



# RMUTL Engineering Journal

ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2568

ISSN(Print) 3027-7426

ISSN(Online) 3027-7434

## วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

|                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Toxicity Posts and Hateful Comments Detection in Thai Language Using Supervised Ensemble Classification<br>Sutthisak Sukhamsri                                                                           | 1  |
| Exploring Waste Heat Recovery: A Case Study of a Batch Centrifugal Machine<br>Adekunle Ibrahim Musa and Overah Eguonor                                                                                   | 9  |
| Estimating the Length of Right-Turn and U-Turn Pocket Lane Using Binomial Distribution<br>Chakrit Choovuthayakorn Tana Noiruean and Noppakun Boongrapue                                                  | 17 |
| Reducing Sink Mark Defect of Cup Plastic Injection by Biodegradable Material with an Injection Rate<br>Adirake Chainawakul Teerawat Sangkas Suthaphat Kamthai and Supasit Manokruang                     | 27 |
| ผลตอบสนองทางสถิติศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้ารับแรงดันน้ำสถิต<br>วีรพันธุ์ เจริญมีปรีชา คมกร ไชยเดชธร เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง การ์นต์ คล้ายฉ่ำ และสิทธิศักดิ์ แจ่มนาม | 35 |
| บล็อกประสานปูพื้นจากเถ้าขาน้อยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ใช้ทรายและกากแร่แคลไซด์ เป็นมวลรวมละเอียด<br>รัฐพล สมนา ประชุม คำพุ่ม และเกียรติสุดา สมนา                                                         | 48 |
| การวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ในการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานสำหรับกลุ่มอาคารที่พักอาศัยด้วยวิธีหาค่าความเหมาะสม<br>จิรกร รียะทา และยศธนา คุณาทร                            | 58 |
| การวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐานของกลุ่มน้ำป่าสัก<br>วิญญพงศ์ ปรางงาม เกศวรา สิทธิโชค และไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์                                                                                            | 73 |



วารสารวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

ได้รับการประเมินให้อยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 1

F a c u l t y o f E n g i n e e r i n g





# วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา RMUTL Engineering Journal

## วัตถุประสงค์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เป็นวารสารทางวิชาการจัดพิมพ์ฉบับแรกในเดือนมกราคม พ.ศ. 2559 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและองค์ความรู้ทางที่น่าสนใจด้านวิจัยและงานบริการวิชาการ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการสร้างความก้าวหน้าทางวิชาการ และมาตรฐานการประกอบวิชาชีพ โดยสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ วิศวกรรมระบบควบคุม วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมโทรคมนาคม วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมเกษตร วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมแม่พิมพ์ วิศวกรรมโลหการ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมเหมืองแร่ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง

## เจ้าของ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

เลขที่ : 128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

โทรศัพท์ : 0 5392 1444 ต่อ 2641, 1236

เว็บไซต์ : <https://engineering.rmutl.ac.th/journal> และ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ>

อีเมล : [EngineeringJournal@rmutl.ac.th](mailto:EngineeringJournal@rmutl.ac.th)

## ที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและกิจการนักศึกษา

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาระบบอย่างยั่งยืน

รองอธิการบดีฝ่ายแผนนโยบายและยุทธศาสตร์

รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร

ผู้ช่วยอธิการบดี

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณบดีคณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์

คณบดีคณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร

ผู้อำนวยการสำนักส่งเสริมวิชาการและงานทะเบียน

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

ผู้อำนวยการสถาบันถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน



ผู้อำนวยการวิทยาลัยเทคโนโลยีและสหวิทยาการ  
ผู้อำนวยการสำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ  
รองคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

## บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา ยิ่งขยัน คณะวิศวกรรมศาสตร์

## รองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์ สิทธิเจริญ คณะวิศวกรรมศาสตร์

## กองบรรณาธิการ

### กองบรรณาธิการจากหน่วยงานภายนอก

|                               |                    |                                            |
|-------------------------------|--------------------|--------------------------------------------|
| ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์       | จำนงไทย            | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี      |
| ศาสตราจารย์ ดร.สักรกมน        | เทพหัสดิน ณ อยุธยา | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี      |
| ศาสตราจารย์ ดร.दनัย           | ต.รุ่งเรือง        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์       | อัครเอกผาลิน       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| ศาสตราจารย์ ดร.ประดิษฐ์       | เทอดทูล            | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                       |
| ศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์        | ลิขิตเลอสรวง       | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                      |
| ศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต         | สิริสิงห์          | มหาวิทยาลัยมหิดล                           |
| ศาสตราจารย์ ดร.อภินิติ        | โชติสังกาศ         | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                     |
| ศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์      | ภูมิภิตติพิชญ์     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี         |
| รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง      | ปลั่งกลาง          | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี         |
| รองศาสตราจารย์ ดร.กานต์       | เกิดขึ้น           | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน           |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์     | ชื่นแขก            | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญญารัตน์ | สายสิริรัตน์       | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วารุณี      | เปรมานนท์          | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี      |
| รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์   | แก้วดาทิพย์        | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี      |
| รองศาสตราจารย์ ดร.สันติรัฐ    | นันทะอาจ           | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี      |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์   | เจริญสุวรรณ        | มหาวิทยาลัยนเรศวร                          |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์      | พงษ์เจริญ          | มหาวิทยาลัยนเรศวร                          |
| รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิฐ       | ศรีสุริยจันทร์     | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย       | ฉัตรทินวัฒน์       | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ     | โสภางค์            | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิธ       | เจริญใจ            | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.อนุชา       | วัชรภาสกร          | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                       |
| รองศาสตราจารย์ ดร.พฤทัย       | สกุลช่างสัจจะทัย   | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                       |



|                                   |               |                                                |
|-----------------------------------|---------------|------------------------------------------------|
| รองศาสตราจารย์ ดร.ชวโรจน์         | ใจสิน         | มหาวิทยาลัยแม่โจ้                              |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์     | คงประเสริฐ    | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ        | รอดอัมพร      | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                     |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธูปน        | ชื่นบาล       | มหาวิทยาลัยแม่โจ้                              |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริภรณ์    | ชื่นบาล       | มหาวิทยาลัยแม่โจ้                              |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์    | สากุล         | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย            |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธิพล     | ดำรงชัย       | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่                           |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวา        | แก้วปลั่ง     | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม                           |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิโยรส      | พรหมดิเรก     | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ     |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลลภ       | หาญณรงค์ชัย   | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ     |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ | แพบัว         | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ     |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพงษ์     | สุลักษณ์      | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| นางสาวกฤตยา                       | ศักดิ์อมรสงวน | กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่            |

#### กองบรรณาธิการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

|                                |               |                   |
|--------------------------------|---------------|-------------------|
| รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน        | คำน่าน        | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา        | เย็นยงกุล     | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| รองศาสตราจารย์ ดร.พินิจ        | เนื่องภิรมย์  | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิต       | แก้วดวงตา     | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย   | เดชธรรมรงค์   | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ  | จารุภูมิ      | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐพล    | จันทวงศ์      | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิติพร   | พันธุ์ท่าช้าง | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวโรจน์ | ศิริลักษณ์    | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รณชาติ   | มันศิลป์      | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ | กิตติเดชา     | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| อาจารย์ภาณุ                    | อุทัยศรี      | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| อาจารย์โชคมงคล                 | นาดี          | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| อาจารย์ณัฐชาติ                 | ชูเกียรติขจร  | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| อาจารย์ปรัชญ์                  | ปิยะวงศ์วิศาล | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |

#### ฝ่ายจัดพิมพ์และเผยแพร่

|                |         |                   |
|----------------|---------|-------------------|
| นางสาวจิราภรณ์ | กันทะใจ | คณะวิศวกรรมศาสตร์ |
|----------------|---------|-------------------|



## จดหมายจากบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 ประจำเดือน มกราคม - มิถุนายน 2568 อยู่ในฐานข้อมูลศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) กลุ่มที่ 1 บทความวิจัยที่ส่งผ่านระบบได้รับการได้ผ่านการประเมินคุณภาพจากกองบรรณาธิการ และผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) จากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย กองบรรณาธิการจะรักษาคุณภาพของวารสารให้ได้มาตรฐาน เพื่อให้วารสารวิศวกรรมศาสตร์ (RMUTL Eng. J.) เป็นที่ยอมรับและเกิดการแบ่งปันองค์ความรู้ทางวิชาการที่มีคุณภาพและทันสมัยอย่างต่อเนื่อง

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ฉบับนี้ได้รับรวบรวมบทความทางวิชาการที่ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 8 บทความ ประกอบด้วยบทความสาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมอุตสาหการ และ วิศวกรรมชลประทาน สำหรับผู้ที่สนใจสามารถอ่านบทความฉบับปัจจุบันหรือฉบับย้อนหลังแบบออนไลน์เพิ่มเติมได้ทางเว็บไซต์ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/RMUTLEngJ>

ในนามของกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (RMUTL Eng. J.) ขอขอบพระคุณนักวิจัยทุกท่านเป็นอย่างสูง ที่ส่งบทความมาพิจารณาเพื่อตีพิมพ์ ผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่เสียสละเวลาในการประเมินบทความ และให้คำแนะนำในการปรับปรุงเนื้อหาบทความให้มีคุณภาพ คณะผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ผู้สนับสนุน รวมทั้งคณะทำงานในกองบรรณาธิการวารสาร (RMUTL Eng. J.) และบทความที่จะเผยแพร่ฉบับต่อไป เป็นบทความภาษาอังกฤษเต็มรูปแบบ เพื่อเป็นการยกระดับคุณภาพวารสารให้ดียิ่งขึ้น และในโอกาสนี้ผมขอเชิญชวนอาจารย์ นักวิจัย และนักศึกษา ส่งบทความวิจัย บทความวิชาการหรือบทความปริทัศน์ที่เกี่ยวข้องทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ในรูปแบบภาษาไทยและอังกฤษ เพื่อตีพิมพ์ในวารสาร (RMUTL Eng. J.) ในฉบับต่อ ๆ ไป

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎดา ยิ่งยวน)

บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา



# สารบัญ

ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2568

|                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>บทความวิชาการ</u>                                                                                                                          |    |
| Toxicity Posts and Hateful Comments Detection in Thai Language Using Supervised Ensemble Classification                                       | 1  |
| <i>Sutthisak Sukhamsri</i>                                                                                                                    |    |
| Exploring Waste Heat Recovery: A Case Study of a Batch Centrifugal Machine                                                                    | 9  |
| <i>Adekunle Ibrahim Musa and Overah Eguonor</i>                                                                                               |    |
| Estimating the Length of Right-Turn and U-Turn Pocket Lane Using Binomial Distribution                                                        | 17 |
| <i>Chakrit Choovuthayakorn Tana Noiruean and Noppakun Boongrapue</i>                                                                          |    |
| Reducing Sink Mark Defect of Cup Plastic Injection by Biodegradable Material with an Injection Rate                                           | 27 |
| <i>Adirake Chainawakul Teerawat Sangkas Suthaphat Kamthai and Supasit Manokruang</i>                                                          |    |
| ผลตอบสนองทางสถิติศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้ารับแรงดันน้ำสถิต                                             | 35 |
| <i>วีรพันธุ์ เจริญมีปรีชา คมกร ไชยเดชธร เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง การินทร์ คล้ายน้ำ และสิทธิศักดิ์ แจ่มนาม</i>                                   |    |
| บล็อกประสานปูพื้นจากเถ้าขานอ้อยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ใช้ทรายและกากแร่แคลไซต์ เป็นมวลรวมละเอียด                                             | 48 |
| <i>เกียรติสุดา สมณา ประชุม คำพุ่ม และรัฐพล สมณา</i>                                                                                           |    |
| การวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ในการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานสำหรับกลุ่มอาคารที่พักอาศัยด้วยวิธีหาค่าความเหมาะสม | 58 |
| <i>จิรกร รียะทา และยศธนา คุณาทร</i>                                                                                                           |    |
| การวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐานของกลุ่มน้ำป่าสัก                                                                                              | 73 |
| <i>วิชัยพงศ์ ปรางงาม เกศวรา ลิทธิโชค และไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์</i>                                                                             |    |





