวณได้จากสมการที่ 1 [11]

$$\%Elongation = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

ΔL คือ ความยาวสุดท้าย-ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน

L_0 คือ ความยาวเดิมของชิ้นงาน

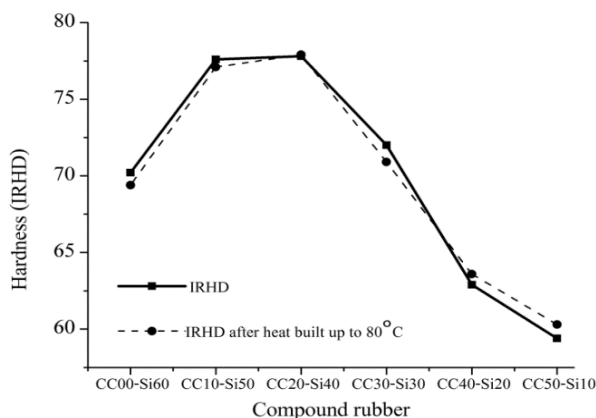
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 3 ที่พบว่าแนวโน้มเป็นตามที่คาดการณ์ คือ ค่าความยืดของยางกะเทาะมีค่าผกผันกับค่าแรงต้านทานการดึงของยางกะเทาะ โดยมีค่าต่ำที่สุดที่ส่วนผสม CC30-Si30 เท่ากับ 528 % อย่างไรก็ตามค่าความยืดน้อยที่สุดนี้ยังมีค่ามากกว่าค่าตามมาตรฐาน มอก. ที่มีค่าเพียง 200% เท่านั้น



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของแคลเซียมคาร์บอเนต-ซิลิกา (CC-Si) กับค่าความยืดของยางกะเทาะ

3.2.3 ค่าความแข็งก่อนบ่มแรงและค่าความแข็งหลังบ่มแรงที่ 80 °C (Hardness)

ความแข็งของยางเป็นสมบัติที่สำคัญของยางกะเทาะโดยในการทดสอบยางกะเทาะเปลือกข้าวจะทดสอบทั้งข้าวเหนียวและข้าวหอมมะลิ เนื่องจากความหนาของเปลือกข้าวแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน ข้าวเหนียวจะมีเปลือกที่หนากว่าข้าวหอมมะลิ [1] รวมไปถึงเมื่อใช้งานยางกะเทาะไป 3-4 ชั่วโมง จะมีความร้อนเกิดขึ้น ดังนั้นการทดสอบความแข็งของยางกะเทาะทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่ 80 °C จึงมีความจำเป็น ซึ่งผลการทดสอบความแข็งของยางกะเทาะทั้งก่อนและหลังบ่มแรงที่ 80 °C แสดงในรูปที่ 4 ที่พบว่าแนวโน้มเป็นไปตามที่คาดการณ์ คือ มีค่าแปรผันตรงกับค่าแรงต้านทานการดึงของยางกะเทาะ โดยมีค่าความแข็งก่อนบ่มแรงสูงสุดเท่ากับ 77.8 IRHD และมีค่าความแข็งหลังบ่มแรงที่ 80 °C สูงสุดเท่ากับ 77.9 IRHD ที่ส่วนผสม CC20-Si40 ซึ่งมากกว่าค่าความแข็งตามมาตรฐาน มอก. ที่ต้องมีค่าความแข็งก่อนบ่มแรงไม่ต่ำกว่า 80-95 (+/-3) IRHD และค่าความแข็งหลังบ่มแรงที่ 80 °C ไม่ต่ำกว่า 72(+/-10) IRHD

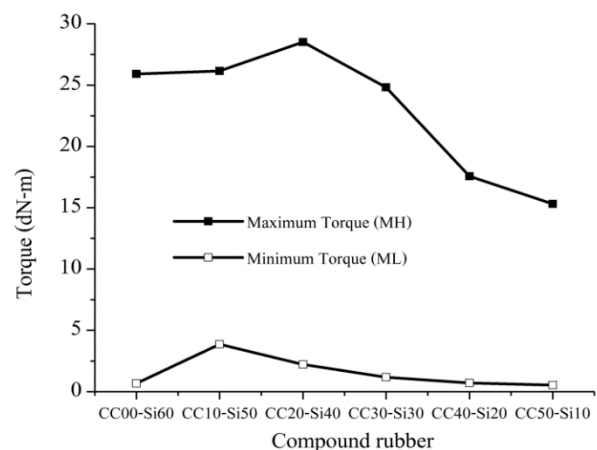


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของแคลเซียมคาร์บอเนต-ซิลิกา (CC-Si) กับค่าความแข็งทั้งก่อนบ่มแรงและหลังบ่มแรงที่ 80 °C

3.2.4 ค่าทอร์กต่ำสุดและทอร์กสูงสุด

ค่าทอร์กต่ำสุดและค่าทอร์กสูงสุดของยางแสดงในรูปที่ 5 โดยส่วนต่างของค่าทอร์กสูงสุดและค่าทอร์กต่ำสุด (MH - ML = ΔM) แสดงถึงความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะของสารประกอบยาง [7] กรณีค่า ΔM มีค่ามาก แสดงว่ายางมีการ

เชื่อมโยงพันธะดี จากรูปที่ 5 พบว่าที่ส่วนผสม CC20-Si40 มีค่า ΔM มากที่สุด ซึ่งเป็นการสนับสนุนการทดสอบก่อนหน้านี้ที่ระบุว่าส่วนผสมนี้ให้ยางที่มีความแข็งแรงสูงสุด



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของแคลเซียมคาร์บอเนต-ซิลิกา (CC-Si) กับค่าทอร์กต่ำสุดและทอร์กสูงสุด

4. สรุปผลการทดลอง

การปรับปรุงคุณสมบัติของยางกะเทาะเปลือกโดยการเติมสารตัวเติมชนิดซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตในยางคอมพาวด์ ซึ่งสารตัวเติมที่ใช้ในงานนี้ โดยผสมแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน 5 สูตร (CC10-Si50, CC20-Si40, CC30-Si30, CC40-Si20 และ CC50-Si10) เทียบกับสูตรยางคอมพาวด์ทั่วไป (CC00-Si60) ผลจากการทดลอง พบว่า การเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 20 phr และซิลิกา 40 phr (CC20-Si40) ทำให้อย่างคอมพาวด์มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดกล่าวคือความต้านทานแรงดึง ความยืด ความแข็งทั้งก่อนบ่มแรงและหลังบ่มแรงที่ 80 °C ค่าทอร์กต่ำสุดและค่าทอร์กสูงสุดตามมาตรฐาน จากผลการศึกษาพบว่า ยางคอมพาวด์ สูตรที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต 20 phr และซิลิกา 40 phr (CC20-Si40) มีค่าความต้านทานแรงดึง 26.3 MPa ค่าความยืด 545% ความแข็งก่อนบ่มแรง 77.8 IRHD หลังบ่มแรง 77.9 IRHD และค่าทอร์กต่ำสุด 2.21 dN-M ค่าทอร์กสูงสุด 28.52 dN-M ตามลำดับเมื่อเทียบกับยางคอมพาวด์ทั่วไป (CC00-Si60) เนื่องจากซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตจัดเป็นสารเสริมแรงทำให้คุณสมบัติเชิงกลของยางคอมพาวด์ดีขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Nissayan and A. Artnaseaw, "Increasing an efficiency of Jasmine Rice Mill," In proceedings of 12th Khon Kaen University graduate Research conference: science, pp. PMO15, Khon Kaen, Thailand, 2011.
- [2] TISI. 633-2529. Thai Industrial Standards Institute, Vol. 103, No. 132, Thailand, 1985.
- [3] A. Artnaseaw and S. Weawdee , "Reducing Broken Rice in Rice Mill (Part 1 : Drying , Cleaning and Dehusking)," In proceedings of 12th Sripatum University Research conference: Industrial Engineering, Petchaburi, Thailand, 2012.
- [4] V. Pinsanor, S . Junpoonsup , S. Patcharaphun ,and N. Sombatsompop , "Effect of silica, Calcium Carbonate, and $\text{SiO}_2/\text{CaCO}_3$ Blends on properties of cellular NR compounds," Journal of Science and Technology: science, Vol.25, No.1, pp. 75-90, 2003.
- [5] C. Penwong, W. Teewong, S. Sakulkhaemaruethai, C.Sakulkhaemaruethai, "Effect of Nano Calcium Carbamate on Natural Rubber Properties," Journal of science, Vol.32, No.2, pp.61-75, 2016.
- [6] B. Rattanasuoa and W. Kaewwattana , "Development of rubber compound based on NR and EPDM for playground rubber mat," In proceedings of 45th Kasetsart University Research conference: science, pp. 584-591, Bangkok, Thailand, 2007.
- [7] P. Sae-oui, "Rubber", Vol. 2, pp. 70-98, Bangkok. Se-education, 2007.
- [8] ASTM D412-16, Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.available from: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D412>, 2018.
- [9] Shore Durometer, Internet Available <http://en.wikipedia.org/wiki/Durometer>, 2018.
- [10] ASTM D6370-99(2019), Standard Test Methods for Rubber–Compositional Analysis by Thermogravimetry (TGA), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.available from: <http://www.astm.org/standards/D6370>. htm, 2019.
- [11] IPC-TM-650 TEST METHODS MANUAL, The Institute for Interconnecting and Packaging Electronics Circuits, Illinois, USA, available from: <https://www.ipc.org/TM/2.4.18.3.pdf>, 2018.

การออกแบบและจำลองพลศาสตร์ของไหลของใบกวนผสมในถัง สำหรับของไหลผสม

Design and CFD Simulation of Agitating Blade in Tank for Mixing Fluids

วีระยุทธ หล้าอมรชัยกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก

Werayoot Lahamornchaiyakul

Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok Campus.

***Corresponding author E-mail:** werayootrmutl@gmail.com

Received: December 23, 2019 **Revised:** March 20, 2020 **Accepted:** March 25, 2020

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้ทำการวิจัยเรื่องการผสมของน้ำแอปเปิ้ลและน้ำ และทำการวิเคราะห์เพื่อหาเวลาและประสิทธิภาพในการผสมที่ใช้ใบกวนในกระบวนการทำน้ำผลไม้โดยใช้ระเบียบวิธีการทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ตัวแปรที่สำคัญในงานวิจัยนี้คือ ใบกวนที่ทำมุม 30, 35, 40 และ 45 องศา หมุนด้วยรอบการหมุนเท่ากันคือ 60 รอบต่อนาที ผลการทดสอบการผสมของน้ำแอปเปิ้ลและน้ำเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนปริมาตร พบว่าที่มุม 30 องศาของใบกวนที่ใช้ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที สามารถผสมกันได้ 60 % ที่เวลา 8 วินาที และการใช้ใบกวนแบบ 35, 40 และ 45 องศา น้ำแอปเปิ้ลสามารถเคลื่อนที่ไปผสมกับน้ำได้ 30 % ที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที นอกจากนี้การใช้ใบกวนที่มุม 30 องศาจะให้ค่าการหมุนวนของของเหลวได้ดีกว่ามุม 35, 40 และ 45 องศาเมื่อทำการเปรียบเทียบกัน

คำสำคัญ: เทคนิคการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล ใบกวนผสม การจำลองเชิงตัวเลข

Abstract

This study aims to research the characteristics of mixing between apple water with water fluids and analysis for find of optimum time and evaluate the performance of mixing tank using 30, 35, 40 and 45-degree angle of agitating blade for apple juice processing. In numerical simulations of agitating blade at 30, 35, 40 and 45-degree angle is tested in the range operate is 60 rpm. It is found from numerical results that mixing is enhanced when rotating speed increases. Apple water can be mixing with water by 60 % at use 30-degree angle of the agitating blade by using time is 8 second and Apple water can be mixing with water by 30 % at operate 60 rpm by using 35, 40 and 45-degree angle. In addition, swirling mixing fluid by 30-degree angle is higher when compare using 35, 40 and 45-degree angle.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Impeller Blade, Numerical Simulation

1. บทนำ

น้ำผลไม้ที่มีให้บริโภคในปัจจุบันมีมากมายหลากหลายชนิด และได้ผ่านกรรมวิธีทางอุตสาหกรรมอาหารทั้งในเรื่องของการปรุงแต่งรส การใช้สารเติมแต่งต่าง ๆ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนาน ทำให้น้ำผลไม้ดังกล่าวขาดความสดที่ผู้บริโภคต้องการ เพราะพฤติกรรมผู้บริโภคของคนเปลี่ยนไป ซึ่งหันมาบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพเพิ่มมากขึ้นทุกปี ทำให้ความต้องการของอาหารและเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพนั้นมีความต้องการที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการกระจายตัวของอุตสาหกรรมอาหารด้านนี้ โดยกระจายไปยังอุตสาหกรรมครัวเรือนที่อยู่ในรูปของกลุ่มเกษตร และสินค้าดังกล่าวจึงถูกผลิตออกมาในรูปของหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ ทำให้กลุ่มแม่บ้านภาคเหนือที่ทำสวนผลไม้หลากหลายชนิด พยายามคิดค้นสูตรและผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เป็นของตนเองเพื่อใช้เป็นแนวทางในการแปรรูปน้ำผลไม้เพื่อเพิ่มมูลค่าของสินค้าเกษตรที่มีมากและอาจล้นตลาดได้ในอนาคต ทำให้ปัจจุบันการพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรด้านต่าง ๆ ทั้งอาหาร ขนม เครื่องดื่ม ฯลฯ ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในภาคอุตสาหกรรมครัวเรือนของประเทศมากขึ้นทุกปี เพราะประเทศไทยเป็นศูนย์กลางในด้านอาหารที่สำคัญต่อตลาดทั้งในเอเชียและและถูกนำไปส่งออกในหลากหลาย ๆ ประเทศในแถบยุโรป [1] อีกทั้งรัฐบาลยังกำหนดนโยบายหลักของแผนพัฒนาประเทศโดยให้เน้นงานด้านอุตสาหกรรมเกษตร เทคโนโลยี อุตสาหกรรม และด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี มาพัฒนานวัตกรรมไปพร้อมกับการพัฒนาต้นแบบในธุรกิจอาหารและกลุ่มงานเกษตร และวิศวกรรม เพื่อการแข่งขันและการดำเนินการใช้ภายในประเทศและส่งออก