# Toxicity Posts and Hateful Comments Detection in Thai Language Using Supervised Ensemble Classification

Sutthisak Sukhamsri<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Information Technology, Faculty of Science and Agricultural Technology,  
Rajamangala University of Technology Lanna Tak

41/1 moo 7 Paholayothin Road, Mai Ngam, Mueang, Tak, Thailand, 63000

\*Corresponding Author: sutthisak@rmutl.ac.th. Phone Number: 08-1499-6516

Received: 7 April 2024, Revised: 25 July 2024, Accepted: 26 July 2024

## Abstract

Social media platforms are the community people gather in where they can generally express their free willing opinions to others on any topics they attend. However, on many occasions, the cause of violating arguments or an unpleasant atmosphere in the community is initiated by negative, toxic, and hateful posts or comments. For that reason, monitoring post systems on social media is an essential topic in the natural language processing area, especially in multi-linguistics research. In this study, we proposed a method of improvement for the Thai language's toxic and hateful classification that was trained on the dataset of 2,160 posts from the Thai toxicity Twitter corpus for training and verifying. Therefore, we designated the ensemble approach which includes the combination of XGBoost, multinomial naive Bayes, logistic regression, support vector machine, and random forest for classifiers. In summary, the ensemble classifier improved the previous study in the same dataset with 0.7808 precision, 0.7778 recall, and 0.7721 average accuracies in the weighted F1 scoring with an accuracy of 0.8235 in the F1 binary scoring.

**Keywords:** Natural Language Processing, Toxicity Posts, Word Vectorization, Thai Language Corpus, Ensemble Model.

## 1. Introduction

Social media are places where people can express their identity, share their opinions, and idealize. Over 5.18 billion users in late 2023 are engaging with various social media platforms such as Facebook, YouTube, Instagram, TikTok, and X (Twitter's rebranded identity) [1]. Accordingly, numerous users on each social media platform have diverse reasons that persuade them to keep in touch with friends and family, fulfill their spare time, read news, share, and discuss their opinions with the community. So, occasionally some activities on social media platforms may cause a conflict of opposing ideas in a thread of news feeds, influencer sharing, and political issues [2]. Therefore, to identify a negative post or tweet, the linguist attempts to use a taxonomy of word tone in a sentence [3] to classify the toxic or hateful sentence from neutral posts, in which diverse languages also have unique taxonomy and word corpus. Likewise, in the Thai language, many scholars have improved the Thai corpus as

NECTEC's ORCHID [4], NECTEC's BEST [5], and Thai user-generated web content (UGWC) [6] corpus.

Observing and identifying hate speech and toxic posts on social media is crucial for ensuring individual well-being and community integrity [7]. These harmful behaviors degrade discourse, create hostile environments, discourage participation, and marginalize vulnerable groups, undermining inclusiveness and democracy. This leads to self-censorship and withdrawal to avoid harassment. The psychological impacts, including stress, anxiety, depression, and suicidal ideation, necessitate effective moderation for mental health protection. Legally, platforms must monitor and remove hate speech to comply with laws and uphold societal norms. Unchecked hate speech can spread misinformation and radicalize individuals, leading to violence and societal destabilization. Economically, toxic environments reduce user engagement, affecting platforms' viability. Addressing these issues fosters safer, more



inclusive, and healthier online communities, promoting respectful dialogue and sustainability.

A significant approach to this problem is to use supervised machine learning techniques to train a model on a labeled dataset of social media posts. The features used in the model can include traditional NLP features like bag-of-words, TF-IDF, or word embeddings, as well as additional features such as sentiment scores, part-of-speech tags, and n-grams. Numerous research papers have proposed specific models to detect hate speech and offensive language on social media. In our study, we proposed a supervised ensemble classification framework for detecting toxic and hateful posts in the Thai language dataset, as shown in section 3, the model results and benchmarks in section 4, and the conclusion of this study in the last section.

## 2. Related Works

Scholars from Keio University [8] proposed the unigrams and the pattern features as a technique for automatic hate speech detection on Twitter based on the English dataset. Consequently, the pattern features have extracted the unigrams into two categories containing the sentimental word and non-sentimental word for primary unigram features. The dataset contains 7,000 tweets for a training set with three classes for classification prediction such as a hateful class, an offensive class, and a clean class. The various classifiers including the Random Forrest, Support Vector Machine, and J48graft are the candidates for benchmarking, thus the J48graft classifier is outperforming as 0.784 for an F1 accuracy. To sum up, in the same classification model the words feature method has a significance of the model performance. Thus it is the Unigram Features show outperform accuracy followed by the Pattern Features, the Sentiment-based Features, and the Semantic Features.

The study in [9] proposed the word ambiguous manipulation and an automatic sentiment classification for a Thai online document. Accordingly, a combination of deep learning classifiers such as a convolutional neural network (CNN), bi-directional long short-term memory (BLSTM), attention mechanism (ATTN), and bi-directional gates recurrent unit (BGRU) has been

selected for performance benchmarking. However, the data preparation for cleaning up a training corpus which includes removing username patterns, emojis, URLs, hashtags, and meaningless characters is a primitive method before document tokenize and word embedding technique to turn a sentence into a vector format before the classification. A collection of 41,073 documents split into 21,490 positive classes and 19,583 negative classes is training and verifying to mentioned deep learning models, found the BGRU+ATTN model performing best result for 91.85% and the others on around 91% F1 scoring accuracy. The deep-learning approach is an appropriate model for classifying a sentiment polarity with a structured vectorizing document even though in the Thai language.

In [10] proposed the comparison of supervised classifiers and deep-learning models for detecting toxic languages in the Thai Twitter dataset. Certainly, this research is separated into two feature extraction techniques, including Bag of Words (BOW) and term frequency-inverse document frequency (TF-IDF). Therefore, the candidate of classifiers including convolutional neural network (CNN), long-short-term memory (LSTM), and pre-trained bidirectional encoder Representations (BERT), were compared with the public Toxicity Thai Twitter corpus. The results show that the Bag of Words (BOW) with the Extra-Tree classifier, has achieved the highest F1-score of 0.72, a classification accuracy rate of 72.27%, and an AUC value of 0.77.

## 3. Methods

Our study employed three essential methods, incorporating data preprocessing as the preliminary method to input text cleansing and normalizing before vectorizing all documents thus suitable for training and verifying with the classifiers, a brief detail as in sub-sections 3.1, 3.2, and 3.3. The second method is the training and verifying process for all candidate classifiers which all competitors are combined into the ensemble model component and thus is emphasized in sub-section 3.4. The overview of the proposed framework is shown in Figure 1.



### 3.1 The Dataset

The scholars [11] gathered 3,300 tweets in the Thai language for their study in annotation and classification of toxicity for the Thai Twitter corpus. Therefore, the Thai toxicity tweets corpus is selected from a significant 44 keywords relevant to the Thai toxic words. For example, "จัญไร"

(beastly), "สันดาน" (traits), and "ต่อแหล" (lie) some of these keywords are common and neutral sentiment semantic words. But, it's likely for offensiveness use depending on the context of the sentences.

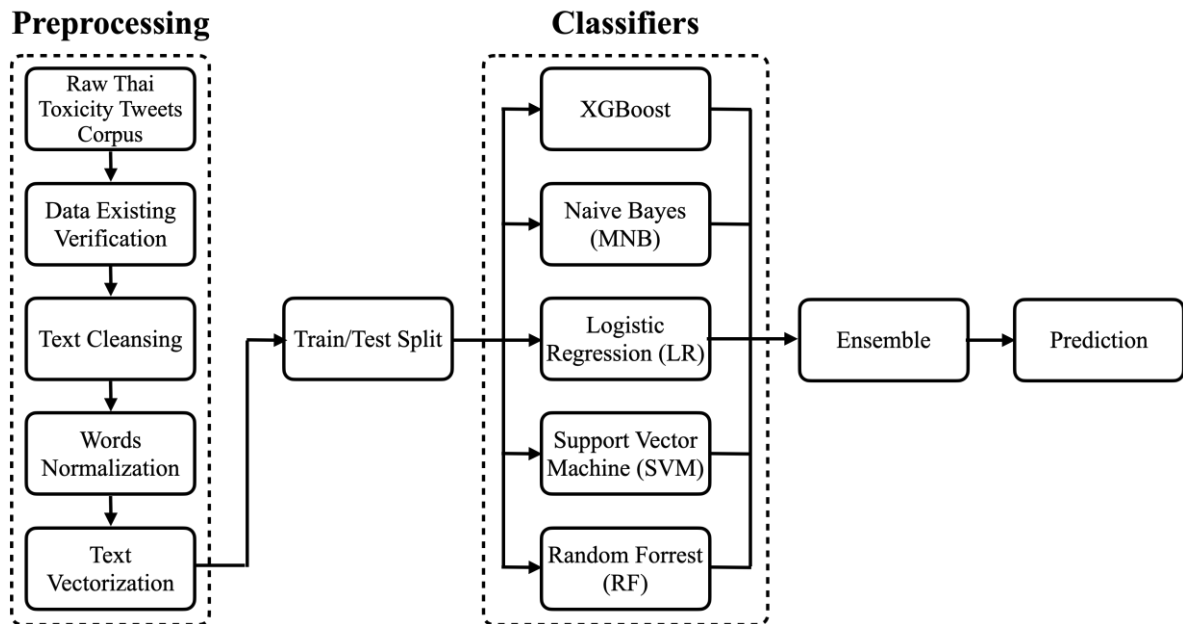


Figure 1. The framework of the ensemble classification method

So, each post has been reviewed and labeled as a toxicity post or neutral post with tripartite labelers for semantic annotation. In brief, for a primitive 3,300 tweets, we found a missing tweet text showing "TWEET\_NOT\_FOUND" for 506 tweets, along with an empty character in the dataset for 634 tweets. That remains 2,160 tweets for the data cleansing and pre-processing methods, including training with the various machine learning models for identifying a toxicity and neutral post-prediction afterward. The distribution of the trained and tested dataset includes 1,332 posts for toxicity posts with most of the unanimous agreed annotation labeled to class "1", and 828 posts for neutral tweets as shown in class "0", thus the tripartite labeled annotation voting proportion as shown in Figure 2. In short, the toxicity posts annotations are labeled with the unanimous agreed referring to 3 votes in tripartite followed by 2 votes

are majority agreed, while 1 vote and neglect are labeled as neutral posts

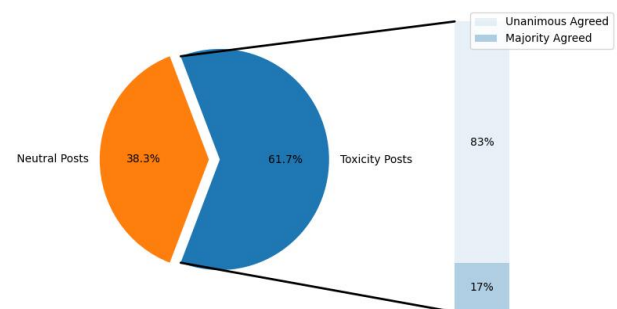


Figure 2. Tripartite Voting Proportion for Toxicity Annotation Posts

### 3.2 Data Preprocessing

The essential preliminary process for the NLP before the model training is wrangling and cleansing the raw text. Therefore, the text wrangling and the cleansing process is an



arrangement of a primitive text thus retrieved from sources to an appropriate format for an NLP modeling method.

Besides, the advantage of text pre-processing is eliminating an irrelevant context from significant words in the sentence or post. Moreover, the Thai language also contains ambiguous verbal in most Social Media postings, so the word normalizing with the Thai word corpus is the final process for the wrangling and cleansing process. In brief, the pre-processing method involves blank tweet removal, hashtag removal, special characters removal, punctuation & separator removal, URL removal, emoticon & Unicode removal, English words removal, number removal, and word normalization. The details and purpose of the text cleansing process with an instance tweet sample in each step of the processing are shown in Table I. Accordingly, after the preprocessing step, the corpus average words per post would reduce by around 6% from the initial corpus, or around 19.45 words per post after the word normalization process.

### 3.3 Text Vectorization

Consequently, the last method of the data pre-processing procedure is to vectorize the cleaned document with the term frequency (TF) and inverse document frequency (IDF) method. The TF-IDF is based on the vector space model (VSM) concept to visualize the words in documents to the high dimensional space of its vocabulary, thus represented as a vector. Hence,  $TF$  is a word  $w$  frequency count  $f$  in document  $d$  is shown in (1), while the  $IDF$  is the count  $N$  of document  $D$  in the corpus where the word term  $t$  represents in (2). Finally, the normalization of the vector between TF and IDF is as in (3).

$$tf(t,d) = \frac{f(t,d)}{\max\{f(w,d):w \in d\}} \quad (1)$$

$$idf(t,D) = \log \frac{N}{|\{d \in D : t \in d\}|} \quad (2)$$

$$tfidf(t,d,D) = tf(t,d) \times idf(t,D) \quad (3)$$

Table 1. The purpose of text cleansing in the pre-processing methods

| Process                         | Purpose                                                                                                                            |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| blank tweet removal             | Remove a record by the blank value and the "TWEET_NOT_FOUND" on the "tweet_text" field.                                            |
| hashtag removal                 | Remove the character "#" so that Twitter users often post with assigned hashtags relevant to their tweet topic.                    |
| punctuation & separator removal | Remove the punctuation characters and excess whitespace created by multiple spaces and tabs.                                       |
| URL removal                     | Remove website sharing links thus begin with "http" and "https".                                                                   |
| emoticon & Unicode removal      | Remove emoticons such as 😊, 🗨️, 🙌, 🙏, and 🙏, which include facial expressions and hand gestures, as well as any Unicode emoticons. |
| English words removal           | Remove all English words and single characters, as they are not relevant to the Thai dictionary.                                   |
| number removal                  | Remove all numbers from tweet text.                                                                                                |
| word normalization              | Check for spelling errors and correct them based on word similarity and relevance to the Thai dictionary corpus.                   |

### 3.4 Classifiers

Concerning the classifiers, we had designated aggregate as the baseline model beyond the previous study [10] as mentioned above. Therefore, a brief description of each classifier is shown as follows:



An XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) [12] is an algorithm for gradient boosting on decision trees. It is an implementation of the gradient boosting framework that is designed to be highly efficient, flexible, and portable. In text classification, XGBoost can be used to train a model that can predict the class of a piece of text based on its features. The features of a text can be represented using various methods, such as bag-of-words, n-grams, or word embeddings. These features can then be used as input to the XGBoost model, which will learn to predict the class of the text based on its features.

The multinomial Naive Bayes [13] is a variant of the Naive Bayes algorithm that is used for classification problems with discrete features, such as text classification. In a text classification problem, the model takes in a set of documents and their corresponding labels and learns the probability distribution of the words in each class. During the prediction stage, for a new document, the algorithm calculates the likelihood of the document belonging to each class, based on the words it contains, and assigns the class with the highest likelihood as the predicted label.

The Logistic Regression [14] is a supervised learning model that can be used for text classification tasks. The basic idea behind using Logistic Regression for text classification is to convert the text data into a numerical representation, such as bag-of-words or TF-IDF, and then use the numerical representation as input features for the Logistic Regression model. In TF-IDF representation, the text document is represented as a vector of TF-IDF values, which takes into account the frequency of the word in the document and its importance in the corpus.

The Support Vector Machines (SVMs) [15] can be used for text classification tasks such as document categorization and sentiment analysis, in combination with the TF-IDF (term frequency-inverse document frequency) representation of the text data. When training an SVM for text classification, the TF-IDF representation of the tweet text data is used as the input features for the SVM, and the corresponding labels toxic and neutral are used as the output labels. The SVM then learns to separate the different classes of data by finding the hyperplane that separates the different classes in the TF-IDF feature space.

A Random Forest [16] is an ensemble learning method that can be used for text classification tasks. It is an extension of decision trees, and it is composed of multiple decision trees that are trained on different subsets of the data and

with different subsets of the features. Following the text classification, a Random Forest algorithm typically works by first converting the text data into a numerical representation, such as TF-IDF or word embeddings.

The Convolutional Neural Networks (CNNs) [17] is a type of deep learning model that can be used for text classification tasks. CNNs are designed to process data that has a grid-like structure, such as images, and they have been adapted to work with text data by treating the text as a grid of words or characters. In text classification, a CNN takes in the text data, which is typically represented as a matrix of word embeddings, where each row corresponds to a word in the text, and each column corresponds to a dimension of the embedding.

An Ensemble Classification, with regards to our proposed supervised soft voting ensemble model as shown in (4) where the ensemble prediction is formed by the arguments of the maxima of weight  $w$  and probability  $p$  of each classifier which comprises logistic regression, multinomial naive Bayes, the XGBoost, support vector machine, and random forest.

$$y_{\text{ensemble}(x)} = \arg \max_i \sum_{j=1}^n w_j p_{ij} \quad (4)$$

#### 4. Results

The evaluation process is inaugurated by randomly splitting the dataset to 90:10 for the training and testing dataset. Accordingly, we report the performance of each classifier by adding an amount of each class as the weighted average precision as (5), (6) a weighted average recall as (7), (8) a weighted average F-1 score as (9), (10), and the accuracy as (11) to normalized a minority fluctuation in unbalanced class.

$$\text{Weighted Average Precision} = \frac{|y_0|}{|y|} \cdot P_0 + \frac{|y_1|}{|y|} \cdot P_1 \quad (5)$$

$$P_0 = \frac{T_{P_0}}{T_{P_0} + F_{P_0}} ; P_1 = \frac{T_{P_1}}{T_{P_1} + F_{P_1}} \quad (6)$$

$$\text{Weighted Average Recall} = \frac{|y_0|}{|y|} \cdot R_0 + \frac{|y_1|}{|y|} \cdot R_1 \quad (7)$$

$$R_0 = \frac{T_{P_0}}{T_{P_0} + F_{R_0}} ; R_1 = \frac{T_{P_1}}{T_{P_1} + F_{R_1}} \quad (8)$$

$$\text{Weighted Av. f1 Score} = \frac{|y_0| f1score_0}{|y|} + \frac{|y_1| f1score_1}{|y|} \quad (9)$$



$$f1score_0 = \frac{2 \cdot P_0 \cdot R_0}{P_0 + R_0} ; f1score_1 = \frac{2 \cdot P_1 \cdot R_1}{P_1 + R_1} \quad (10)$$

$$accuracy = \frac{T_p + T_n}{T_p + T_n + F_p + F_n} \quad (11)$$

Where  $y$  is the set of predicted pairs,  
 $y_n$  is the set of predicted class  $n$ ,  
 $P_n$  is the precision of class  $n$ ,  
 $R_n$  is the recall of class  $n$ ,  
 $T_{P_n}$  is the true positive of class  $n$ ,  
 $F_{P_n}$  is the false positive of class  $n$ ,  
 $F_{N_n}$  is the false negative of class  $n$ .

In summary, the results are in Table 2. found in a particular candidate classifier that the logistic regression outperformed accuracy in the group at 0.8145 followed by an XGBoost at 0.7895 and the baseline CNN is the third place at 0.7952. Compared with the transformer-based model BERT shown in reference [10] our proposed ensemble model also performed better with around 16% accuracy.

Therefore, the ensemble model is superior and performs in all benchmarks with a 0.7802 in precision accuracy, 0.7778 in recall accuracy, by far the average accuracy of 0.7721, and the overall binary f1-accuracy as 0.8235.

Table 2. The performance of candidate & proposed classifiers

| Classifier                     | Weighted F1 Accuracy |               |               | Binary F1 Accuracy |
|--------------------------------|----------------------|---------------|---------------|--------------------|
|                                | Precision            | Recall        | Average       |                    |
| XGBoost                        | 0.7530               | 0.7546        | 0.7518        | 0.7985             |
| MNB                            | 0.7282               | 0.7037        | 0.6757        | 0.7852             |
| LR                             | 0.7681               | 0.7639        | 0.7565        | 0.8145             |
| SVM                            | 0.7468               | 0.7407        | 0.7422        | 0.7686             |
| RF                             | 0.7303               | 0.7315        | 0.7255        | 0.7852             |
| CNN<br>(Baseline)              | 0.7652               | 0.7639        | 0.7644        | 0.7952             |
| <b>Ensemble<br/>(Proposed)</b> | <b>0.7802</b>        | <b>0.7778</b> | <b>0.7721</b> | <b>0.8235</b>      |
| BERT [10]                      | 0.6500               | 0.6800        | 0.6700        | 0.6600             |

## 5. Conclusion

The ensemble model is an enhancement method for improving the performance by the ability of the candidate classifiers by their prediction and the confidence as a weighted

parameter. Particularly, in text mining and document classification applications the basic classifiers have approximate optimal performance in the same range thus the ensemble model is appropriate for overall improvement. As in this research, an ensemble method classifier with TF-IDF featuring methods provides several advantages in text classification tasks. Firstly, they enhance robustness by leveraging diverse representations of text data, improving the model's ability to handle variations in language use and important words in a document structure. Secondly, ensemble classifiers mitigate an overfitting inherent in TF-IDF-based models by aggregating predictions from multiple base classifiers trained on different subsets of the data or feature space. This regularization enhances the model's generalization to unseen documents and reduces the impact of noise in the training data. However, the pre-processing in this research such as text-cleansing is beneficial to eliminate meaningless words and irrelevance punctuation in forming the word vectorization in TF-IDF have a significant to the dimensional reduction for the model training process. In contrast with reference [11] is included emoticons in their training dataset with the belief that they expressed a sentence emotionally. Our experiment in the pre-processing step found the emoticons are useful for sentiment classification, but not quite meaningful in our objective to classify toxicity posts and comments. It is because many sarcastic posts use emoticons as mocking adversative meanings. Hence, we decide to remove all emoticons in the pre-processing task.

Additionally, our proposed methods improve classification accuracy, especially in challenging tasks with imbalanced class distributions or subtle distinctions between document categories. By combining predictions from multiple classifiers, ensemble classifiers achieve higher predictive performance than individual models. Overall, our proposal thus based on an ensemble classifier offers practitioners a powerful approach to building reliable and effective text classification models for toxicity posts and hateful comments detection, which is different from sentiment classification in previous research. The word's meaning is relevant to the tone of the sentences in which the modern language model such as the transformer-based



model or the large language model outperformed for sentimental prediction. But not for toxicity and hate speech detection particularly in written language with connotations like Thai language. So, we found that the sentences vectorized with a thoroughly selected for modeling an ensemble decision are appropriate for classifying a connotative meaning in sarcastic comments based on the degree of word vectorization method in our proposal than the previous study shown as benchmarking in Table 2 results.