หลักการดังกล่าว คือ ต้องการนำนวัตกรรมสมัยใหม่พร้อมกำลังงานคนทุกภาคส่วนมาพัฒนาต้นแบบธุรกิจเกษตร เพื่อเพิ่มมูลค่าของสินค้าให้สูงขึ้นเพื่อให้สินค้าเกษตรที่ผลิตมีมาตรฐานสากลเป็นไปตามตลาดต่างประเทศที่ต้องการ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ภายในประเทศจึงมีความสำคัญมากในปัจจุบัน ทั้งผลิตผลที่ได้จากกลุ่มแม่บ้านเกษตรกร กลุ่มวิสาหกิจชุมชน และอื่น ๆ [2] กลุ่มวิสาหกิจชุมชน ถือว่าเป็นหัวใจหลักที่ช่วยแปรรูปผลผลิต

เกษตรในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อการค้าในชุมชน ประเทศ และการส่งออกที่สำคัญ โดยเฉพาะในปัจจุบัน น้ำผลไม้สดกำลังเป็นที่นิยมมากในกลุ่มผู้บริโภคที่ต้องการรักษาสุขภาพ เพราะเป็นอีกหนึ่งผลผลิตทางการเกษตรที่ได้จากการแปรรูปจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่ก่อตั้งขึ้นของกลุ่มแม่บ้านเกษตรกร รูปแบบการบริโภคที่เปลี่ยนไปของประชากรที่รักษาสุขภาพจึงทำให้ธุรกิจด้านนี้เข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมอาหารในปัจจุบัน การนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการออกแบบรูปทรงของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรทั้งในส่วนการออกแบบบรรจุภัณฑ์ การออกแบบเครื่องจักรในการแปรรูป ตลอดจนกระบวนการผลิตต่าง ๆ ให้มีระบบการทำงานที่เหมาะสม ด้วยเหตุนี้ผู้ผลิตต้องคำนึงถึงมาตรฐานในผลผลิตที่ได้แปรรูปด้วย ดังนั้นการออกแบบจึงมีความสำคัญมากในการผลิตสินค้า การออกแบบใบกวนผสมให้เหมาะสมกับงานที่ใช้จะส่งผลทำให้ผลผลิตที่ได้มีคุณภาพ ซึ่งการออกแบบใบกวนผสมที่เหมาะสมกับงาน จำเป็นต้องอาศัยเทคนิคด้านพลศาสตร์ของไหลเข้ามาช่วยในการออกแบบและจำลองสนามการไหลของของไหลที่ผสมเพื่อตรวจเช็คข้อดี ข้อเสียในกระบวนการก่อนการผลิตจริง

การออกแบบใบกวนผสมได้ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยในด้านต่าง ๆ ทั้งในส่วนของการกวนผสมน้ำมันพืชและเมทานอล [3] และการผสมวัตถุที่เป็นของแข็งและของเหลวจากการศึกษาและออกแบบใบกวนผสมที่พบมากในงานวิจัยส่วนใหญ่คือการศึกษาในเรื่องของการผสมเชิงปริมาณ (Quantitative mixing) ในถังผสมโดยวิธีการคำนวณหาค่าการกระจายตัวของอนุภาค [4] ทำการศึกษาการผสมของของไหลในถังผสมโดยใช้ใบกวนพบว่าลักษณะการผสมอย่างมีประสิทธิภาพเกิดขึ้นบริเวณใกล้กับใบกวน [5]

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองกระบวนการผลิตน้ำแอปเปิ้ลที่ได้จากอุตสาหกรรมครัวเรือน โดยงานวิจัยได้อ้างอิงแบบจำลองกระบวนการผลิตโรงงานผลิตน้ำแอปเปิ้ลจากงานวิจัยเรื่อง การจำลองของไหลผสมในอุตสาหกรรมอาหารโดยใช้เทคนิคทางพลศาสตร์ของไหล ดังรูปที่ 1 ซึ่งผลของงานวิจัยพบว่าค่า

ความเร็วในแนวรัศมีที่ใช้ใบกวนผสมแบบ Helix Blade และ Curve Blade จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญต่อรูปทรงใบกวนและรูปทรงของถังผสม [1] ในการจำลองเชิงตัวเลขได้แสดงการเปลี่ยนความสูงของใบพัดกวนต่อการเปลี่ยนแปลงขอบเขตของการไหลสำหรับสารที่เป็นของผสม [6] การศึกษาลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นกับรูปทรงใบพัดแบบ 4 ใบที่ทำมุม 45 องศา โดยใช้เทคนิค LDV (Laser Doppler Velocimetry, LDV) ส า ห ร้ บ

เปรียบเทียบกับการจำลองเชิงตัวเลข ผลวิจัยพบว่า ในช่วงการไหลแบบราบเรียบที่บริเวณใบพัดจะมีการไหลแบบแนวรัศมีมากกว่าการไหลแบบแนวแกน [7] ในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นที่จะทำการออกแบบและทำการศึกษาดัชนีประสิทธิภาพของโมเดลต้นแบบของใบกวนผสมที่ทำมุม 30, 35, 40 และ 45 องศา เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเลือกใช้ใบกวนผสมที่เหมาะสมในการกวนผสมอัตราส่วนของน้ำแอมป์กับน้ำที่ต้องการ



รูปที่ 1 แสดงองค์ประกอบของกระบวนการผลิตจำลอง [1]

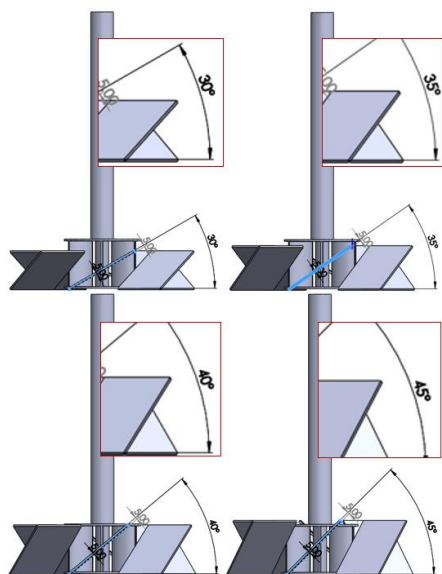
2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

ทำการออกแบบมุมใบกวนผสมที่เหมาะสมในการผสมน้ำแอมป์กับน้ำ

3. ระเบียบวิธีวิจัย

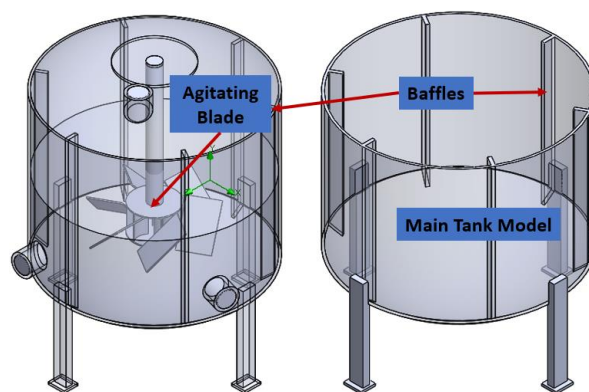
3.1 ออกแบบแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์

ทำการออกแบบรูปทรงใบกวนผสมโดยใช้โปรแกรม Solidworks ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 รูปทรงใบกวนผสมที่ทำการออกแบบ [9]

จากรูปที่ 2 แบบจำลองใบกวนผสมที่ทำการออกแบบจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 498 มิลลิเมตรที่เท่ากัน ส่วนใบกวนผสมที่ทำมุม 30, 35, 40 และ 45 องศาจะมีความสูงของใบพัด 103, 118, 131 และ 144 มิลลิเมตรตามลำดับ ในงานงานวิจัยได้ทำการติดตั้ง Baffles ที่มีขนาด 14x50 มิลลิเมตร ทั้งหมด 6 อันดังรูปที่ 3



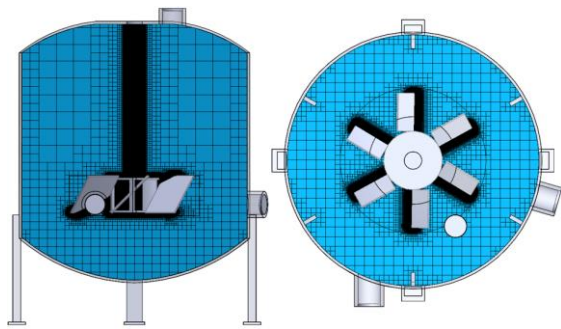
รูปที่ 3 ถังผสมที่ติดตั้ง Baffles และ ใบกวนผสม [9]

สำหรับระบบพิกัดในการวิเคราะห์ กำหนดให้แกน Y อยู่ในแนวแกนตั้งที่มีทิศทางเดียวกันกับแกนเพลลาของใบกวนผสม โดยกำหนดให้จุดพิกัดของระบบพิกัดในการวิเคราะห์อยู่ที่ผิวด้านในของถังผสม ได้ทำการติดตั้งชุดมอเตอร์ที่มีค่าความเร็วรอบการหมุน 60 รอบต่ออนาที

สร้างการไหลด้วยใบกวนผสมในถังผสมที่มีขนาด 880 มิลลิเมตร ทำการทดสอบระบบการทำงานโดยการปรับมุมมองของใบกวนผสมที่ทำมุม 30, 35, 40 และ 45 องศาตามลำดับ

3.2 โมเดลในการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล

การวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหล เป็นเครื่องมือหลักสำหรับงานวิจัย โดยมีขั้นตอนในการวิจัยคือ นำชิ้นงาน 3 มิติที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม Solidworks เข้ามาสู่โหมดฟังก์ชันของ Solidworks Flow Simulation หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานที่นำเข้ามา นำไปทำการสร้างเมชเอลิเมนต์จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เมชเอลิเมนต์ขององค์ประกอบการวิเคราะห์

แล้วทำการกำหนดปริมาตรการไหลของน้ำที่ทางเข้าที่ 1 มีค่า 0.02 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยน้ำมีความหนาแน่นเท่ากับ 999.79 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าความหนืดเท่ากับ 0.0017912 ปาสคาล-วินาที และกำหนดปริมาตรการไหลของน้ำแบริดที่ทางเข้าที่ 2 มีค่า 0.015 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยน้ำแบริดมีความหนาแน่นเท่ากับ 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าความหนืดเท่ากับ 2.92 ปาสคาล-วินาที เพื่อให้ของไหลไหลเข้าไปในถังผสมในอัตราส่วนที่เท่ากัน โดยเป็นการผสมแบบต่อเนื่อง (Continuous mixing) และทำการกำหนดรอบการหมุนของใบกวนผสมที่รอบการหมุนครั้งที่ 60 รอบต่อวินาที ซึ่งรูปแบบการหมุนในงานวิจัยเป็นแบบ (Local Region Sliding) การจำลองการไหลเป็นแบบระบบ 3 มิติ แบบคงตัว โดยแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในงานวิจัยเป็นแบบ k-epsilon model

3.3 แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon model

สมการอนุกรมมวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

สมการเชิงอนุกรมโมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

แบบจำลอง k-epsilon model

k-epsilon model เป็นเทอมของ Reynolds Stress, จะถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ Mean Stress Rate โดย Eddy Viscosity จะกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับ Turbulent Kinetic Energy, (K) และ Dissipation Rate (ϵ) โดยใช้ Bossiness's approximation [7] คือ

$$t_{ij} = -\frac{2}{3} \delta_{ij}(\rho k) + u_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

โดยที่ $u_t = \rho C_u k^2 / \epsilon$ คือ Turbulent Eddy Viscosity สมการของ Turbulent Kinetic Energy (k) จะอยู่ในรูป [6]

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{u_e}{\sigma_k} + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \epsilon \quad (4)$$

สมการของ Dissipation Rate ของ Turbulent Kinetic Energy [7] จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{u_e}{\sigma_\epsilon} + \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} G - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \quad (5)$$