Future research and applications for detecting hate speech and toxic posts on social media should enhance algorithmic accuracy and efficiency, leveraging NLP and machine learning model advancements like BERT and GPT. Developing models that understand context, sarcasm, and evolving slang, along with creating multilingual and cross-cultural capabilities by using diverse datasets, is essential. A community-based moderation, where users report harmful content should be explored. Likewise, maintaining trust in automated systems and integrating detection with speech-to-text generation from image and video analysis can enhance. These advancements can be applied across social media platforms, educational research, and fostering safer benefits for more inclusive well-being online communities.

## 7. References

- [1] Kemp S. Digital 2023: Global Overview Report - DataReportal – Global Digital Insights. [cited 2 February 2024]. Available from: <https://datareportal.com/reports/digital-2023-global-overview-report>.
- [2] Yuenyong S, Hnoohom N, Wongpatikaseree K, Ayutthaya TPN. Classification of Tweets Related to Illegal Activities in Thai Language. In: 2018 International Joint Symposium on Artificial Intelligence and Natural Language Processing (iSAI-NLP); 2018. p. 1-6.
- [3] Mathew B, Kumar N, Ravina, Goyal P, Mukherjee A. Analyzing the hate and counter-speech accounts on Twitter. (Cornell University); 2018.
- [4] Sornlertlamvanich V, Takahashi N, Isahara H. Building a Thai part-of-speech tagged corpus (orchid). J Acoust Soc Jpn (E). 1999;20(3):189-198.
- [5] Kosawat K, Boriboon M, Chootrakool P, Chotimongkol A, Klaithin S, Kongyoung S, Kriengkiet K, Phaholphinyo S, Purodakananda S, Thanakulwarapas T, et al. BEST 2009: Thai word segmentation software contest, Natural Language Processing 2009. In: SNLP'09 Eighth International Symposium; 2009. p.83-88.
- [6] Lertpiya A, et al. A Preliminary Study on Fundamental Thai NLP Tasks for User-generated Web Content. In: 2018 International Joint Symposium on Artificial Intelligence and Natural Language Processing (iSAI-NLP). 2018. p.1-8.
- [7] Davidson T, Warmsley D, Macy M, Weber I. Automated hate speech detection and the problem of offensive language. Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media. 2017;11(1):512-515.
- [8] Watanabe H, Bouazizi M, Ohtsuki T. Hate Speech on Twitter: A Pragmatic Approach to Collect Hateful and Offensive Expressions and Perform Hate Speech Detection. IEEE Access. 2018;6:13825-13835.
- [9] Piyaphakdeesakun C, Facundes N, Polvichai J. Thai Comments Sentiment Analysis on Social Networks with Deep Learning Approach. In: 2019 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC). 2019. p.1-4.
- [10] Thiengburanathum P, Charoenkwan P. A Performance Comparison of Supervised Classifiers and Deep-learning Approaches for Predicting Toxicity in Thai Tweets. In: 2021 Joint International Conference on Digital Arts, Media and Technology with ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunication Engineering. Cha-am, Thailand, 2021. p.238-242.
- [11] Sirihattasak S, Komachi M, Ishikawa H. Annotation and classification of toxicity for Thai Twitter. Proceedings of LREC 2018 Workshop and the 2nd Workshop on Text Analytics for Cybersecurity and Online Safety (TA-COS'18). 2018.
- [12] Chen T, Guestrin C. Xgboost: A scalable tree boosting system. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016.



- [13] McCallum A, Nigam K, Ungar LH. A comparison of event models for naive Bayes text classification. In: Proceedings of the 15th International Conference on Machine Learning. 1998. p.41-48.
- [14] Joachims T. Text categorization with support vector machines: learning with many relevant features. In: European Conference on Machine Learning. Springer, Berlin, Heidelberg. 1998. p.137-142.
- [15] Weston J, Chakrabarti S, Weiss Y. Text classification using string kernels. In: Proceedings of the 10th ACM International Conference on Information and Knowledge Management. ACM. November 2001. p.191-198.
- [16] Poon H, Domingos P. Random forests for text classification. In: Proceedings of the 23rd Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. 2007. p.907-914.
- [17] Kim Y. Convolutional neural networks for sentence classification. In: Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. October 2014. p.1746-1751.



# Exploring Waste Heat Recovery: A Case Study of a Batch Centrifugal Machine

Adekunle Ibrahim Musa<sup>1\*</sup> and Overah Eguonor<sup>2</sup>

<sup>1&2</sup>Department of Mechanical Engineering, Olabisi Onabanjo University, Ago Iwoye, Nigeria  
R35X+6MC, Igbogun Sowunmi, Ogun State, 112104, Nigeria

\*Corresponding Author: musa.adekunle@oouagoiwoye.edu.ng; Phone number: +2348035050573

Received: 11 June 2024, Revised: 9 September 2024, Accepted: 12 September 2024

## Abstract

Recovering waste heat is crucial for improving energy efficiency in industrial processes. As the demand for sustainable and eco-friendly solutions grows, industries are seeking various methods to reclaim and reuse the heat generated during their operations. The primary objective of this study is to explore the potential for waste heat recovery in batch centrifugal machines by analyzing their current energy consumption and waste heat generation, investigating the feasibility and efficiency of various recovery methods, assessing the potential energy savings and environmental benefits of implementing these systems, and providing practical recommendations for industries to optimize their energy use, thereby demonstrating the significant role of waste heat recovery in enhancing the overall energy efficiency and sustainability of industrial operations. Through an analysis of empirical data collected from the operation of batch centrifugal machines, this study quantifies the magnitude of waste heat generation across different operating conditions. By examining power and current values obtained from the tables, the study identifies opportunities for energy recovery and optimization. Leveraging innovative techniques, the research demonstrates how proactive waste heat management can enhance energy efficiency and sustainability in industrial operations. The findings underscore the importance of integrated approaches to waste heat management, emphasizing its role in reducing environmental impact and improving overall operational performance.

**Keywords:** Waste energy recovery, Batch centrifugal machine, Energy efficiency, Environmental impact, Industrial practices, Power and current values.

## 1. Introduction

Waste heat recovery is an essential aspect of enhancing energy efficiency in industrial processes. With the increasing demand for sustainable and eco-friendly solutions, industries are exploring various methods to reclaim and reuse waste heat generated during operations. This study focuses on the potential of waste heat recovery in batch centrifugal machines, which are widely used in various manufacturing sectors for processes such as drying, separation, and crystallization. By analyzing the efficiency and feasibility of capturing waste heat from these machines, this research aims to contribute to the development of more energy-efficient and environmentally friendly industrial practices.

The global imperative for sustainability and resource conservation has sparked heightened the waste energy recovery, specifically examining a case study involving a batch centrifugal machine. The introduction sets the stage for understanding the realms [1-3]. This study focuses on waste energy across various sectors, especially within industrial scope, importance, and significance of interest in energy efficiency and waste reduction

research project. The 21<sup>st</sup> century has underscored the necessity for sustainable practices across industries [4-5]. While energy fuels modern manufacturing and economic growth, inefficiencies in energy usage result in waste, higher operational costs, and adverse environmental impacts [6-7].

The industrial sector, a significant energy consumer, faces particular scrutiny due to its reliance on complex machinery, notably in sectors like food processing, chemicals, and sugar production [8-9]. Waste energy, often referred to as surplus or unused energy; represent a significant untapped resource across various sectors [10]. In the context of industrial processes, waste energy is generated when energy inputs exceed the requirements of a particular task. The potential for waste energy recovery lies in capturing this surplus energy and re-purposing it for other applications, thus enhancing overall energy efficiency [11].

Waste energy recovery offers a solution by identifying opportunities to reclaim and repurpose otherwise lost energy [12-14]. One of the key strategies for waste energy recovery in industrial settings is the utilization of waste heat recovery



Figure 1 Battery of centrifugal Machine

technologies [13]. These technologies are designed to capture heat energy produced as a byproduct of various processes and convert it into usable energy forms, such as electricity or steam. Common waste heat recovery technologies include Organic Rankine Cycle (ORC) systems, thermoelectric generators, and heat exchangers [13, 15].

Batch centrifugal machine refers to a type of equipment used for separating materials or fluids based on density or particle size by rotating them in a cylindrical container [16]. These machines are commonly used in various industries such as pharmaceuticals, food processing, and chemical manufacturing. The waste heat generated by a batch centrifugal machine can be managed efficiently, possibly through innovative techniques or practices, using a real-world case study as a basis for discussion and analysis [17]. Batch centrifugal machines are pivotal in various industries, facilitating the separation and processing of solid-liquid mixtures, as seen in sugar processing and pharmaceuticals [12, 18-19]. These machines operate by swiftly rotating materials within a drum, segregating denser substances towards the drum's periphery while retaining lighter components at the center [2, 16, 20]

The operation of batch centrifugal machines requires a substantial amount of energy, primarily in the form of electricity. The energy consumption of these machines is influenced by several factors, including the rotational speed, the duration of operation, and the physical properties of the materials being processed [21]. The mechanical components of the machine, such as the motor and bearings, also contribute to energy usage. Energy consumption in batch centrifugal machines can be categorized into two main components: energy used

in maintaining the rotational speed and energy expended in the separation process. It is essential to distinguish between these components as they represent different opportunities for waste energy recovery [22]. Several studies have explored waste energy recovery in manufacturing and industrial processes. Researches has shown that industrial settings are particularly amenable to the implementation of waste energy recovery strategies due to the large quantities of energy involved in their operations [11, 23]. These studies focused on diverse industries, including steel manufacturing, chemicals, and cement production, highlighting the potential for cost savings and environmental benefits.

Waste energy recovery promises immediate economic benefits by enhancing manufacturing cost-effectiveness through reduced energy consumption and operational expenses [23-25]. Beyond economic advantages, waste energy recovery aligns with environmental sustainability goals by curbing carbon emissions and promoting cleaner industrial practices [26-27]. The pursuit of waste energy recovery stimulates technological innovation, fostering the development and adoption of energy-efficient technologies within industrial settings [28-30].

This present study aims at addressing energy consumption challenges associated with batch centrifugal machines through two primary objectives: The study seeks to quantify the energy consumption patterns of batch centrifugal machines, providing insights into their energy demands during operation. Additionally, the research aims at pinpoint areas of energy inefficiency inherent in batch centrifugal machine processes, including excess energy utilization and instances of energy .



## 2. Methodology

### 2.1 Research Approach

The objective of this study is to address the issue of energy inefficiency in batch centrifugal machines by exploring the potential for waste heat recovery. This study adopts a mixed-methods research approach, integrating both quantitative and qualitative methodologies. This combination allows for a comprehensive evaluation of energy consumption patterns and a thorough exploration of factors contributing to energy wastage in the batch centrifugal machine under investigation.

### 2.2 Data Collection

To assess energy consumption, primary data collection involves the installation of energy meters on the batch centrifugal machine. These meters capture real-time data on energy consumption, including voltage, current, and power usage during machine operation. Data was collected over an extended period to account for variations in energy consumption due to operational factors such as batch size and processing speed.

### 2.3 Data Collection Methodology

The comprehensive data collection methodology spanned six months to ensure a representative sample of machine operation. Continuous data collection captured variations in operational parameters, energy consumption, and waste heat generation. Meticulous instrumentation involved strategic placement of temperature sensors and installation of sophisticated energy meters and data loggers. Preliminary screening identified anomalies before statistical analysis identified trends, patterns, and correlations in the datasets.

Capacity of the electric motor used is a 3-phase electric motor. It is a variable speed electric motor with a capacity of 185kw.

The power of the rotating speed while on operation is calculated as follows:

$$P = IV \cos \Theta \sqrt{3} \quad (1)$$

Where,

P = power of the rotating speed

I = current (amperes)

V = Voltage (volts)

Cos  $\Theta$  = Power factor (0.85)

The voltage while on operation is constant, with a value of 415volts.

To calculate for the current:

$$I = \frac{P}{V \sqrt{3 \cos \Theta}} \quad (2)$$

During the centrifugal machine's operation, it undergoes four distinct speed stages: Low speed, medium speed, maximum spin speed and very low speed.

Initially, the centrifuge accelerates to a low speed, where the butterfly feed control valve and a flap valve open, enabling product flow down a feeding chute onto a flinger disc connected to the spindle. This action propels the product onto the inner wall of the basket, where it forms a uniform layer under centrifugal force. Liquor begins to flow out through the filtering screens and basket perforations, collected in the outer casing and discharged via pipe work beneath the machine. The Product thickness inside the basket increases until the feed detector triggers, and prompting the closure of the feed control valve. Water is sprayed inside the feed chute, followed by closure of the flap valve to prevent residual dark product from dripping onto the contents of the basket. The feeding rate depends on the degree to which the feed valve opens, which can be controlled manually or automatically.

After completing feeding, the centrifuge accelerates to a medium speed hold point, awaiting operator or sequence permission to proceed. Subsequently, it accelerates to its maximum spin speed. During this phase, liquor continues to purge from the product cake, and water and steam may be applied to remove any remaining mother liquor from the crystals. Runoff liquor purity increases, and a classification valve system may direct this liquor down a separate discharge pipe. The centrifuge pauses at spin speed for a preset time to achieve the desired level of crystal cake drying.

Upon completing spinning, the centrifuge decelerates to a very low speed. A discharge valve plate beneath the basket opens, and a plough blade cuts into the cake's top, slowly moving down the basket screens to discharge dried crystals through the basket bottom and down a chute onto a conveyor beneath the casing. The plough blade returns to its original position, the discharge valve closes, and the machine accelerates to feed speed to commence another cycle. During acceleration, the filtering screens may be sprayed with a small amount of water to prevent crystal clogging.

## 2.4 Data Analysis

Quantitative data collected through energy meters undergo analysis using SPSS version 21 and Microsoft Excel. Descriptive statistics was used to summarize energy consumption patterns, including mean usage, peak usage, and temporal variations, providing a quantitative overview of energy consumption characteristics.

The waste heat recovery discusses strategies and methods for effectively managing waste heat generated by a batch centrifugal machine. This indicates the focus of the study on finding ways to optimize the handling of waste heat. This involves techniques to reduce heat loss, improve energy efficiency, or repurpose waste heat for other useful purposes.

The data collected were analysed statistically. The data were gotten in the operation of one cycle. The normal spinning time for one cycle is between 25-40 seconds.

This is dependent on the brix level of the massecuite's.

## 3.Result and Discussion

Table 1 presents a comparison of power consumption relative to current across different speed settings of the centrifugal machine. The table offers valuable insights into the relationship between power consumption and current across different speed settings of the centrifugal machine, which can inform decisions regarding energy efficiency, optimization, and operational performance of the equipment.

Table 1 shows the consistency and variation: across different speed settings, there's noticeable consistency in power-to-current ratios. For example, at the maximum spin speed setting, the power-to-current ratio remains constant at 185/300 across all entries. By comparing ratios within each column, fluctuations or trends was observed in power consumption relative to current at different speed settings. For instance, there might be variations in efficiency or energy consumption efficiency between different speed settings. This energy consumption represents a significant portion of the operational costs for sugar mills [21].

Table 1 reveals lower power-to-current ratios may suggest higher efficiency, indicating that the machine is utilizing less power for a given current, which could be desirable from an energy-saving perspective. The study further shows that there is repeatability or consistency in power consumption for similar current inputs such as 42/80" and 45/80 in the low-speed. High energy consumption contributes to increased carbon emissions, underscoring the need for more sustainable practices [31]. Waste energy recovery in batch centrifugal machines aligns with sustainability goals by reducing the environmental footprint of sugar processing [23].

Table 2 provides a detailed comparison of different modes of rotation based on the time taken for specific operations at various speeds, offering insights into the efficiency and suitability of each mode for different tasks.

Table 1. Reading of the Power required for the rotational speed of the centrifugal machine during separation operation.

| S/N | Low Speed |         | Medium Speed |         | Maximum Spin Speed |         | Very Low Slow |         |
|-----|-----------|---------|--------------|---------|--------------------|---------|---------------|---------|
|     | Power     | current | Power        | current | Power              | current | Power/        | current |
| 1   | 40        | 80      | 90           | 150     | 185                | 300     | 40            | 60      |
| 2   | 42        | 80      | 87           | 160     | 185                | 300     | 43            | /65     |
| 3   | 45        | 80      | 88           | 150     | 185                | 300     | 45            | 68      |
| 4   | 50        | 78      | 85           | 150     | 185                | 300     | 45            | 65      |
| 5   | 45        | 80      | 87           | 150     | 185                | 300     | 50            | 70      |
| 6   | 42        | 80      | 87           | 160     | 185                | 300     | 43            | 65      |
| 7   | 42        | 80      | 87           | 160     | 185                | 300     | 43            | 65      |
| 8   | 40        | 80      | 90           | 150     | 185                | 300     | 40            | 60      |
| 9   | 45        | 80      | 87           | 150     | 185                | 300     | 50            | 70      |
| 10  | 50        | 78      | 85           | 150     | 185                | 300     | 45            | 65      |



Table 2 Reading of the rotational speed of the centrifugal machine during separation operation.

| S/N | Low Speed |      | Medium Speed |      | Maximum spin Speed |      | Very Low Speed |      |
|-----|-----------|------|--------------|------|--------------------|------|----------------|------|
|     | Speed     | Time | Speed        | Time | Speed              | Time | Speed          | Time |
| 1   | 450       | 27.9 | 450          | 10.0 | 1000               | 40.0 | 450            | 24.3 |
| 2   | 450       | 28.2 | 450          | 8.0  | 1000               | 40.0 | 450            | 24.3 |
| 3   | 450       | 28.1 | 450          | 7.98 | 1000               | 39.5 | 450            | 23.9 |
| 4   | 450       | 29.0 | 450          | 7.90 | 1000               | 39.8 | 450            | 23.4 |
| 5   | 450       | 28.0 | 450          | 8.0  | 1000               | 40.0 | 450            | 24.3 |
| 6   | 450       | 29.1 | 450          | 7.98 | 1000               | 39.7 | 450            | 23.4 |
| 7   | 450       | 29.0 | 450          | 7.92 | 1000               | 40.0 | 450            | 24.2 |
| 8   | 450       | 28.1 | 450          | 7.97 | 1000               | 40.0 | 450            | 24.0 |
| 9   | 450       | 28.3 | 450          | 9.90 | 1000               | 40.0 | 450            | 24.3 |
| 10  | 450       | 27.9 | 450          | 10.0 | 1000               | 40.0 | 450            | 24.3 |

Table 3. Calculation of the average energy (ten cycles) used in maintaining the rotational speed of a Centrifugal machine during separation operation.

| S/N | Mode of rotation   | Power (KW) | Speed (RPM) | Current (AMP) | Time (sec) | Voltage (Volt) |
|-----|--------------------|------------|-------------|---------------|------------|----------------|
| 1   | Low Speed          | 44.1       | 450         | 79.8          | 25.57      | 415            |
| 2   | Medium Speed       | 87.3       | 450         | 152           | 8.51       | 415            |
| 3   | Maximum Spin Speed | 185        | 1000        | 3000          | 39.9       | 415            |
| 4   | Very Low Speed     | 44.4       | 450         | 65.6          | 23.94      | 415            |

The study shows the consistency in speed/time ratios across different trials for each mode of rotation, relatively consistent speed/time ratios was observed. For instance, in the low speed mode, the speed varies around 450 RPM, and the time taken ranges from approximately 27.9 to 29.1 seconds.

The comparison across modes was that low speed operation was consistently taken around 28 seconds and medium speed operation is faster, consistently taking around 8 seconds. Maximum spin speed was consistently takes 40 seconds, indicating a longer but consistent duration, while very low speed shows similar with consistent operation takes around 24 seconds.

The study observed that maximum spin speed mode consistently takes the longest time, indicating that it might be optimized for thorough or heavy-duty operations while the medium speed mode consistently takes the shortest time, possibly indicating a mode optimized for faster but less thorough operations. The low speed and very low speed modes have similar time duration, but very low speed might indicate an even slower setting suitable for delicate operations. The speed remains relatively consistent within each mode across

different trials, indicating stable performance within each setting.

Table 3 provides a comparison of different modes of rotation based on power consumption, speed, current draw, duration, and operating voltage. The maximum spin speed mode was designed for heavy-duty operations, consuming the most power and drawing the highest current, while the medium speed mode is more energy-efficient but operates for shorter duration.

From the table 3, the machine is changing phase from slow speed to medium speed; it is observed that all the parameters from power to time are accelerating. The maximum spin speed mode consumes the highest power at 185kw, followed by medium speed" at 87.3kw. Low speed and very low speed modes consume relatively lower power. Similarly, maximum spin speed naturally has the highest RPM at 1000, while the other modes maintain a consistent 450 RPM while the maximum spin speed again stands out with the highest current draw at 3000 AMPs. Medium speed has the second-highest current draw at 152AMPs.

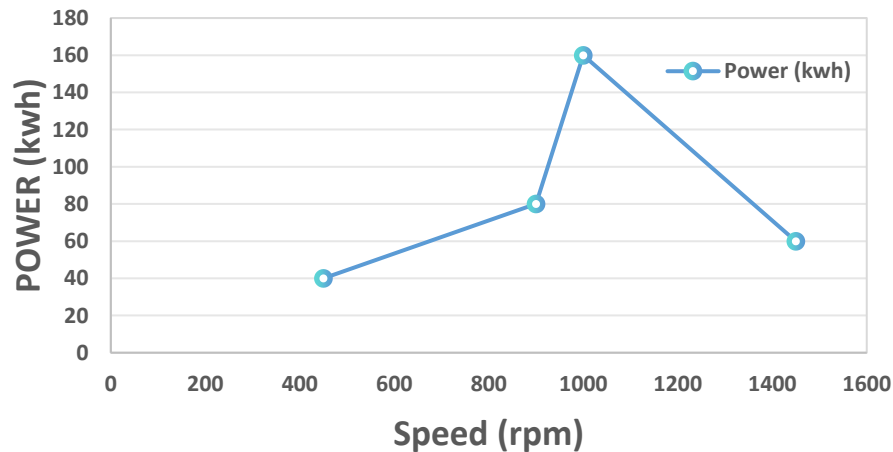


Figure 2. A graph of power against Speed

The medium speed has the shortest duration of operation at 8.51 seconds, while "Maximum Spin Speed" has the longest at 39.9 seconds and all the modes operate at the same voltage of 415 Volts. Waste energy recovery in batch centrifugal machines can be applied to similar machinery in different sectors, enhancing the broader understanding of energy-efficient manufacturing practices [32].