ซึ่ง G แทน Generation Rate of Turbulent Kinetic Energy ขณะที่ $\rho \epsilon$ เป็น Dissipation Rate โดย G จะเป็น

$$G = u_e \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

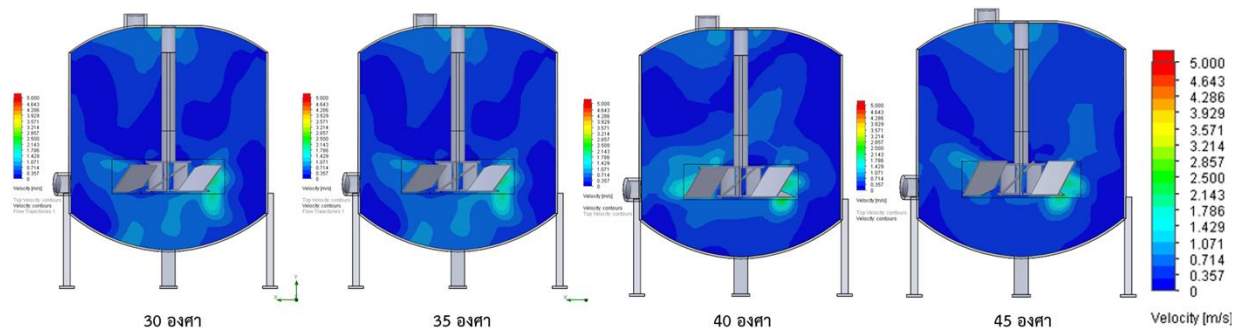
ค่าตัวแปรขอบเขตต่าง ๆ ของ Turbulent ที่ใกล้ผนังสามารถหาได้จาก Wall Function โดยมีค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับค่าสมการต่าง ๆ ที่ผ่านมาดังนี้คือ

$\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$, และ $C_u = 0.09$ เป็นค่าคงที่ [6,7] โดยที่ $u_e = u_t + u$

4. ผลการทดลอง

จากการจำลองผลสำหรับการผสมของน้ำแบริดและน้ำในงานวิจัยนี้ ซึ่งขั้นตอนและวิธีการจะทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการทดสอบจากมุมมองของใบกวนผสมดังรูปที่ 2 และทำการกำหนดรอบการหมุนของใบกวนผสมที่ 60 รอบต่อวินาที เพื่อทำการแสดงสนามการไหลของของผสมระหว่างน้ำแบริดและน้ำโดยใช้โปรแกรม Solidworks Flow Simulation โดยทำการยืนยัน

ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัย เพื่อแสดงความเร็วสนามการไหล, ความเร็วในแต่ละระนาบในทิศทางแกน Y, การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบใบกวนผสม และความเร็วในแนวรัศมี ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลสามารถแสดงได้ดังนี้

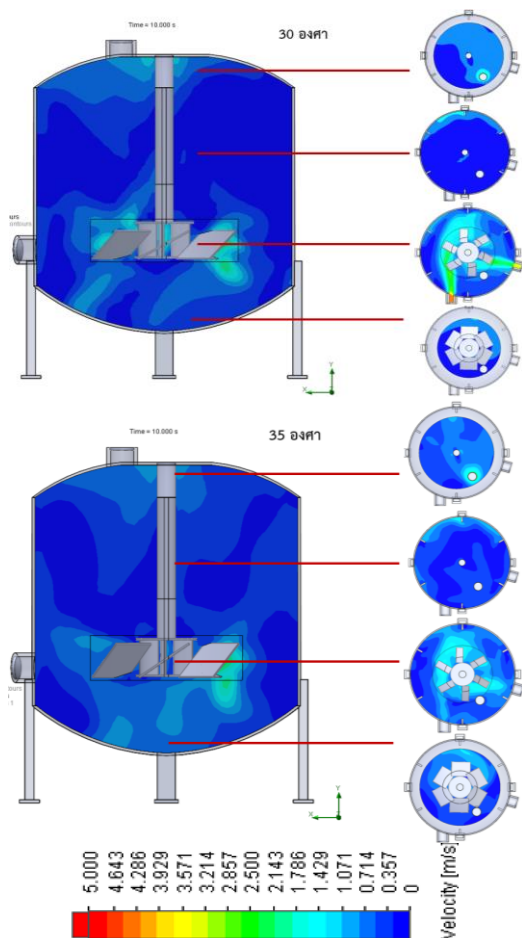


รูปที่ 5 แสดงสนามการไหลของของผสมระหว่างน้ำแอปเปิ้ลและน้ำที่เวลา 8 วินาที

4.2 ความเร็วในแต่ละระนาบในทิศทางแกน Y

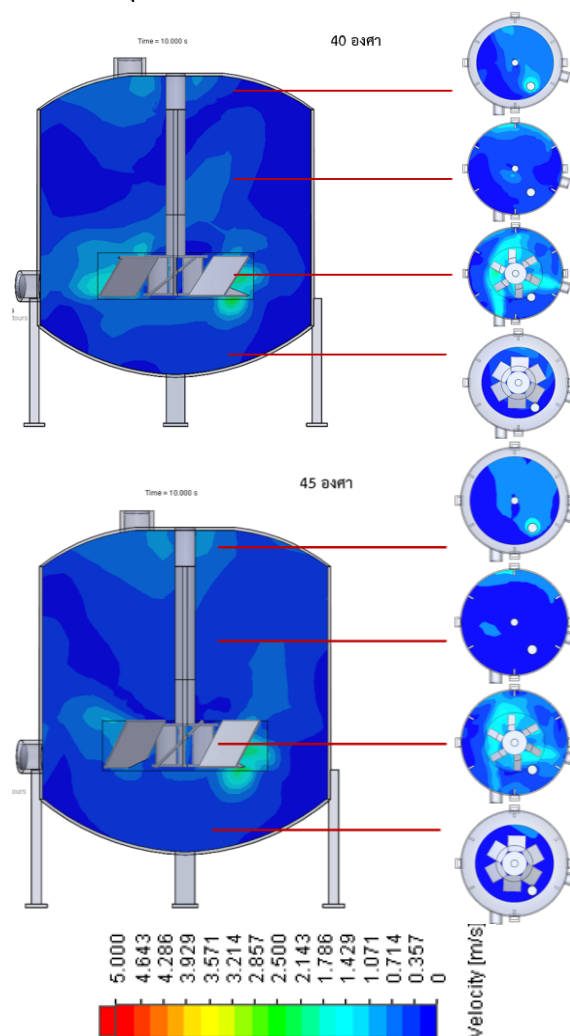
แสดงความเร็วในแต่ละระนาบในทิศทางแกน Y ระหว่างน้ำแอปเปิ้ลและน้ำภายในถังผสมที่ความเร็วใบกวนผสม 60 รอบต่อนาที ที่เวลา 8 วินาที

- ที่มุม 30 และ 35 องศา ความเร็ว 60 รอบต่อนาที



รูปที่ 6 ความเร็วที่มุม 30 และ 35 องศา

- ที่มุม 40 และ 45 องศา ความเร็ว 60 รอบต่อนาที



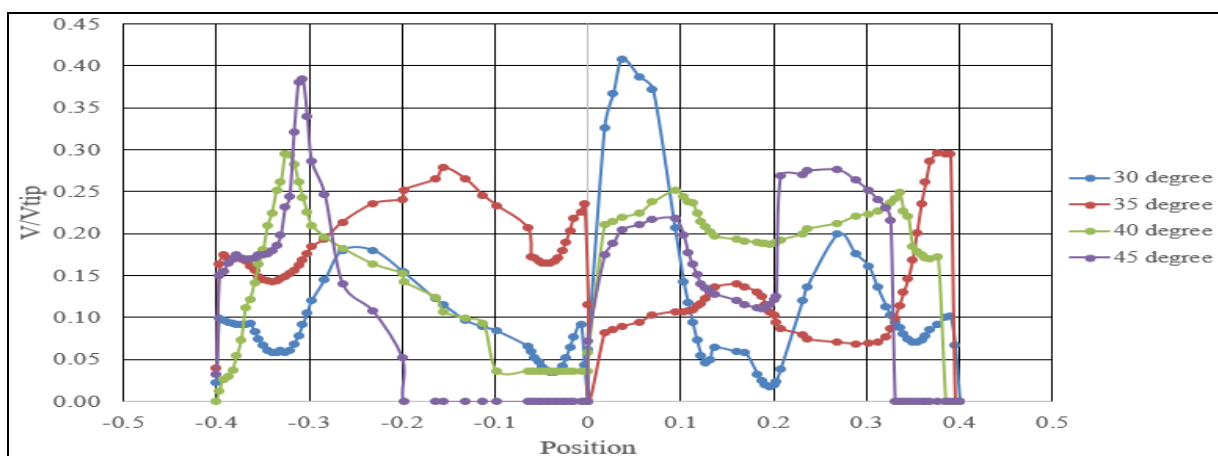
รูปที่ 7 ความเร็วที่มุม 40 และ 45 องศา

รูปที่ 6-7 แสดงค่าความเร็วของสนามการไหลในระนาบต่าง ๆ ในรูปแบบการแสดงผลแบบ Cut plot โดย

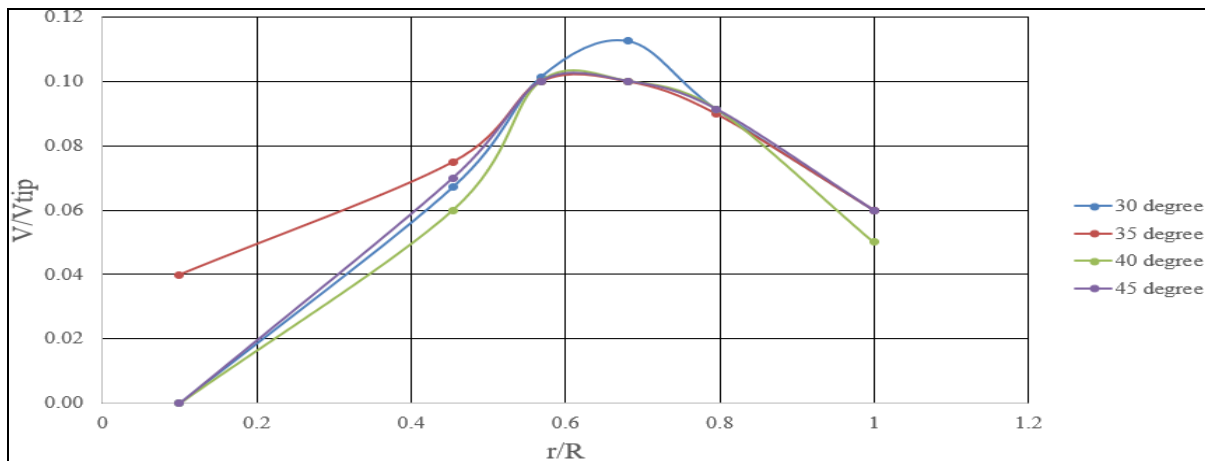
ทำการตัดระนาบในทิศทางแกน Y และมีการกำหนดให้ ไบควอนผสมหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โดยมีการสร้างอัตราการใช้ไหลในแนวรัศมีของไบควอนผสม ส่งผลทำให้เกิดค่าความเร็วของการเคลื่อนที่ในการไหลของของไหลผสมสูงสุดได้ที่มุม 30 องศา และเมื่อทำการพิจารณาในบริเวณโดยรอบไบควอนผสมในแต่ละมุมองศาพบว่า ไบควอนผสมจะสร้างความเร็วที่มีความแตกต่างกันระหว่างการจำลอง และความเร็วที่เกิดขึ้นในแต่ละ มุมองศาจากการทดลองก็สามารถยอมรับได้ในทางวิศวกรรม เนื่องจากความเร็วที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงเดียวกัน

4.3 ผลลัพธ์ความเร็วสูงของไบควอนผสมที่มีผลต่อความเร็วในแนวแกน

การแสดงค่าความเร็วในแนวแกนตามแนวรัศมีของถังผสมทรงกระบอก โดยทำการตัดระนาบในทิศทางแกน Y โดยทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการทดสอบการหมุนของไบควอนผสมที่มุม 30, 35, 40 และ 45 องศา ตามลำดับ เมื่อทำการพิจารณาบริเวณพื้นที่ด้านล่างของไบควอนผสม ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าที่มุมองศา 30 จะให้ค่าระดับความเร็วของสนามการไหลของของไหลสูงกว่ามุมองศาของไบควอนผสมอื่น และส่งผลให้เกิดการผสมตัวได้ดี



รูปที่ 8 ผลรวมของความเร็วในแนวแกนตามแนวรัศมี



รูปที่ 9 ผลรวมของค่าความเร็ว V/V_{tip} ของมุมองศาต่าง ๆ

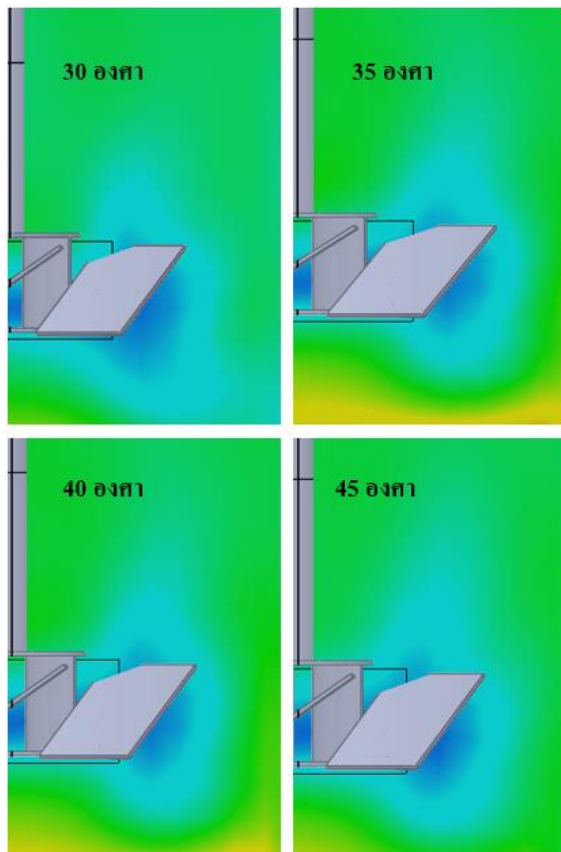
จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าที่ r/R น้อยกว่า 0.6 ค่าความเร็ว V/V_{tip} จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ r/R เพิ่มขึ้น และที่ r/R มากกว่า 0.5 ค่าความเร็ว V/V_{tip} จะมีค่าลดลงซึ่งค่าที่ทำนายสามารถแสดงแนวโน้มเช่นเดียวกับผลการทดลอง นอกจากนี้ความแตกต่างระหว่างการจำลองและการทดลองอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองของถังผสมและไบควอนผสมที่ทำมุม 30