The figure 2 illustrates the energy consumption trends of the batch centrifugal machine across multiple operational runs. The x-axis denotes speed (rpm), while the y-axis represents energy consumption (kWh). Each line corresponds to a distinct operational run (labeled 1 to 4). The graph reveals a noticeable upward trajectory in energy consumption with increasing operational speed and duration. Particularly noteworthy is Run 3, characterized by the longest duration and highest speed, which exhibits the highest energy consumption. This preliminary visual representation serves as a reference for comprehending the variations in energy consumption during different operational runs. Analysis of the collected data unveiled distinct energy consumption patterns for each run, mirroring the observed upward trend in energy consumption over time. Longer operational duration correspond to higher energy consumption, reaffirming the intuitive correlation between operational duration and energy usage.

#### 4. Conclusion

This study has shed light on the substantial potential for waste heat recovery in batch Through centrifugal machines within industrial processes. comprehensive analysis, we have identified the significant energy consumption and waste heat

generation associated with these machines, highlighting the urgency for implementing effective recovery strategies.

Our investigation into various waste heat recovery methods has demonstrated their feasibility and efficiency, providing valuable insights into practical approaches for reclaiming and reusing heat energy. Moreover, the assessment of potential energy savings and environmental benefits has underscored the importance of integrating waste heat recovery systems into batch centrifugal processes. By providing practical recommendations for industries to optimize their energy use through waste heat recovery, this study offers tangible solutions for enhancing both energy efficiency and sustainability. It is evident that the implementation of waste heat recovery technologies holds immense promise in mitigating energy wastage and reducing environmental impact. The findings of this study emphasize the crucial role of waste heat recovery in driving towards a more sustainable future for industrial operations involving batch centrifugal machines.

Based on the findings of this study, the following recommendations are proposed to optimize energy efficiency and promote sustainability in industrial processes involving batch centrifugal machines: prioritize the installation of waste heat recovery systems such as heat exchangers and thermal storage systems; invest in energy-efficient equipment with built-in waste heat recovery mechanisms; optimize operating parameters like temperature, pressure, and cycle times; provide training programs to raise awareness among operators and maintenance staff about waste heat recovery and energy conservation; collaborate with energy management consultants, researchers, and technology providers to explore innovative



establish monitoring systems to track energy consumption, waste heat recovery rates, and process efficiency; and engage in industry partnerships and collaborative research projects to share knowledge and best practices. By implementing these recommendations, industries can maximize the potential of waste heat recovery in batch centrifugal processes, contributing to enhanced energy efficiency, cost savings, and environmental stewardship.

## 5. References

- [1] Brough D, Jouhara H. The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. *Int J Thermofluids*. 2020;1:100007.
- [2] Mittal A, Rakshit D. Utilization of cement rotary kiln waste heat for calcination of phosphogypsum. *Therm Sci Eng Prog*. 2020;20:100729.
- [3] Wang JA, Song ZP, Wei YW, Yang GH. Combination of waste-heat-recovery heat pump and auxiliary solar-energy heat supply priority for tobacco curing. *Appl Ecol Environ Res*. 2017;15(4).
- [4] Lei Z, Xie H. Active regulation of battery charge-sustaining in ECMS: Application in energy management for engine waste heat recovery system. *Int J Automot Technol*. 2016;17:1055-65.
- [5] Patel SK, Gupta AK, Bade MH. Primary energy and exergy analysis of a spray dryer for the application of industrial effluents: a case study. *Braz J Chem Eng*. 2022;39(1):251-72.
- [6] Debler S, Berthou M, Aubry R, Palm S. The factory of the future: two case studies to illustrate the role of energy in two industrial sectors. In: *Proceedings of Ecos 2015-The 28th International Conference*; 2015.
- [7] Mac Dougall J. *Bioelectrochemical Integration of Waste Heat Recovery, Waste-to-Energy Conversion, and Waste-to-Chemical Conversion with Industrial Gas and Chemical Manufacturing Processes*. Allentown, PA: Air Products and Chemicals, Inc.; 2016 Feb 5.
- [8] González-García S, Morales PC, Gullón B. Estimating the environmental impacts of a brewery waste-based biorefinery: Bio-ethanol and xylooligosaccharides joint production case study. *Industrial Crops and Products*. 2018 Nov 1;123:331-40.
- [9] Carvajal-Mariscal I, De León-Ruiz JE, Belman-Flores JM, Salazar-Huerta A. Experimental evaluation of a thermosyphon-based waste-heat recovery and reintegration device: A case study on low-temperature process heat from a microbrewery plant. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022 Feb 1;49:101760.
- [10] Ben-Iwo J, Manovic V, Longhurst P. Biomass resources and biofuels potential for the production of transportation fuels in Nigeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016 Sep 1;63:172-92.
- [11] Ononogbo C, Nwosu EC, Nwakuba NR, Nwaji GN, Nwufu OC, Chukwuezie OC, Chukwu MM, Anyanwu EE. Opportunities of waste heat recovery from various sources: Review of technologies and implementation. *Heliyon*. 2023 Feb 1;9 (2).
- [12] Law R, Harvey A, Reay D. A knowledge-based system for low-grade waste heat recovery in the process industries. *Applied Thermal Engineering*. 2016 Feb 5;94:590-9.
- [13] Jouhara H, Khordehgah N, Almahmoud S, Delpech B, Chauhan A, Tassou SA. Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2018 Jun 1;6:268-89.
- [14] Vasta S. Adsorption Air-Conditioning for Automotive Applications: A Critical Review. *Energies*. 2023 Jul 14;16(14):5382.
- [15] Xing C, Ping X, Guo R, Zhang H, Yang F, Yu M, et al. Machine learning-based multi-objective optimization and thermodynamic evaluation of organic Rankine cycle (ORC) system for vehicle engine under road condition. *Applied Thermal Engineering*. 2023 Aug 1;231:120904.
- [16] Gleiss M, Hammerich S, Kespe M, Nirschl H. Development of a dynamic process model for the mechanical fluid separation in decanter centrifuges. *Chemical Engineering & Technology*. 2018 Jan;41(1):19-26.
- [17] Deng K, Zhang F, Tan Q, Huang Y, Song W, Rong Z, et al. WaveICA: A novel algorithm to remove batch effects for large-scale untargeted metabolomics data based on wavelet analysis. *Analytica Chimica Acta*. 2019 Jul 11;1061:60-9.
- [18] Menesklou P, Nirschl H, Gleiss M. Dewatering of finely dispersed calcium carbonate-water slurries in decanter centrifuges: About modelling of a dynamic simulation tool. *Separation and Purification Technology*. 2020 Nov 15;251:117287.



- [19] Menesklou P, Nirschl H, Gleiss M. Dewatering of finely dispersed calcium carbonate-water slurries in decanter centrifuges: About modelling of a dynamic simulation tool. *Separation and Purification Technology*. 2020 Nov 15;251:117287.
- [20] Nota G, Nota FD, Peluso D, Toro Lazo A. Energy efficiency in Industry 4.0: The case of batch production processes. *Sustainability*. 2020 Aug 17;12(16):6631.
- [21] Ahmad T, Zhang D. A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. *Energy Reports*. 2020 Nov 1;6:1973-91.
- [22] Woolley E, Luo Y, Simeone A. Industrial waste heat recovery: A systematic approach. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2018 Oct 1;29:50-9.
- [23] Brückner S, Liu S, Miró L, Radspieler M, Cabeza LF, Lävemann E. Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. *Applied Energy*. 2015 Aug 1;151:157-67.
- [24] Oluleye G, Jobson M, Smith R, Perry SJ. Evaluating the potential of process sites for waste heat recovery. *Applied Energy*. 2016 Jan 1;161:627-46.
- [25] Poerner M, Rimpel A. Waste heat recovery. In: *Fundamentals and Applications of Supercritical Carbon Dioxide (sCO<sub>2</sub>) Based Power Cycles*. Woodhead Publishing; 2017 Jan 1. p. 255-67.
- [26] Farhat O, Faraj J, Hachem F, Castelain C, Khaled M. A recent review on waste heat recovery methodologies and applications: Comprehensive review, critical analysis and potential recommendations. *Cleaner Engineering and Technology*. 2022 Feb 1;6:100387.
- [27] Zhu S, Zhang K, Deng K. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020 Mar 1;120:109611.
- [28] Perone C, Romaniello R, Leone A, Berardi A, Tamborrino A. Towards energy efficient scheduling in the olive oil extraction industry: Comparative assessment of energy consumption in two management models. *Energy Conversion and Management: X*. 2022 Dec 1;16:100287.
- [29] Patel AK. Advancements in heat exchanger design for waste heat recovery in industrial processes. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2023;19(3):137-52.
- [30] Rodrigues GS, Ferreira JC, Rocha CR. A novel method for analysis and optimization of electric energy consumption in manufacturing processes. *Procedia Manufacturing*. 2018 Jan 1;17:1073-81.
- [31] Xia T, An X, Yang H, Jiang Y, Xu Y, Zheng M, Pan E. Efficient energy use in manufacturing systems—Modeling, assessment, and management strategy. *Energies*. 2023 Jan 19;16(3):1095.



# Estimating the Length of Right-Turn and U-Turn Pocket Lane Using Binomial Distribution

Chakrit Choovuthayakorn<sup>1</sup>, Tana Noiruean<sup>1\*</sup>, and Noppakun Boongrapue<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering,  
Rajamangala University of Technology Lanna

128 Huay Kaew Road, Mueang, Chiang Mai, Thailand, 50300

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University  
169 Long-Hard Bangsaen Beach Road, Mueang, Chonburi, Thailand, 20131

\*Corresponding Author: tanatop@rmutl.ac.th. Phone Number: 08-2185-7460

Received: 4 August 2024, Revised: 28 September 2024, Accepted: 18 October 2024

## Abstract

Delays at U-turns and signalized intersections often occur due to insufficient right turns and U-turn pockets. It is significant to assess and determine the lengths of the pocket lane for right turns and U-turns to improve vehicle efficiency in the area. The right-turn and U-turn pocket designs are based on a binomial distribution and comply with the standards of the DOH of Thailand. Research demonstrates that the flow becomes congested and optimized of right-turn and U-turn pockets, which vary with the volume of turning vehicles. Once the lane does not lack the capacity of a pocket lane, the flow rate of vehicles in both directions decreases, but the flow for right turns and U-turns increases. Therefore, determining the appropriate turn pocket can boost the flow rate and reduce travel delays in those areas.

**Keywords:** Binomial distribution, Right turn pocket, U-turn pocket and Queue.

## 1. Introduction

Designing sufficient routes and traffic lanes for highway movement needs, which ensures safety, convenience, and reduced travel time, can help alleviate traffic congestion and potential highway accidents. Certain areas of arterial roads often encounter deficiencies due to various causes, especially in U-turn areas and intersections without traffic signals. These locations, where the traffic volume requiring right turns or U-turns is high, tend to create bottlenecks in the traffic flow. This issue arises when the number of vehicles waiting to turn exceeds the capacity of the pocket lane. Hence, the appropriate length of the turning lane impacts the traffic conditions in the same and opposite directions. Studying the physical factors affecting the saturation flow rate in U-turn areas, accessible from interference from opposing traffic, shows the highest values when traffic officers control the movement [1]. Many provinces in Thailand experience high traffic volumes and several problematic U-turn areas. Therefore, evaluating and proposing solutions and designing turning lanes in these areas is crucial. This research applies binomial

distribution to analyze and predict the opportunity of events where the number of vehicles waiting to turn exceeds the pocket lane capacity, obstructing the main traffic flow. The objective is to determine the appropriate length of the right-turn lane for the specific traffic volume. The study references the U-turn standards the Department of Highways (DOH) set in Thailand. Field surveys and data collection include physical characteristics, peak-hour traffic volumes, and saturation flow in U-turn areas and signalized intersections. The study focuses on case study areas on significant roads in Chiang Mai province, Thailand, selecting three U-turn areas and three signalized intersections. These areas were chosen and analyzed based on projected increases in future traffic volumes. The results of this study serve as guidelines for designing and improving solutions to address high-traffic density issues in certain areas.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 Traffic

Traffic consists of three main components [2].