องศาสามารถนำมาใช้เพื่อใช้ศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของไบควอนผสมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผสมได้

เมื่อทำการพิจารณาแบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลและทำการศึกษาประสิทธิภาพการผสมที่มุมองศาของไบควอนผสม 30 35 40 และ 45 องศา พบว่า เวลาผสมเฉลี่ยของไบควอนผสม คือ 8 9 9.5 และ 10 วินาที ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุของความแตกต่างที่

เกิดขึ้นในเวลาของการผสมของน้ำแอปเปิ้ลกับน้ำ สามารถทำการอธิบายรูปแบบการกระจายตัวของความเข้มข้นได้ดังรูปที่ 10

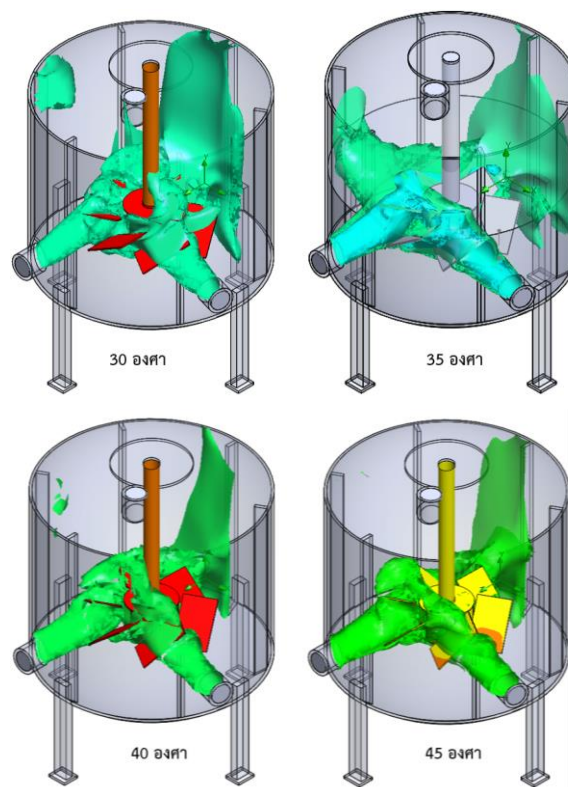
เวลา 8 นาที



รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นในการผสม น้ำแอปเปิ้ลกับน้ำที่เวลา 8 นาที

จากรูปที่ 10 พบว่าที่มุม 30 องศาของใบกวนผสม จะสร้างการกระจายตัวของความเข้มข้นในการผสมน้ำแอปเปิ้ลกับน้ำให้เข้ากันได้ดีที่สุดที่เวลา 8 นาที เนื่องจากมุมองศาใบกวนผสมที่ 30 องศาจะสามารถสร้างความเร็วในการตีผสมและมีการสัมผัสระหว่างใบกวนผสมกับของไหลสองชนิดที่มีรูปแบบการผสมแบบต่อเนื่องมากขึ้น จึงส่งผลทำให้เกิดการผสมของมวลสารที่เพิ่มขึ้น ทำให้ได้อัตราการผสมของน้ำแอปเปิ้ลที่เคลื่อนที่ไปผสมกับน้ำได้ 60 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 8 วินาที ส่วนการเลือกใช้ใบกวนผสมที่ทำมุม 35, 40 และ 45 องศา น้ำแอปเปิ้ลสามารถเคลื่อนที่ไปผสมกับน้ำได้ 60 เปอร์เซ็นต์แต่จะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ไปผสมเพิ่มเป็น 10 วินาที เนื่องจากค่าระดับความเร็วในการกระจายตัวในแนวแกนและรัศมีมีค่าลดลง

4. การกระจายตัวของความเร็วที่ออกจากใบกวนผสม



รูปที่ 11 การกระจายตัวของความเร็วที่ออกจากใบกวนผสม (Iso-Surface)

จากรูปที่ 11 เมื่อทำการพิจารณาการกระจายตัวของความเร็วที่ออกจากใบกวนผสมแบบ (Iso-Surface) การทดสอบกระทำโดยการปรับมุมมองของใบกวนผสมพบว่า เมื่อทำการปรับมุมมองให้สูงขึ้น ค่าระดับความเร็วที่กระจายตัวออกจากใบกวนผสมจะมีค่าลดลง และที่มุม 30, 35 องศาใบกวนผสมจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

5. อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบในการผสมน้ำแอปเปิ้ลและน้ำที่มุมใบกวนผสม 30 องศา พบว่าสามารถสร้างการกระจายตัวของความเข้มข้นในการผสมน้ำแอปเปิ้ลกับน้ำให้เข้ากันได้ดีที่สุดที่เวลา 8 นาที และมีกระกระจายตัวในการผสมกันของน้ำแอปเปิ้ลและน้ำที่เหมาะสม เพราะความเร็วในสนามการไหลจะมีค่าที่สูงบริเวณรอบใบกวนผสมและพื้นที่การหมุนวนด้านล่างใบกวนผสม และค่าความเร็วในแนวตั้งจะมีค่าความเร็วทั้งค่าบวกและค่าลบ จะส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของของไหลผสมไปทั่วทั้งบริเวณถังผสม และการเลือกใช้งานใบกวนผสมที่สามารถกวนผสมของไหลให้เข้ากันได้ดีและใช้เวลาที่ไม่มาก จะส่งผลดีและสามารถประหยัดในเรื่องของ

พลังงานและการสิ้นเปลืองได้ การจำลองผลเชิงตัวเลข โดยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ผลทางพลศาสตร์ของไหลในงานวิจัยนี้เป็นเพียงตัวอย่างหนึ่งที่ใช้แสดงรูปแบบแนวคิดด้านการออกแบบ ควรจะต้องทำการทดสอบจริงเพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้จาก CFD ไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการทดสอบ และทำการประเมินความแม่นยำในผลการทดลองและสรุปผลเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาใบกวนผสมสำหรับอุตสาหกรรมอาหารต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่มอบทุนในการนำเสนอในงานวิจัยวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Werayoot, B. Pinich and K. Nuttapong, "Simulation of Fluid Mixing in Food Industry using Computational Fluid Dynamics" The 4th National Food Engineering Conference pp.10-15, Apr., 2018.
- [2] L. Werayoot, "Fluid Mechanics", Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok Campus, No. 1, pp.10-15, Sept., 2016.
- [3] W. Worawit. "Tamarind Mixing Machine" Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, No. 1, Oct., 2007
- [4] O. Shengchao, W. Rijie, Y. Xiaoxia and Y. Yuefei, "CFD Prediction of mean Flow Field and ImpellerCapacity for Pitched Blade Turbine", Thansections of Tianjin University, Vol.21 No.3, pp. 250-258, Oct., 2015.
- [5] A. Bakker, J. Myers, R. W. Ward and C. K. Lee, "The laminar and turbulent flow pattern of a pitchedBlade turbine". Trans IChemE, Part A, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 74, pp. 485-491, Sept., 1996.
- [6] L. Werayoot, "Mechanical Design System of Vertical Axis Micro Water Turbine Generator using Computational Fluid Dynamics (CFD)", The 25th

Conference Mechanical of Engineering, pp. 85-91, Oct., 2011.

- [7] B.S. Choi, B. Wan, S. Philyaw, K. Dhanasekharan and T.A. Ring, "Residence time distributions in a stirred tank: comparison of CFD predictions with experiment", Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 43, pp. 6548-6556, Sept., 2004.
- [8] J. M. Zalc, M. M. Alvarez and F. J. Muzzio, "Extensive Validation of Computed Laminar Flow in a Stirred Tank with Three Rushton", AIChE Journal, Vol. 47, No. 10, pp. 2144-2154 Oct.,2001.
- [9] L. Werayoot, Inventor; Rajamangala University of Technology Lanna., assignee. Part of Water Aerator. Thailand patent Thai 6288. 2018 May 9.

การพัฒนาเขตผลกระทบของอุโมงค์ส่งน้ำจากการขุดลึกข้างเคียง

Development of Influence zone of Water Supply Tunnel due to Nearby Deep Excavation

รักษ์ศิริ สุขรักษ์¹ พรเกษม จงประดิษฐ์^{1,*} ทศพร แหม่มกล้า² สุรเดช เหมรัมย์กุล²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²การประปานครหลวง

Raksiri Sukkaruk¹ Pornkasem Jongpradist^{1,*} Tossaporn Yamklam² Suradech Haerumpakul²

¹Department of Civil Engineering Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi

²Metropolitan Waterworks Authority

*Corresponding author E-mail: pornkasem.jon@kmutt.ac.th

Received: March 5, 2020 Revised: April 22, 2020 Accepted: April 30, 2020

บทคัดย่อ

การก่อสร้างอุโมงค์เกิดมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของประชากรในเขตเมืองใหญ่ ขณะเดียวกันการก่อสร้างพื้นที่ใต้ดินก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งการขุดดินลึกที่ใกล้เคียงกับอุโมงค์อาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของอุโมงค์ได้ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อที่จะพัฒนาเขตผลกระทบของอุโมงค์เนื่องจากการขุดลึกข้างเคียงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่ออุโมงค์ ได้แก่ ขนาดอุโมงค์, ระดับความลึกของการขุดและระยะห่างของงานขุดต่ออุโมงค์ ผลการศึกษาพบว่า ระดับความลึกของการขุดและระยะห่างของงานขุดต่ออุโมงค์ส่งผลสำคัญต่อ ค่าการเคลื่อนตัวและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของอุโมงค์ งานวิจัยยังได้นำเสนอค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวและค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของอุโมงค์ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาเขตผลกระทบของอุโมงค์ส่งน้ำจากการขุดลึกข้างเคียงสำหรับเพื่อใช้ในการประเมินผลกระทบต่ออุโมงค์

คำสำคัญ: เขตผลกระทบ อุโมงค์ส่งน้ำ ไฟไนต์เอลิเมนต์ การศึกษาเชิงการแปรเปลี่ยนพารามิเตอร์ งานขุดดินลึก

Abstract

A number of tunnels are being and have been constructed in the major cities due to the demand from an increasing population. Meanwhile, the increased need for building in congested urban areas often requires the basement floor. Deep excavation in close vicinity to the existing tunnels has a potential to worsen the stability or serviceability of the tunnel. The objective of this study is to develop the influence zone for tunnels due to the nearby deep excavation. Series of finite element parametric study on tunnel behavior induced by nearby deep excavation is carried out. Several factors affecting the tunnel response including tunnel diameter, excavation depth and relative distance are considered in the analyses. The results reveal that the excavation depth and relative distance have a significant impact on the movement and safety factor of the tunnels. Finally, based on the relationship between tunnel movement and safety factor, this study suggests the influence zone of tunnels due to the nearby deep excavation which may be useful for tunnel owner to establish a guideline for permission of nearby construction of basement floor of a building.

Keywords: Influence zone, Water supply tunnels, Finite element, Parametric study, Deep excavation.