**Road Users:** This is the most important aspect of traffic, encompassing drivers, passengers, and



pedestrians. Their road usage behavior varies according to different factors.

**Vehicles:** Key characteristics for design include size, type, and power. The design often considers the most significant vehicles that frequently use the road or have specific features.

**Road:** Safety principles and design rely on data from surveys and statistics. Important data include traffic information, physical characteristics, and socio-economic factors.

## 2.2 Saturation flow

The measurement of the performance or capacity of an intersection or a specific direction of movement is a systematic process. It is the highest stable traffic volume passing through a designated reference line [2]. Data collection, which requires at least eight vehicles in the queue and a minimum of 15 cycles, is carried out with a systematic approach to ensure the reliability of the results. The measurement of saturation flow begins when the front wheel or reference part of the fourth vehicle in the queue passes the designated reference line and continues until the front wheel or reference part of the last vehicle passes the designated reference line during the effective period. The value can be calculated using Equation (1).

$$S = \frac{3,600}{H_s} \quad (1)$$

Where:  $S$  = Saturation flow rate (veh/hr)

$H_s$  = Average headway during saturation flow (Seconds)

## 2.3 Median

A median is used on roads with four or more lanes to separate traffic directions, especially in urban areas [3]. It serves various purposes, such as providing space for turning lanes, U-turn exits at intersections, or deceleration lanes before entering straight paths. Medians also offer waiting areas for pedestrians, space for installing safety equipment, and underground utilities, and can act as a base for elevated roads or pedestrian overpasses. Additionally, they reserve space for future lane expansions. There are four types of medians: Flush and Painted medians, Raised medians, Depressed medians, and Barrier medians.

## 2.4 U-turn area standards

U-turn areas are a crucial component of the road system. The standards set by the relevant

highway authorities in Thailand are based on the standard drawing for highway design and construction 2015 revision (Edition 2018) [4]. These standards, which include a minimum requirement for deceleration, vehicle storage, and U-turn opening of 70, 100, and 24 meters, respectively.

## 2.5 Binomial distribution

The binomial distribution is a probability distribution of random, denoted by  $X$ , the number of successes in a sequence of  $n$  ( $\geq 1$ ) independent trials of an experiment, and assumes that each trial results in a success or a failure with respective probabilities  $p$  ( $0 < p < 1$ ) and  $q = 1 - p$ . The random variable  $X$  is said to have the binomial distribution with parameters  $n$  and  $p$ , denoted by  $B(n, p)$ . The variable  $P$  is probability of  $X$ . The probability mass function  $f(x)$  of  $X$  is given by equation (2) [5].

$$f(x) = P(X = x) = \binom{n}{x} p^x q^{n-x}, \quad x = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

Where  $\binom{n}{x} = \frac{n!}{x!(n-x)!}$  for  $0 \leq x \leq n$  and 0 otherwise.

Consider a scenario in which a set contains 100 jobs, comprising 80 high-quality jobs and 20 defective jobs. When selecting a sample, there exists a probability of drawing both high-quality and defective jobs. Additionally, there is a possibility of selecting only high-quality jobs or only defective jobs, depending on the sampling process from 1 to  $n$ .

## 2.6 Related research

Use the Markov process to analyze the lane-changing behavior of vehicles approaching U-turns and median openings. It presents field data on vehicular distribution, probabilities of lane changing, and the application of probability matrices to predict lane-changing patterns. The study finds that lane-changing behavior varies with U-turn volumes and traffic conditions, with the Markov process accurately predicting these behaviors compared to field observations [6]. Studying the U-turn area and intersections has resulted in a probabilistic modeling approach to estimate the capacity of signalized intersections with short right-turn lanes. Factors such as the number of vehicles in the right-turn lane, the proportion of through vehicles, and the average number of vehicles in the lane are considered in the model. The capacity calculations are based on discharge rates of queues in different lane sections. The study validates



the model using traffic simulation and highlights the benefits of short right-turn lanes in enhancing intersection capacity compared to shared through/right lanes [7]. The study evaluated traffic simulation models' accuracy and time cost for estimating left-turn queue storage lengths at intersections. SimTraffic was identified as the most accurate model for left-turn queue length estimation, while VISSIM was not recommended due to lower accuracy and longer simulation time. Recommendations were made to use SimTraffic for accurate estimates and to avoid VISSIM for this purpose. A simulation-based method was developed for left-turn deceleration length estimation, aligning with TxDOT guidelines. The study aimed to provide a procedure for estimating the total design length of left-turn lanes based on peak and off-peak traffic conditions [8]. The study analyzed traffic dynamics at a U-turn section on an urban arterial road during morning and evening peak hours. It found that traffic capacity and speed decreased during breakdown events, with morning peak observations experiencing a more significant drop than evening peak observations. The study suggested adding a 50m pocket lane as a potential solution to improve traffic flow, with simulation models showing promising results in reducing delays and increasing speed [9].

Thailand has a study on U-turn traffic in the right lane at traffic light intersections. Using the equivalent value of a personal car, analyze the position of the waiting line that affects the average departure time of the vehicles. The relationship between the ratio of turns and the average departure time The time away from the vehicle is saturated from starting at the intersection, and the equivalent value is that a private car turns right [10]. Factors affecting U-turn behavior: There is a non-signalized area when waiting for the U-turn area. It was found that the size of the gap between the vehicle on the main road and the position of the oncoming lane affected the driving style, but the waiting time did not affect the U-turn [11]. The flow is saturated in the reversing area with different physical characteristics, which is the most free from interference from the opposing vehicle when there is a controlling officer [1]. Research discusses assessing road safety at U-turn locations on highways in Thailand. Various conflicts, severity indicators, and safety measures were analyzed to understand and improve road safety. The studies

emphasized the importance of consistent design characteristics of road infrastructure and the use of objective methods for measuring conflict severity to enhance safety at U-turn locations [12].

Various studies and reports on road safety and traffic accidents in Sub-Saharan Africa reveal several essential factors. These include road usage behavior, the positioning and use of child restraints, statistical modeling of traffic accidents, regional economic conditions, the impact of post-crash care on road mortality, and the effects of road speed and curvature on traffic casualties. The studies delve into the influence of factors such as GDP per capita, demographic variables, safe driving behavior, health infrastructure, and road network size on traffic fatalities in Sub-Saharan African countries from 2001 to 2010. The recommendations stemming from these findings include enhancing the enforcement of seat belt laws, introducing random breath testing, improving access to medical care, and launching road safety campaigns to curb road accidents in the region [13]. Various advanced statistical models are used to predict traffic crash severity and vehicle damage at intersections and highway locations. Researchers compared the Multivariate Poisson-Lognormal model and the Joint Negative Binomial- Generalized Ordered Probit Fractional Split model to improve crash prediction accuracy. A result is that considering correlations among crash severity levels and using vehicle damage as an alternative to injury severity can enhance the reliability of crash prediction models [14]. Conducted in Tainan, Taiwan, urban areas, focused on analyzing pedestrian-vehicle collision incidents using binomial distribution models. Factors such as land use, traffic conditions, and pedestrian-vehicle interactions were considered in the analysis. The results highlighted the impact of variables like road infrastructure, retail activities, and commercial activities on the frequency of pedestrian-vehicle encounters, with arterial roads posing higher risks despite having fewer incidents [15].

### 2.7 Research Methods

This study gathered physical data on the saturation flow of right-turn pocket lanes at U-turn and signalized intersection locations and vehicle volumes during peak hours. Binomial distribution was utilized to forecast instances where the number of vehicles in the queue exceeded the capacity of the right-turn pocket lane, leading to obstruction of the

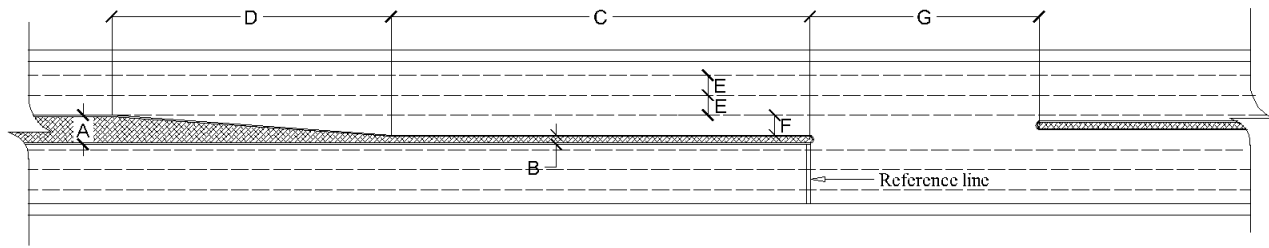


Figure 1 Data collection of physical characteristics of the right turn and U-turn area

main traffic flow. The selection criteria for data collection areas included U-turn points and signalized intersections with vehicle volumes that surpassed the capacity of the right-turn waiting lane. The study obtained data from three U-turn points and three signalized intersections, totaling six areas. The physical characteristics data are presented in Figure 1. Saturation flow and traffic volume data were collected during peak traffic periods: 6 hours daily, from 7:00 am to 10:00 am and 3:00 pm to 6:00 pm on regular working days.

The measurement of saturation flow starts when a vehicle begins moving from the U-turn area to the designated reference line. Data collection requires at least eight vehicles in the queue for one survey cycle. The reference line is shown in Figure 1. During each cycle, the number of vehicles exceeding the capacity of the right-turn pocket lane is counted. Motorcycles are not considered due to their unpredictable movement and minimal impact on the length of the waiting lane.

### 2.8 Application of Binomial distribution

The analysis of U-turn areas and signalized intersections, applying binomial distribution, is a comprehensive approach to predicting traffic conditions and determining the appropriate length of right-turn and U-turn pocket lanes. We calculated the volume of vehicles making U-turns as a percentage of the total vehicle volume passing through the surveyed area, and recorded the maximum number of vehicles in the queue. If the probability of the event occurring exceeded 5%, the length of the right-turn and U-turn pocket lanes should be increased. The probability of VEPOM - the vehicles exceeding the capacity of the turning lane and obstructing the traffic flow in the through lane is  $X$  in equation (2) - was calculated, considering the volume of vehicles in the queue and the proportion of vehicles needing to turn right

or make U-turns. The analysis aimed to match the cumulative percentage as closely as possible to the most significant considered percentage without exceeding it, ensuring a thorough understanding of the traffic conditions. The results, presented in charts and tables, are comprehensive guidelines for designing the length of future right-turn and U-turn waiting lanes. Data analysis used current and future vehicle volumes to estimate OVEPOM - the opportunity for vehicles to exceed the capacity of the turning lane (distance  $C$  in Figure 1), obstructing the traffic flow in the through lane-. The results were compared with the Department of Highways (DOH) standards in Thailand to ensure consistency with local traffic volumes. To determine the length of a pocket lane using the binomial distribution, follow these general steps:

#### 1. Define the Variables:

$n$  = Maximum number of vehicles in the queue (based on survey data).

$p$  = Proportion of vehicles turning right or making U-turns.

Capacity = Maximum number of vehicles that can fit in the waiting lane.

2. Calculate the expected overflow: Use the binomial distribution formula to estimate the probability of overflow. The binomial distribution is defined as equation (2).