1. บทนำ

ปัจจุบันเครือข่ายอุโมงค์ส่งน้ำและท่อส่งน้ำในความดูแลของการประปานครหลวง (กปน.) ได้เพิ่มตามความเจริญของเมืองที่มากขึ้น โดยมากอุโมงค์ส่งน้ำ และท่อส่งน้ำได้สร้างในพื้นที่สาธารณะ เช่น ใต้ถนนหรือในพื้นที่เขตทาง ในขณะที่เดียวกันโครงสร้างพื้นฐานของหน่วยงานอื่นๆ ได้ขยายตัวใกล้สิ่งก่อสร้างของ กปน. ด้วย โดยที่เขตทางหรือพื้นที่สาธารณะในเมืองมีอยู่อย่างจำกัด จึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่การก่อสร้างใหม่ดังกล่าวจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงหรือแม้แต่ติดกับอุโมงค์ส่งน้ำและท่อส่งน้ำของ กปน. ซึ่งอาจเกิดผลกระทบต่อการใช้งานและก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นกับอุโมงค์ส่งน้ำและท่อส่งน้ำได้

งานขุดดินลึก ถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ความสามารถในการใช้งานของอุโมงค์ด้อยลงหรือแม้แต่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุโมงค์ของ กปน. ซึ่งงานขุดดินลึกในเขตกรุงเทพฯ มีแนวโน้มที่มากขึ้นและลึกขึ้น [1-3] เนื่องจากพื้นที่ในเขตเมืองมีอยู่จำกัด งานขุดดินลึกที่ใกล้เคียงกับอุโมงค์เดิมทำให้เกิดผลกระทบโดยตรงในแง่การใช้งานหรือความปลอดภัยต่ออุโมงค์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จึงทำให้มีความสำคัญที่จะต้องประเมินประเด็นดังกล่าวเพื่อให้เจ้าของอุโมงค์มีแนวทางที่จะประสานงานกับเจ้าของโครงการที่กำลังก่อสร้างเพื่อมั่นใจว่าจะไม่มีผลกระทบต่ออุโมงค์หรือลดผลกระทบให้ไม่อยู่ในระดับที่มิอันตราย ซึ่งมีการศึกษาผลกระทบของงานขุดลึกต่ออุโมงค์ในอดีตจำนวนหนึ่ง เช่น การศึกษาพฤติกรรมจากกรณีศึกษาจริง [4], เครื่องทดสอบแบบหมุนเหวี่ยง [5], วิธีการเชิงวิเคราะห์ และการวิเคราะห์เชิงตัวเลข [6] จากการศึกษาดังกล่าว พบว่ามีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากงานขุดดินลึกในชั้นดินเหนียวอ่อนที่ใกล้กับอุโมงค์ รวมถึงต้องมีมาตรการในการลดค่าการเสียรูปของอุโมงค์ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับค่าความแข็งแรงของชั้นผนังของอุโมงค์ อันส่งผลต่อการเสียรูปและบิดตัว

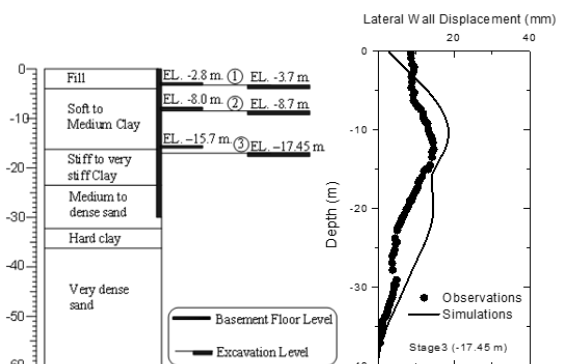
นอกจากนั้น การศึกษาเรื่องผลกระทบของงานขุดลึกต่ออุโมงค์ยังมีการศึกษาการแปรเปลี่ยนของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ (parametric study) [8]-[9] ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจากผลการศึกษา พบว่า ความยาวของการขุด (L),

ความกว้างของการขุด (B), ความลึกของการขุด (H_c), ขนาดอุโมงค์ (D_p), ตำแหน่งในแนวดิ่งและแนวราบของอุโมงค์ (C) ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเคลื่อนตัวและแรงภายในผนังอุโมงค์ อย่างไรก็ตาม ข้อสรุปจากการศึกษาก่อนหน้านี้ยังคงเป็นในเชิงแนวโน้ม และเป็นความเข้าใจพื้นฐานถึงกลไกและปัจจัยอิทธิพลเป็นหลัก เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมจึงมีแนวคิดการพัฒนาเป็นแผนภาพอย่างง่ายหรือข้อเสนอแนะระยะปลอดภัย เช่น การพัฒนาเขตปลอดภัยกรณีเสาเข็มกระทบอุโมงค์ [10] ที่จะสามารถทำความเข้าใจและใช้งานสำหรับการประเมินเบื้องต้นที่สะดวกขึ้น

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากการก่อสร้างงานขุดดินลึกต่ออุโมงค์ส่งน้ำของ กปน. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเริ่มจากการเปรียบเทียบความถูกต้องของการจำลองงานขุดดินลึก จากนั้นวิเคราะห์การแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่พิจารณา และนำไปสู่การพัฒนาเขตผลกระทบของอุโมงค์ส่งน้ำจากการขุดลึกข้างเคียง

2. การเปรียบเทียบความถูกต้องของงานขุดดินลึก

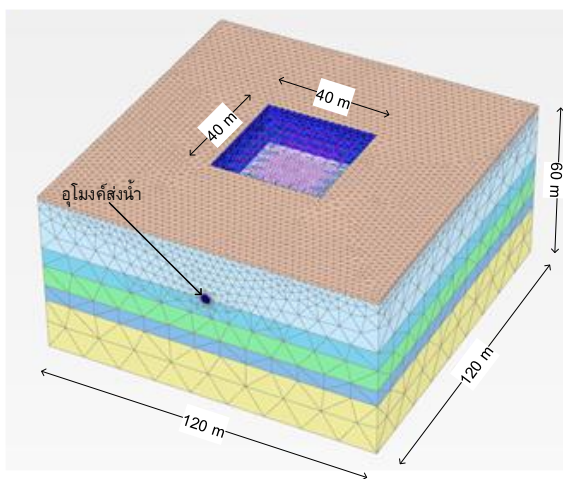
รูปที่ 1 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการตรวจวัดจริงในสนามการก่อสร้างสถานีรถไฟฟ้าวัดดินบางซื่อ (Bang Sue MRTA Station Project) จากรูปที่ 1 พบว่าค่าการเคลื่อนตัวเคลื่อนตัวมีความใกล้เคียงกับผลตรวจวัดทั้งค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดและแนวโน้มการเคลื่อนตัวรวม โดยค่าคุณสมบัติของระบบโครงสร้างป้องกันดิน อุโมงค์ วิเคราะห์ รวมถึงชั้นดินที่พิจารณาและคุณสมบัติ จะแสดงในหัวข้อที่ 3



รูปที่ 1 รายละเอียดการขุดดินลึกสถานีรถไฟฟ้าวัดดินบางซื่อ และผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวด้านข้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) กับผลการตรวจวัดจริงในสนาม

3. กรณีวิเคราะห์และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ศึกษา

การวิเคราะห์งานขุดดินลึกที่ส่งผลกระทบต่อแนวอุโมงค์ส่งน้ำประปาของ กปน. ในโครงการนี้จะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (3D-FEM) ด้วยโปรแกรม Plaxis 3D เวอร์ชัน 2016 รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา ด้านกว้าง 120 เมตร ด้านยาว 120 เมตร และลึก 60 เมตร กรณีมีขนาดงานขุด 40x40 เมตร อุโมงค์วางตัวอยู่ในชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ๗ ซึ่งการกำหนดชั้นดินและค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองวัสดุอ้างอิงตามการศึกษาก่อนหน้านี้ [10-11] โดยกำหนดให้รูปแบบของแบบจำลองของดินถมและชั้นทรายเป็นแบบ Mohr coulomb (MC) และแบบจำลอง Hardening Soil Model with Small Strain (HSS) สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน, ชั้นดินเหนียวแข็งชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 ไฟไนต์เอลิเมนต์เมช (finite element mesh) ของแบบจำลอง

เนื่องจากอุโมงค์ส่งน้ำของ กปน. ที่ใช้ในปัจจุบันมีอยู่หลายขนาด เพื่อให้ครอบคลุมถึงการนำไปใช้ประโยชน์สูงสุดสำหรับ กปน. งานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกขนาดอุโมงค์เพื่อเป็นตัวแทน โดยพิจารณาจากทั้งขนาดและความยาวรวมที่ใช้ทั้งหมดจนถึงปัจจุบัน ดังนี้ 1) อุโมงค์ขนาดใหญ่ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D_T) = 4.45 เมตร 2) อุโมงค์ขนาดกลาง D_T = 3.20 เมตร 3) อุโมงค์ขนาดเล็ก D_T = 2.00 เมตร ตารางที่ 2 และ 3 แสดงค่าคุณสมบัติและค่าพารามิเตอร์สำหรับอุโมงค์ส่งน้ำประปา และรายละเอียดส่วนประกอบของอุโมงค์ส่งน้ำประปาทั้ง 3 ขนาด

ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติและค่าพารามิเตอร์สำหรับชั้นดิน

Soil layer	Wea. crust	Soft clay	1 st Stiff clay	1 st Sand	2 nd Stiff clay	2 nd Sand
Depth	-1.5	-20	-27	-35	-41	-60
Material model	MC	HSS	HSS	MC	HSS	MC
E_{oed}^{ref} (MPa)	6	5	60	80	60	80
E_{50}^{ref} (MPa)	-	5	60	-	60	-
E_{ur}^{ref} (MPa)	-	15	180	-	180	-
γ_{sat} (kN/m ³)	17	16	18	20	18	20
ν'	0.32	0.33	0.33	0.3	0.33	0.3
ϕ' (°)	22	22	22	36	22	36
c (kPa)	8	5	18	0	18	0
m	-	1	1	-	1	-
p^{ref} (kPa)	-	100	65	-	95	-
G_0^{ref} (MPa)	-	10	170	-	350	-
$\gamma_{0.7}$	-	0.0001	0.0003	-	0.0003	-

*reference secant, oedometer, and unloading-reloading

moduli (E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , E_{ur}^{ref}), power parameter (m)

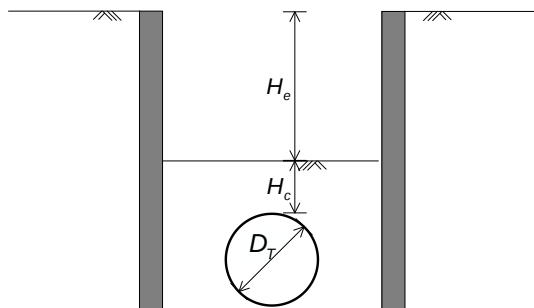
*saturated unit weight (γ_{sat}), Poisson's ratio (ν')

*cohesion (c), effective friction angle (ϕ')

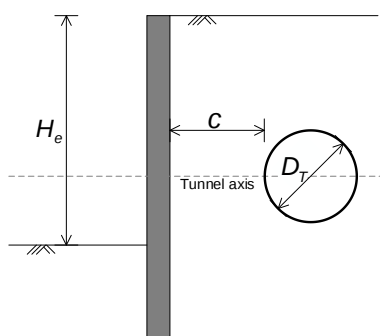
*initial shear modulus (G_0^{ref}) reference shear strain ($\gamma_{0.7}$)

การศึกษาผลกระทบจากการก่อสร้างงานขุดดินลึกจะแบ่งลักษณะปัญหาที่เกิดขึ้นออกเป็น 2 ลักษณะ คือ กรณีที่มีงานขุดดินลึกอยู่เหนืออุโมงค์ (excavation above tunnel) และกรณีมีงานขุดอยู่ด้านข้าง (excavation adjacent to tunnel) ดังแสดงในรูปที่ 3 การวิเคราะห์จะพิจารณากรณีอุโมงค์เปล่าไม่เติมน้ำ เพื่อพิจารณากรณีวิกฤติที่สุด เพราะการมีอยู่ของแรงดันน้ำภายในจะช่วยเสริมเสถียรภาพของ

คาดอุโมงค์ กรณีการศึกษาทั้งหมดแสดงในตารางที่ 4 โดยพิจารณาที่ตำแหน่งเมื่ออุโมงค์อยู่ใต้งานขุดดังแสดงตามรูปที่ 3 สำหรับอุโมงค์ส่งน้ำประปา 3 ขนาด และจะแสดงผลการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าการเคลื่อนตัวและค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (SF) ที่คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างกำลังที่พิจารณาทั้งกำลังรับแรงอัด และดึง ($14,800$ กับ $3,570 \text{ kN/m}^2$) ของผนังอุโมงค์ต่อความเค้นสูงสุดในแต่ละสภาพ



(ก) กรณีงานขุดเหนืออุโมงค์



(ข) กรณีงานขุดข้างอุโมงค์

รูปที่ 3 กรณีวิเคราะห์ในการศึกษานี้

งานขุดลึกในเขตกรุงเทพฯ มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ระบบกำแพงกันดินที่มีความแข็งแรง เช่น ผนังรับแรง (Diaphragm wall) เนื่องจากมีแรงกระทำด้านข้างที่สูง โดยกำหนดให้ความยาวของผนังรับแรงเท่ากับ 35 เมตร ในทุกกรณีวิเคราะห์ ในการวิเคราะห์พิจารณากำแพงกันดินเป็นระบบ Braced cuts ซึ่งจะต้องมีการคำนวณค่าอัดแรงในค้ำยัน (Pre-loading) โดยปี 1969 Peck [12] ได้สรุปค่าแรงดันดินจากการขุด และแนะนำเส้นขอบเขตความดันดิน (Design pressure envelopes) สำหรับดินเหนียวอ่อนดังแสดงในสมการที่ 1

$$p = \gamma H \left(1 - \frac{4c}{\gamma H} \right); \text{for } \frac{4c}{\gamma H} > 1 \quad (1)$$

ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติและค่าพารามิเตอร์สำหรับอุโมงค์ส่งน้ำประปา

Structure Type	Material Model	Unit weight (kN/m^3)	Elastic Modulus (kPa)	Poisson's ratio
Primary Lining	Linear Elastic	24	1.9×10^7	0.2
Secondary Lining	Linear Elastic	24	3.1×10^7	0.2
Steel Pipe	Linear Elastic	78.5	200×10^6	0.2
Diaphragm wall	Linear Elastic	24	3.1×10^7	0.2
Strut	Linear Elastic	78.5	2.1×10^8	0.2
Wailing	Linear Elastic	78.5	2.1×10^8	0.2

ตารางที่ 3 รายละเอียดส่วนประกอบของอุโมงค์ส่งน้ำประปา

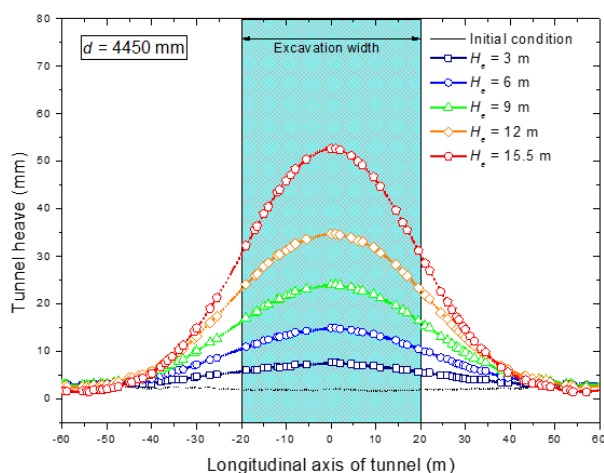
ขนาด อุโมงค์ O.D. (mm)	ความ หนา ท่อ เหล็ก (mm)	Concrete Segment Primary Lining (mm)	Infill Concrete Secondary Lining (mm)	Depth Surface – center (m)
2000	8	150	-	15
3200	14	150	185	17
4450	14	150	375	20

4. ผลการวิเคราะห์

รูปที่ 4 แสดงค่า heave (การดูดตัว) ของอุโมงค์ขนาดใหญ่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของอุโมงค์ ซึ่งค่า heave เกิดสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของงานขุดและมียกมาขึ้นตามระดับการขุดที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุด 42, 47 และ 51 มม. สำหรับอุโมงค์ขนาดเล็ก, กลางและใหญ่ตามลำดับ รูปที่ 5 แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของอุโมงค์ จากรูปพบว่าอุโมงค์จะเคลื่อนตัวในแนวตั้งขึ้นสู่ผิวดินโดยไม่มีการเคลื่อนตัวในแนวด้านข้าง

ตารางที่ 4 สรุปการวิเคราะห์และพัฒนาเขตพื้นที่ผลกระทบ
จากงานขุดดินลึก

กรณีอุโมงค์อยู่ใต้งานขุด	
ขนาดอุโมงค์ (มม.)	2000, 3200, 4450
ความลึกงานขุด, H_e (เมตร)	0 เมตร โดยขุดลึกถึงทุก ๆ 3 เมตร จนถึงระยะ $0.5D_T$ เหนือผนังบนอุโมงค์
กรณีอุโมงค์อยู่ข้างงานขุด	
ขนาดอุโมงค์ (มม.)	2000, 3200, 4450
ความลึกงานขุด, H_e (เมตร)	0 โดยขุดลึกถึงทุก ๆ 3 เมตร ถึง 24 เมตร
ระยะห่างในแนวราบจากงานขุด, C	$0.5D_T$ ถึง $5D_T$

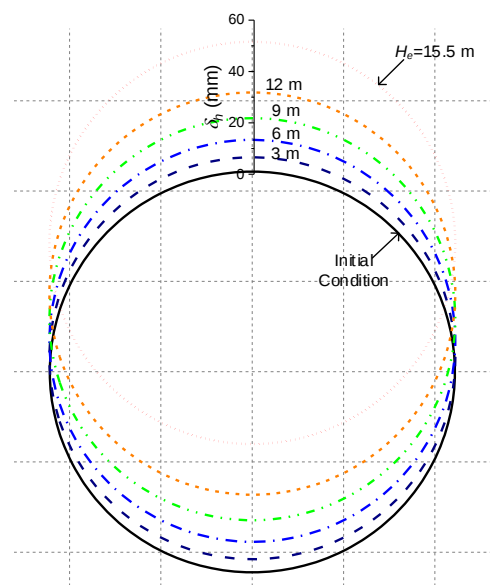


รูปที่ 4 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (Heave) ของอุโมงค์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามความยาวของอุโมงค์ใหญ่

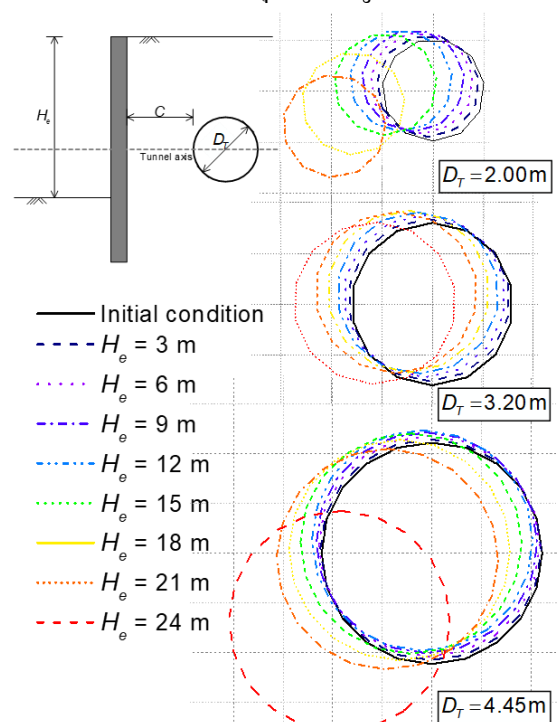
ส่วนการพิจารณาผลกระทบจากงานขุดดินลึกด้านข้าง กำหนดให้อุโมงค์อยู่ที่ระดับความลึก 15, 17 และ 20 เมตร สำหรับอุโมงค์ขนาดเล็ก, กลางและใหญ่ตามลำดับ พิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างในแนวราบจากงานขุด C กำหนดให้ระยะที่น้อยที่สุดเท่ากับ 1 เมตร โดยอุโมงค์ขนาดเล็กจะกำหนดระยะ C จนถึงระยะ $5D_T$ เพื่อให้ได้ระยะห่างที่มากพอที่อุโมงค์จะได้รับผลกระทบจากงานขุดที่ไม่มีนัยยะ

รูปที่ 6 แสดงการเคลื่อนตัวของอุโมงค์ทั้งสามขนาด เมื่อระยะ C เท่ากับ $1D_T$ พบว่า พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของอุโมงค์ทั้งหมดจะมีลักษณะที่เหมือนกัน คือ พฤติกรรมใน

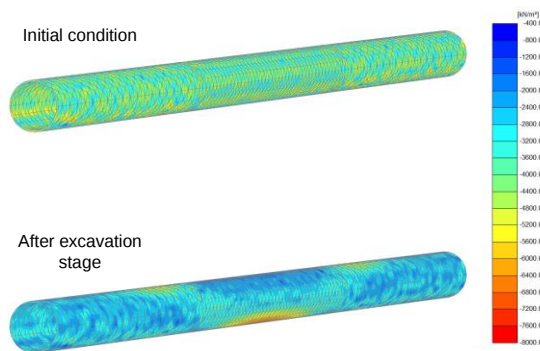
แนวราบนั้น อุโมงค์จะเคลื่อนตัวในแนวราบเข้าหางานขุด ตั้งแต่เริ่มงานขุดจนถึงระยะสุดท้ายของงานขุด สำหรับการเคลื่อนในแนวดิ่งนั้น อุโมงค์จะเคลื่อนตัวในทิศขึ้นสู่ผิวดิน เมื่อระดับงานยังไม่ถึงระดับผนังบนของอุโมงค์ แต่เมื่อระดับงานขุดลึกกว่าระดับความลึกของศูนย์กลางอุโมงค์แล้ว อุโมงค์จะเคลื่อนตัวลงด้วยค่าการเคลื่อนตัวที่สูงมาก



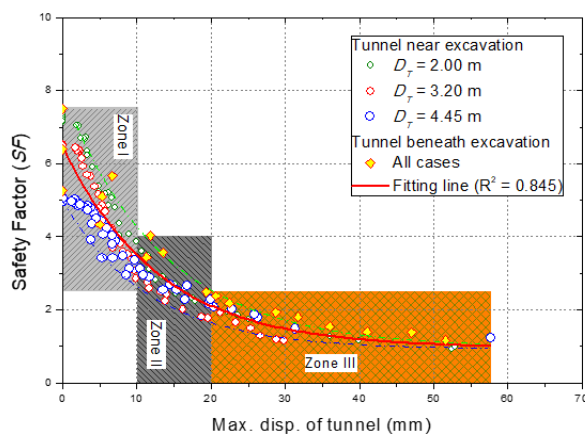
รูปที่ 5 การเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง (Heave) ตามแนวหน้าตัดของอุโมงค์ใหญ่



รูปที่ 6 การเคลื่อนตัวของอุโมงค์ที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากงานขุดด้านข้าง (การเคลื่อนตัว x 30 เท่า)



รูปที่ 7 ค่าการกระจายตัวของความเค้นในอุโมงค์ก่อนและหลังได้รับผลกระทบจากงานขุดลึก



รูปที่ 8 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความปลอดภัยและค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของทุกกรณีวิเคราะห์

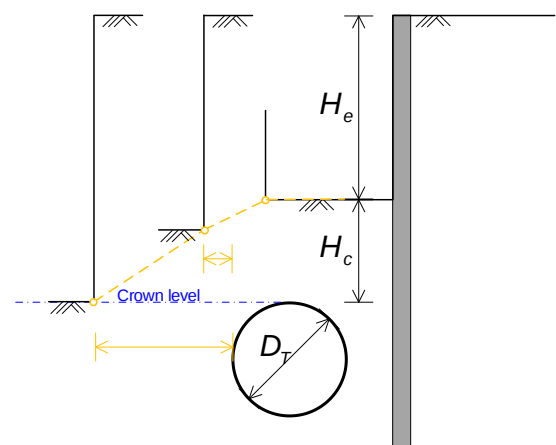
หากพิจารณาค่าแรงภายในที่เกิดขึ้นในผนังอุโมงค์ พบว่าค่า SF ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ H_c ซึ่งการศึกษานี้จะกำหนดค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่ยอมรับได้ที่ 2.5 สำหรับอุโมงค์ทุกขนาด ร่วมกับข้อกำหนดการเคลื่อนตัวของอุโมงค์ของ Shanghai Municipal Standard (Shanghai Municipal Standards: Technical code for protection region of urban bridge and tunnels) ที่กำหนดค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ยอมรับได้เท่ากับ 20 มม. [4] ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ค่า SF ลดลงชัดเจน คือการเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นอัด จากผลกระทบของงานขุด ดังแสดงในรูปที่ 7 ค่าการกระจายตัวของความเค้นในอุโมงค์ก่อนและหลังได้รับผลกระทบจากงานขุดลึก โดยช่วงก่อนงานขุดค่าความเค้นในอุโมงค์จะมีความใกล้เคียงกันตลอดความยาว ค่า compressive stress จะมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่ง Invert ของอุโมงค์ตามช่วงความกว้างของงานขุด

รูปที่ 8 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนความปลอดภัยและค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของทุกกรณีวิเคราะห์พบว่า ข้อมูลมีความสัมพันธ์กัน ที่ค่า R^2 เท่ากับ 0.845 ซึ่งถือว่ายอมรับได้ โดยเมื่อกำหนดค่า SF ที่ยอมรับได้เท่ากับ 2.5 จะเกิดการเคลื่อนตัวตั้งแต่ 10 มม. ถึง 20 มม. ตามแสดงดังเส้นขอบเขตบน (เส้นประสีเขียว) เส้นขอบเขตล่าง (เส้นประสีน้ำเงิน) แนวคิดของการกำหนดระยะปลอดภัยจะพิจารณาถึงระดับผลกระทบ โดยมีเงื่อนไขดังต่อไปนี้

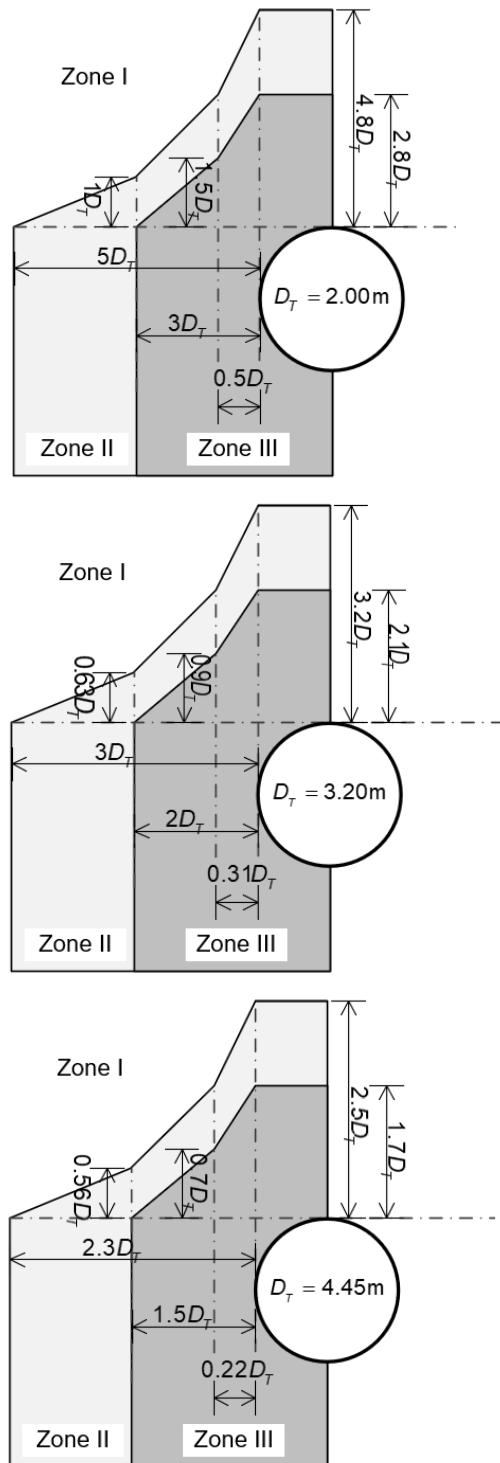
- เขตพื้นที่ 1 คือ เขตที่เล็กน้อยไม่ส่งผลกระทบต่อทั้งความเสียหายและความสามารถในการใช้งาน โดยค่า SF ต้องไม่น้อยกว่า 2.5 และค่าการเคลื่อนตัวน้อยกว่า 10 มม.
- เขตพื้นที่ 2 คือ เขตพื้นที่ ที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแต่อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถของการใช้งาน โดยมีเงื่อนไขเมื่อ ค่า SF น้อยกว่า 2.5 หรือค่าการเคลื่อนตัวมากกว่า 10 มม.
- เขตพื้นที่ 3 คือ เขตพื้นที่ ที่อาจก่อให้เกิดความเสียหาย โดยมีเงื่อนไขเมื่อ ค่าการเคลื่อนตัวมากกว่า 20 มม.

5. แนวคิดการพัฒนาเขตพื้นที่ผลกระทบ

รูปที่ 9 แสดงการกำหนดระยะปลอดภัยสำหรับงานขุดลึกกระทบอุโมงค์ มีแนวคิดลากเส้นเชื่อมระหว่างระยะที่ใกล้ที่สุดกับอุโมงค์ กล่าวคือ กรณีอุโมงค์ใต้งานขุดจะใช้ค่าระดับพื้นงานขุด และกรณีงานขุดข้างอุโมงค์จะใช้ค่าที่ตำแหน่งมุมล่างของงานขุดโดยพิจารณาดำแหน่งที่ขอบ D-wall ผังที่ใกล้กับอุโมงค์เป็นหลัก



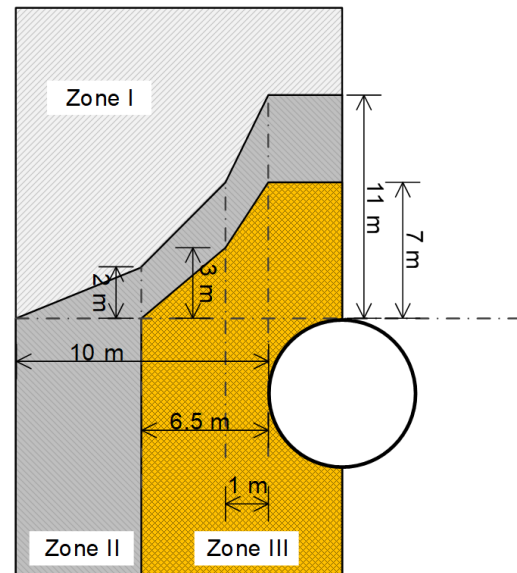
รูปที่ 9 แนวคิดในการการพัฒนาเขตพื้นที่ผลกระทบ



รูปที่ 10 ระยะปลอดภัย (Safe Clearance) สำหรับงานขุดดิน
ลึกลงอุโมงค์ทั้ง 3 ขนาด

และรูปที่ 10 แสดงการกำหนดระยะปลอดภัยสำหรับงานขุดลึกลงอุโมงค์ทั้ง 3 ขนาด โดยครอบคลุมทั้งงานขุดเหนือและด้านข้างของอุโมงค์ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาระยะปลอดภัยทั้งเหนือและด้านข้างของอุโมงค์ทั้งสามขนาด

พบว่า มีความใกล้เคียงกัน เช่น การกำหนดระยะด้านของเขตพื้นที่ 3 ของอุโมงค์ทั้งสามขนาด มีค่า $3D_T$, $2D_T$ และ $1.5D_T$ สำหรับอุโมงค์เล็ก, กลางและใหญ่ ซึ่งจะมีระยะที่ใกล้เคียงกันที่ 6.5 เมตรโดยประมาณ จึงพอสรุปได้ว่า เขตพื้นที่ผลกระทบไม่ขึ้นกับขนาดของอุโมงค์ ดังนั้นการกำหนดระยะปลอดภัยร่วมกันสำหรับอุโมงค์ทั้งสามขนาดเมื่อพิจารณาจากชุดลึกลงอุโมงค์ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ระยะปลอดภัย (Safe Clearance) สำหรับงานขุดดิน
ลึกลงอุโมงค์ทุกขนาด

6. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากการก่อสร้างงานขุดดินลึกลงอุโมงค์ส่งน้ำของ กปน. ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาเขตผลกระทบของอุโมงค์ส่งน้ำจากการขุดลึกลงข้างเคียง จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ระดับของการขุดดินลึกลงส่งผลกระทบต่อ การเคลื่อนตัวและแรงภายในผนังอุโมงค์ โดยที่ heave เกิดสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของงานขุดและมีค่ามากขึ้นตามระยะ H_c ที่เพิ่มขึ้น โดยหากเปรียบเทียบค่า heave ต่อระยะเหนือผนังอุโมงค์ (H_c) ทั้งสามขนาดพบว่าที่ระยะ H_c ที่เท่ากัน อุโมงค์ใหญ่มีแนวโน้มให้ค่าการเคลื่อนตัวที่มากที่สุด
- 2) การพิจารณาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (SF) ผลกระทบจากการก่อสร้างงานขุดดินลึกลงข้าง

อุโมงค์ จะมีค่าลดลงตามความลึกของงานขุดและการเพิ่มขึ้นของระยะ C ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ค่า SF ลดลง จะเหมือนกับกรณีงานขุดเหนืออุโมงค์ คือ การเพิ่มขึ้น ของค่า compressive และ tensile stresses จากผลกระทบของงานขุด โดยระยะ C ที่เพียงพอต่อค่า SF ที่มากกว่า 2.5 สำหรับอุโมงค์ขนาดเล็ก, กลางและใหญ่ เท่ากับ $3D_T$, $2D_T$ และ $1.5D_T$ ตามลำดับ

- 3) ค่าการเคลื่อนตัวของอุโมงค์และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกัน
- 4) เขตพื้นที่ผลกระทบที่พัฒนาไม่ขึ้นกับขนาดของอุโมงค์

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณการประสานรหลวที่ได้ให้ทุนสำหรับงานวิจัยนี้ผ่านทุนวิจัยและนวัตกรรม ปี 2559

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Teparaksa and J. Teparaksa, "Displacement of diaphragm wall for very deep basement excavation in soft Bangkok clay," International Journal of GEOMATE, Vol.14(46), pp. 57-62, 2018.
- [2] W. Teparaksa, "Principal and Application of Instrument for the First MRTA Subway Project in Bangkok," The 5th Int. Symposium on Field Measurement in Geomechanics. Singapore, 1999.
- [3] C. Chhenga and S. Likitlersuang, "Underground excavation behaviour in Bangkok using three-dimensional finite element method," Computers and Geotechnics, Vol. 95, pp. 68-81, 2018.
- [4] Z. F. Hu, Z. Q. Yue, J. Zhou and L. G. Tham, "Design and construction of a deep excavation in soft soils adjacent to the Shanghai Metro tunnels," Canadian Geotechnical Journal, vol. 40(5), pp. 933-948, 2003.
- [5] X. Huang, H. Huang and D. Zhang, "Centrifuge modelling of deep excavation over existing tunnels," Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, Vol. 167(1), pp. 3-18, 2014.
- [6] R. Liang, T. Xia, M. Huang and C. Lin, "Simplified analytical method for evaluating the effects of adjacent excavation on shield tunnel considering the shearing effect," Computers and Geotechnics, Vol. 81, pp. 167-187, 2017.
- [7] R. Chen, F. Meng, Z. Li, Y. Ye and J. Ye, "Investigation of response of metro tunnels due to adjacent large excavation and protective measures in soft soils," Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 58, pp. 224-235, 2016.
- [8] X. Huang, HF. Schweiger and H. Huang, "Influence of Deep Excavations on Nearby Existing Tunnels," International Journal of Geomechanics ASCE, Vol. 13(2), pp. 170-180, 2013.
- [9] Z. Gang and W. Shao-wei, "Numerical analyses of influence of overlying pit excavation on existing tunnels," Journal of Central South University of Technology, Vol. 15(s2), pp. 69-75, 2008.
- [10] P. Jongpradist, T. Kaewsri, A. Sawatparnich, S. Suwansawat, S. Youwai, W. Kongkitkul and J. Sunitsakul, "Development of tunneling influence zones for adjacent pile foundation by numerical analyses," Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 34, pp. 96-109, 2013.
- [11] S. Waichita, P. Jongpradist and P. Jamsawang, "Characterization of deep cement mixing wall behavior using wall-toexcavation shape factor," Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 83, pp. 243-253, 2019.
- [12] R. B. Peck, "Deep excavations and tunneling in soft ground. Proceeding of 7th international conference on soil mechanics and foundation engineering," Mexico City: State of the Art Report, 1969.

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความ

“บทความทางวิชาการ” หมายความว่า บทความที่เขียนขึ้นในลักษณะวิเคราะห์ วิจัย หรือเสนอแนวความคิดใหม่ ๆ จากพื้นฐานทางวิชาการที่ได้เรียบเรียงจากผลงานทางวิชาการของตนเอง หรือของผู้อื่น หรือเป็นบทความทางวิชาการที่เขียนขึ้นเพื่อเป็นความรู้ทั่วไปสำหรับประชาชน

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

1. การเรียงลำดับเนื้อหาบทความ

1.1 ชื่อเรื่อง (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น กระชับ และสื่อความหมายของเรื่องที่ทำการชัดเจน

1.2 ชื่อ-นามสกุลของผู้เขียนใส่ทุกคน เป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ระบุสถานที่ทำงาน สำหรับผู้พิมพ์ประสานงาน (Corresponding Author)

1.3 บทคัดย่อ (Abstract) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ เป็นเนื้อความสรุปสาระสำคัญของเรื่อง วัตถุประสงค์ วิธีการศึกษา ผลการศึกษา และผลสรุป มี 1 ย่อหน้า

1.4 คำสำคัญ (Keyword) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ให้ใส่คำสำคัญ 3-5 คำ ไว้ท้ายบทคัดย่อแต่ละภาษา

1.5 เนื้อหา (Text) บทความวิจัยควรประกอบด้วย

- บทนำ (Introduction) บอกความสำคัญหรือที่มาของปัญหาที่นำไปสู่การศึกษา วัตถุประสงค์ และอาจรวมวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

- วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย (Materials and Methods) กล่าวถึงรายละเอียด การวิเคราะห์และทดลอง ที่กระชับและชัดเจน

- ผลการทดลอง (Results) บอกผลที่พบอย่าง

ชัดเจน สมบูรณ์ และมีรายละเอียดครบถ้วน

- อภิปรายผลและสรุป (Discussion and Conclusion) อาจเขียนรวมกับผลการทดลองได้ เป็นการประเมินการตีความและการวิเคราะห์ในแง่มุมต่างๆ ของผลที่ได้ว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือไม่ มีความสอดคล้อง หรือขัดแย้งกับผลงานของผู้อื่นอย่างไร ต้องมีการอ้างหลักการหรือทฤษฎีมาสนับสนุน หรือหักล้างอย่างเป็นเหตุเป็นผล และอาจมีข้อเสนอแนะที่จะนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์

1.6 กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement) (ถ้ามี) ระบุสั้นๆ ว่าได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยและความช่วยเหลือจากที่ใดบ้าง

1.7 เอกสารอ้างอิง (References) การอ้างอิงในบทความใช้การอ้างอิงแบบตัวเลข เอกสารอ้างอิงท้ายบททุกฉบับ จะต้องมีการอ้างอิงในบทความ และมีการอ้างอิงที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ ตามรูปแบบของ IEEE ซึ่งประกอบด้วย ชื่อผู้เขียน ชื่อหนังสือหรือชื่อบทความ ชื่อของเอกสารที่พิมพ์สำนักหรือสถานที่พิมพ์ ฉบับที่ เล่มที่ เลขหน้า และปีที่พิมพ์ ทั้งนี้การเขียนให้เป็นไปตามรูปแบบของชนิดเอกสารที่อ้างอิง ดังรูปแบบดังนี้

- [1] P. Choeysuwan 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. Baltes, "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.

1.8 ภาคผนวก (ถ้ามี)

1.9 ตารางและรูป ต้องมีความคมชัด และให้แทรกไว้ในบทความ มีคำอธิบายสั้นๆ แต่สื่อความหมายได้สาระครบถ้วนและเข้าใจ กรณีที่เป็นตาราง ให้ระบุลำดับที่ของตาราง ใช้คำว่า "ตารางที่..." และมีคำอธิบายใส่ไว้เหนือตาราง กรณีที่เป็นรูปให้ระบุลำดับที่ของรูปใช้คำว่า "รูปที่..." และมีคำอธิบายใส่ไว้ใต้รูป

2. คำแนะนำในการเขียนและพิมพ์

2.1 คำแนะนำทั่วไป บทความต้องมีความยาวไม่เกิน 8 หน้ากระดาษ A4 พิมพ์ด้วย Microsoft Word หรือซอฟต์แวร์อื่น ที่ขนาดตัวอักษรกำหนดได้ใกล้เคียงกัน การตั้งค่าหน้ากระดาษ

- 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) เป็นคอลัมน์เดี่ยว และส่วนที่สองกำหนดเป็น 2 คอลัมน์ โดยระยะห่างระหว่างคอลัมน์เป็น 0.26" หรือ 0.7 ซม.

การลำดับหัวข้อของเนื้อเรื่องให้ใช้เลขกำกับบทนาเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีหัวข้อย่อยให้ใช้เลขระบบทศนิยมกำกับหัวข้อย่อย และสามารถเว้นโหลทรายละเอียดได้ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej>

2.2 แบบและขนาดตัวอักษร ใช้ตัวอักษรแบบ Angsana UPC สำหรับบทความภาษาไทย และให้ใช้รูปแบบตัวอักษร Times New Roman สำหรับบทความภาษาอังกฤษ

บทความภาษาไทย กำหนดรูปแบบดังนี้

- ขนาดของตัวอักษรให้ใช้ Angsana New เท่านั้น
- ชื่อเรื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- ขนาด 26 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)
- ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน
- ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)
- สถานที่ทำงาน
- ขนาด 12 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)
- คำว่า "บทคัดย่อ"
- ขนาด 16 ตัวหนา
- คำสำคัญ (Key Words)
- ให้ใส่คำสำคัญ 3 – 5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับบทความที่นำเสนอ โดยให้จัดพิมพ์ใต้บทคัดย่อภาษาอังกฤษ
- ส่วนของเนื้อความในบทคัดย่อ
- ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)
- ส่วนของเนื้อความทั้งหมด
- ขนาด 14 ตัวปกติ (แบ่งเป็น 2 คอลัมน์)
- คำว่า "Abstract"
- ขนาด 16 ตัวหนา
- ส่วนของเนื้อความใน Abstract
- ขนาด 16 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)
- หัวข้อใหญ่และหมายเลขประจำหัวข้อใหญ่
- ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)
- หัวข้อย่อยและหมายเลขประจำหัวข้อย่อย
- ขนาด 14 ตัวหนา
- คำว่า "กิตติกรรมประกาศ" หรือ "Acknowledgement" ขนาด 16 ตัวหนา (ใส่หมายเลขลำดับหัวข้อด้วย)
- คำว่า "เอกสารอ้างอิง" หรือ "Reference" ขนาด 16 ตัวหนา (ใส่หมายเลขลำดับหัวข้อด้วย)
- สมการ หรือพจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน ควรเขียนโดยใช้ Equation Editor โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับอยู่ในวงเล็บเล็ก

บทความอังกฤษ กำหนดรูปแบบดังนี้

- ขนาดของตัวอักษรให้ใช้ Times New Roman เท่านั้น
- ชื่อเรื่อง
ขนาด 18 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)
- ชื่อผู้เขียนและผู้ร่วมงาน
ขนาด 12 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)
- สถานที่ทำงาน
ขนาด 10 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)
- คำว่า “Abstract”
ขนาด 12 ตัวหนา
- คำสำคัญ (Key Words)
ให้ใส่คำสำคัญ 3 – 5 คำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับบทความที่นำเสนอ โดยให้จัดพิมพ์ได้บทความด้วยภาษาอังกฤษ
- ส่วนของเนื้อความใน “Abstract”
ขนาด 11 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)
- ส่วนของเนื้อความทั้งหมด
ขนาด 11 ตัวปกติ (แบ่งเป็น 2 คอลัมน์)
- หัวข้อใหญ่และหมายเลขประจำหัวข้อใหญ่
ขนาด 12 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)
- หัวข้อย่อยและหมายเลขประจำหัวข้อย่อย
ขนาด 11 ตัวหนา
- คำว่า “กิตติกรรมประกาศ” หรือ “Acknowledgement” ขนาด 12 ตัวหนา (ใส่หมายเลขลำดับหัวข้อด้วย)
- คำว่า “เอกสารอ้างอิง” หรือ “Reference” ขนาด 12 ตัวหนา (ใส่หมายเลขลำดับหัวข้อด้วย)
- สมการ หรือพจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนควรเขียนโดยใช้ Equation Editor โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับอยู่ในวงเล็บเล็ก

3. เกณฑ์การพิจารณาบทความ

มีดังนี้ ความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ คุณค่าทางวิชาการ ความสมบูรณ์ของเนื้อหา และโครงสร้าง ภาษาที่ใช้ ความชัดเจนของสมมุติฐาน / วัตถุประสงค์ ความชัดเจนของการนำเสนอ และการจัดระเบียบบทความ ความถูกต้องทางวิชาการ การอภิปรายผล และการอ้างอิงที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ

บทความจะต้องได้รับการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชานั้นๆ อย่างน้อย 2 ท่าน ซึ่งกองบรรณาธิการอาจให้ผู้เขียนปรับปรุงให้เหมาะสมยิ่งขึ้น และสงวนสิทธิ์ในการตัดสินใจตีพิมพ์หรือไม่ก็ได้ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด โดยส่งเป็นไฟล์งาน .pdf และ .doc เป็น Word 2013

4. วิธีการส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารลาดกระบัง

บทความที่ส่ง เปิดรับทั้งจากบุคคลภายใน และภายนอกสถาบันฯ โดยบทความนั้น ต้องมีความยาวไม่เกิน 8 หน้า 2 คอลัมน์ ผู้เขียนจะต้องส่งต้นฉบับ 1 ชุด โดยหน้าแรกของบทความจะมีชื่อที่อยู่ของผู้เขียน 1 หน้า และหน้าแรกของบทความที่ไม่ระบุชื่อผู้เขียนอีก 1 หน้า รวมทั้งหมด 9 หน้า และกรุณาระบุชื่อ-นามสกุล ที่อยู่ เบอร์โทรศัพท์ และ E-mail address ใช้ชัดเจนในแบบฟอร์มการส่งบทความด้วย ผู้เขียนสามารถส่งผ่านระบบวารสารออนไลน์ โดยลงทะเบียนและส่งบทความ ได้ที่ ลิงก์ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions> ผู้ประสานงานและสถานที่ติดต่อ: นางสาวชนัญชิตา นอนน้อย งานวิจัยและนวัตกรรม (ส่วนวารสารลาดกระบัง) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ อาคาร 6 ชั้น (ตึก A) ชั้น 2 เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail : kmitleng.jnl@gmail.com หมายเลขติดต่อ :

โทรศัพท์(เบอร์กลาง) 02-329-8000 ต่อ 3465

โทรศัพท์สายตรง/โทรสาร : 02-327-8317

โทรศัพท์มือถือ 088-262-4617



เลขที่อ้างอิง.....

แบบฟอร์มการส่งบทความ

วันที่ส่ง.....

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

ชื่อบทความ(ภาษาอังกฤษ).....

ประเภทบทความ ☐ บทความวิชาการ ☐ บทความวิจัย

Keywords (คำสำคัญ).....

ชื่อ - นามสกุล ผู้เขียน (ภาษาไทย) และ (ภาษาอังกฤษ)

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

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

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

จำนวนหน้า.....หน้า

ชื่อและที่อยู่ผู้เขียนที่สามารถติดต่อได้

ชื่อ - นามสกุล.....

ที่อยู่.....

เบอร์โทรศัพท์.....E-mail.....

ข้าพเจ้าได้แนบบทความที่มีความถูกต้องสมบูรณ์ตามคำแนะนำรูปแบบการเขียนบทความมาพร้อมนี้
และรับรองว่า

- ☐ ได้รับความเห็นชอบในการส่งบทความครั้งนี้จากผู้ร่วมเขียนบทความแล้ว (ถ้ามี)
- ☐ ข้าพเจ้า และผู้ร่วมเขียนบทความ (ถ้ามี) จะรับผิดชอบเกี่ยวกับลิขสิทธิ์ของต้นฉบับในทุกกรณี
- ☐ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความยังไม่เคยตีพิมพ์ หรืออยู่ระหว่างการพิจารณาเพื่อขอรับการตีพิมพ์ในวารสารอื่น

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ ซึ่งสามารถประเมินบทความของท่านได้ จำนวน 2 ท่าน โดยระบุชื่อ-นามสกุล
ตำแหน่งทางวิชาการ, E-mail และเบอร์โทรศัพท์ที่สามารถติดต่อได้)

1. ชื่อ-นามสกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....

E-mail :โทรศัพท์.....

2. ชื่อ-นามสกุล.....ตำแหน่งทางวิชาการ.....

E-mail :โทรศัพท์.....

ใบรับรอง

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว).....
ตำแหน่ง.....สถานที่ทำงาน.....
ที่อยู่.....
โทรศัพท์.....มือถือ.....โทรสาร.....
e-mail : Line :
ขอรับรองว่า(นาย/นาง/นางสาว).....
เป็นนิสิต/นักศึกษามหาวิทยาลัย.....ปีการศึกษา.....
ระดับปริญญา.....ชั้นปีที่ จริง และได้พิจารณาบทความแล้วว่ามีความเหมาะสมที่จะ
ขอเสนอเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง

***กรณีที่เป็นนิสิตนักศึกษา ต้องให้อาจารย์ที่ปรึกษากรอกใบรับรอง (วิทยานิพนธ์ / การศึกษาค้นคว้าอิสระ)

แบบฟอร์มสั่งซื้อวัสดุสารลาดกระบัง และ สมัครสมาชิก

ชื่อ.....นามสกุล.....

สถานที่จัดส่งหนังสือ.....

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

สมัครสมาชิกวัสดุสารลาดกระบัง

- | | |
|--|--|
| ☐ ปี 2559 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2562 ค่าสมัคร 200 บาท |
| ☐ ปี 2560 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2563 ค่าสมัคร 200 บาท |
| ☐ ปี 2561 ค่าสมัคร 200 บาท | ☐ ปี 2564 ค่าสมัคร 200 บาท |

หมายเหตุ ปีละ 4 ฉบับ (รวมค่าจัดส่ง)

ต้องการซื้อวัสดุสารลาดกระบัง

- | | |
|---|--|
| ☐ เล่มที่ 1 / 2562 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 1 / 2563 ราคา 100 บาท |
| ☐ เล่มที่ 2 / 2562 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 2 / 2563 ราคา 100 บาท |
| ☐ เล่มที่ 3 / 2562 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 3 / 2563 ราคา 100 บาท |
| ☐ เล่มที่ 4 / 2562 ราคา 100 บาท | ☐ เล่มที่ 4 / 2563 ราคา 100 บาท |
| ☐ อื่น ๆ ปีที่.....ฉบับที่.....ประจำเดือน.....พ.ศ..... | |

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

ชำระค่าสั่งซื้อโดย

- ☐ เงินสด แผนกตำรา วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....
- ☐ ธนาคัติสั่งจ่ายในนาม แผนกตำรา
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร 10520 ที่ทำการเคาน์เตอร์บริการเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 00016
- ☐ ผ่านบัญชีออมทรัพย์ธนาคารไทยพาณิชย์ สาขาซอยเทคโนโลยีฯ เจ้าคุณทหาร
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง
กรุงเทพมหานคร 10520
ชื่อบัญชี “แผนกตำราและประชาสัมพันธ์” เลขที่ 088 - 2 15272 - 2

ถ่ายสำเนาใบสั่งซื้อ และส่งเอกสารการชำระค่าสั่งซื้อมาที่ :

งานวิจัยและนวัตกรรม (วัสดุสารลาดกระบัง) ส่วนสนับสนุนวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบังกรุงเทพมหานคร 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. Choeysuwan 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. Baltes, "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. Please submit your manuscript as ONE original .pdf file. The first page of the manuscript contains the authors' names and complete affiliations. Please also duplicate the first page of the manuscript with the names and affiliations made anonymous. The total number of pages for a manuscript shall be nine (9).

2. Please clearly fill out the submission form. Authors can submit their manuscript online via the journal system at the url : <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/about/submissions>

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. Worapong Tangsirat

Editorial Staff :

*Mr.Thanongsak Chaichuensaen
Cover Design.*

*Asst. Prof. Dr.Napasool Wongvanich
Miss.Chanunchida Nobnom*

Mr.Sataporn Pongprayoon

Liaise & Member Relationships

*Create Original Artwork & Proofreading
and Photo Books.*

Distributed by :

Faculty of Engineering,

Miss.Chanunchida Nobnom

Mrs.Atisuda Chanvikorn

Tel : (662) 329-8317



ISSN 0125-1724

วิศวกรรม
ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

Volume 37 Number 1

January - March 2020

Research Papers

1. Low Cost Furnace for Monitoring and Control via Remote Wireless Network in Cloud Service. 1
T. Photsathian T. Suttikul and W. Tangsrirat
2. Improving the Properties of Rubber Roll Husker with Calcium Carbonate. 6
K. Ruengsirisombut and A. Artnasaew
3. Design and CFD Simulation of Agitating Blade in Tank for Mixing Fluids. 13
W. Lahamornchaiyakul
4. Development of Influence zone of Water Supply Tunnel due to Nearby Deep Excavation. 21
R. Sukkaruk P. Jongpradist T. Yamklam and S. Haerumpakul