Where:  $X$  = Number of vehicles exceeding the pocket lane capacity.

$x$  = Number of vehicles exceeding the capacity.

$\binom{n}{x}$  = Binomial coefficient.

3. Determine the probability of overflow: To find the probability that the number of vehicles exceeds the pocket lane capacity, sum the probabilities of having  $x$  vehicles exceeding the capacity for different values of  $x$ , equation (3).



$$P(X \geq \text{Capacity}) = \sum_{x=\text{Capacity}}^n P(X=x) \quad (3)$$

4. Calculate the length of the waiting lane: Adjust the length of the pocket lane to ensure that the probability of exceeding its capacity is within an acceptable range (e.g., less than 5%).

Use the following approach:

- Estimate the required length based on the proportion  $p$  and the maximum number  $n$ .
- Ensure that the length can accommodate the maximum number of vehicles expected to queue.

Example calculation, assume:

- Maximum number of vehicles in the queue ( $n$ ) = 10 vehicles
- Proportion of vehicles turning right or making U-turns ( $p$ ) = 0.10
- Desired capacity of pocket lane = 3 vehicles
  - Calculate the probability of having more than 3 vehicles in the queue, equation (4).

$$P(X \geq 3) = \sum_{x=3}^{10} \binom{10}{x} (0.10)^x (0.90)^{10-x} \quad (4)$$

- Adjust the length of the pocket lane so that this probability is less than or equal to 5%.

This approach allows you to estimate the length required for the pocket lane to handle the expected vehicle volumes and ensure effective traffic flow.

### 3. Results and Discussion

This section presents the survey results from case study areas, consisting of three straight U-turn areas and three signalized intersections. The aim was to determine the saturation flow rates, the volume of vehicles making U-turns or right turns, and the total volume of vehicles through the survey areas from a maximum of one direction. The data was used to evaluate the appropriate length of pocket lanes. The binomial distribution was applied to estimate the OVEPOM of the right-turn or U-turn pocket lanes. The study also considered various proportions of turning traffic compared to the total traffic volume through the survey areas.

#### 3.1 Physical characteristics

The location areas of the physical characteristics and traffic surveys for U-turn points and signalized intersections are as follows:

U-Turn Area 1: On Chiang Mai-Doi Saket Road (outbound), Mueang District, Chiang Mai (at coordinate 18°48'22.1"N, 99°01'18.2"E).

U-Turn Area 2: No Chiang Mai-Doi Saket Road (inbound), Mueang District, Chiang Mai (at coordinate 18°48'22.1"N, 99°01'18.2"E).

U-Turn Area 3: On Mahidol Road, Mueang District, Chiang Mai (at coordinate 18°46'19.0" N, 98°58'10.9"E).

Signalized Intersection 1: On Chiang Mai-Doi Saket Road, San Sai District, Chiang Mai (at coordinate 18°48'40.2"N, 99°01'42.7"E).

Signalized Intersection 2: On Chiang Mai-Hang Dong Road, Hang Dong District, Chiang Mai (at coordinate 18°45'34.8"N, 98°58'15.6"E).

Signalized Intersection 3: On Chotana Road, Mueang District, Chiang Mai (at coordinate 18°49'03.3"N, 98°58'55.1"E).

The results of the survey collecting data on the physical characteristics of the U-turn or right-turn areas at U-turn points and signalized intersections, which are used as the research area for this study, are presented in Table 1.

Table 1 Physical characteristics of the U-turn area and signalized intersection.

| Physical characteristics               |     | U-turns |     |     | Signalized intersections |     |     |
|----------------------------------------|-----|---------|-----|-----|--------------------------|-----|-----|
|                                        |     | 1       | 2   | 3   | 1                        | 2   | 3   |
| Medium size, m                         | (A) | 4.2     | 4.0 | 3.6 | 2.5                      | 3.6 | 3.0 |
|                                        | (B) | 1.0     | 0.9 | 0.5 | 1.1                      | 1.0 | 1.0 |
| Turning area size, m                   | (C) | 80      | 68  | 32  | 80                       | 32  | 58  |
|                                        | (D) | 44      | 58  | 24  | 24                       | 58  | 44  |
|                                        | (E) | 3.5     | 3.5 | 3.5 | 3.5                      | 3.5 | 3.5 |
|                                        | (F) | 3.5     | 3.5 | 3.5 | 3.5                      | 3.5 | 3.5 |
|                                        | (G) | 38      | 38  | -   | 40                       | 32  | 32  |
| Opening size, m                        |     |         |     |     |                          |     |     |
| Number of lane in one direction, lanes |     | 4       | 4   | 2   | 4                        | 3   | 3   |

Remark: The U-turn 3 area does not have an opening because the U-turn area has one side. There is no U-turn area on the other side.

In table 1, length C has a maximum value of 80 meters. When comparing the pocket length with the DOH standard value, it was found that all U-turn points, straight and intersection U-turns, had a length less than the DOH standard, which recommends that the pocket length should not be less than 100 meters [4]. This discrepancy could potentially disrupt the smooth flow of traffic.



### 3.2 Traffic data

The maximum number of vehicles, the traffic data on the straight and turning right or U-turning, the maximum number of vehicles in the queue on the pocket lane, and the number of VEPOM are shown in Table 2.

Table 2 Traffic volume in U-turn areas and Signalized intersections.

| Traffic information in one direction                |                       | U-turns |       |       | Signalized intersections |       |       |
|-----------------------------------------------------|-----------------------|---------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|
|                                                     |                       | 1       | 2     | 3     | 1                        | 2     | 3     |
| The maximum traffic volume, veh/hr                  | Mid-Block             | 3,628   | 3,808 | 2,340 | 2,216                    | 2,340 | 1,316 |
|                                                     | U-turn and turn right | 348     | 412   | 444   | 232                      | 208   | 432   |
|                                                     | Total                 | 3,976   | 4,220 | 2,784 | 2,448                    | 2,548 | 1,748 |
| Percentage of vehicles that U-turn or turn right, % |                       | 9.59    | 9.77  | 15.59 | 9.48                     | 8.17  | 24.72 |
| Maximum vehicle in queue, veh                       |                       | 11      | 10    | 8     | 11                       | 8     | 11    |
| VEPOM, veh                                          |                       | 1       | 4     | 4     | 2                        | 2     | 5     |

In the survey, Table 2 illustrates that the proportion of vehicles turning right or making U-turns is approximately 10% for U-turn areas 1 and 2. In comparison, U-turn area 3 has a proportion of around 16%. In all of the signalized intersection surveys, the proportion of vehicles turning right or making U-turns is approximately 8-10% for intersections 1 and 2, while intersection 3 has a proportion of about 25%. Part of VEPOM has several vehicles for 1-5 vehicles. The saturation flow rate is the maximum traffic volume that can pass a reference line during the effective period, as shown in Table 3.

Table 3 Saturated flow rate at the turning area and intersection.

| Information                   | U-turns |      |      | Signalized intersections |       |       |
|-------------------------------|---------|------|------|--------------------------|-------|-------|
|                               | 1       | 2    | 3    | 1                        | 2     | 3     |
| Average time headway, Seconds | 3.74    | 3.84 | 4.06 | 2.14                     | 2.23  | 2.17  |
| Saturated flow rate, veh/hr   | 963     | 938  | 887  | 1,683                    | 1,615 | 1,659 |

The survey of traffic data revealed that right-turning vehicles at intersections experience shorter waiting times than those in U-turn areas. The differences in physical characteristics and the number of traffic lanes have a significant impact on vehicle movement in the sample areas. The time gap between vehicles in the three U-turn areas is similar, but

there are notable differences in the saturation flow rates between U-turn areas and intersections. Table 3 illustrates the average time headway of vehicles at U-turn points to be 3.88 seconds and at intersections with traffic signals to be 2.18 seconds, with the corresponding saturation flow rates of 928 veh/hr and 1,652 veh/hr, respectively. The intersection with traffic signals boasts a saturation flow rate 56.17% higher than the U-turn point. Despite Table 3. showing that the proportions of right-turning and U-turning vehicles are similar in both areas, this may be due to the precise control of movements at intersections, which results in a higher flow rate in this direction compared to U-turn points. However, it's important to note that at U-turn points, where vehicles must rely on safe gaps to make a right turn or U-turn, the flow rate varies significantly according to the driving behavior of each driver, highlighting the need for more comprehensive traffic management strategies.

### 3.3 Application of binomial distribution to evaluate U-turn areas and signalized intersections.

To determine the appropriate length of the waiting lane, the percentage of U-turn vehicles and the maximum number of vehicles in the queue are considered. Table 2, used where "n" represents the maximum number of vehicles in the queue. The results of the analysis are shown in Table. 4. The cumulative percentage probability of vehicles determines the number of VEPOM. The calculation stops if this value is greater than or equal to 95%.

Table 4 Application of binomial distribution to U-turn areas and signalized intersections.

| Number of VEPOM, veh | Percentage of OVEPOM, (%) |    |    |                            |    |    |
|----------------------|---------------------------|----|----|----------------------------|----|----|
|                      | U-turns                   |    |    | unsignalized intersections |    |    |
|                      | 1                         | 2  | 3  | 1                          | 2  | 3  |
| 0                    | 33                        | 37 | 25 | 33                         | 51 | 4  |
| 1                    | 38                        | 39 | 38 | 39                         | 36 | 16 |
| 2                    | 20                        | 18 | 25 | 20                         | 11 | 26 |
| 3                    | 6                         | 5  | 10 | 6                          | -  | 26 |
| 4                    | -                         | -  | -  | -                          | -  | 17 |
| 5                    | -                         | -  | -  | -                          | -  | 8  |
| SUM                  | 97                        | 99 | 98 | 98                         | 98 | 97 |

When analyzing the overflow of vehicles using a binomial distribution to assess VEPOM, according to Table 4, all U-turn areas and unsignalized intersection 1 had excess vehicle counts of 3 vehicles. Then, at unsignalized intersections 2 and 3, the excess vehicle counts were found to be 3 to 5 vehicles, respectively. These values are close to the survey data with a confidence level of 95%.

### 3.4 Finding the length of the waiting compartment by Binomial distribution.

Using the binomial distribution, various parameters are defined to illustrate vehicle trends under different scenarios and facilitate practical application. From the survey data of U-turns and intersection areas, the proportion of vehicles making U-turns or turning ranges from 8.17% - 24.72%. Therefore, the selected proportions of vehicles making U-turns or turning right “p” that might exceed the pocket lane capacity range from 5% - 40%, with increments of 5%. The maximum number of vehicles in the queue observed is 11. Thus, “n” values are chosen from 3 to 15 vehicles to account for potential increases in the future. Proportions “P” from 2% - 20% are used with increments of 2% to examine the trends in changes in the number of VEPOM in each scenario, as shown in Figure 2 - 11.

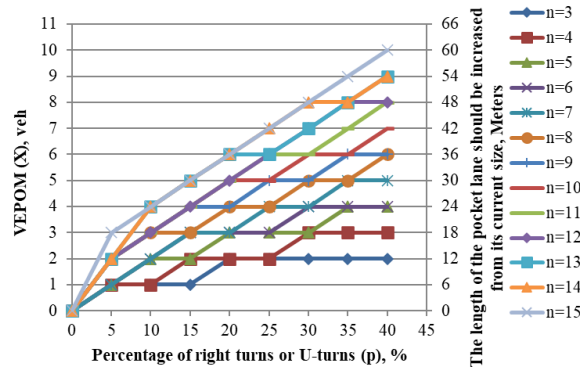


Figure 2 OVEPOM (P), 2%

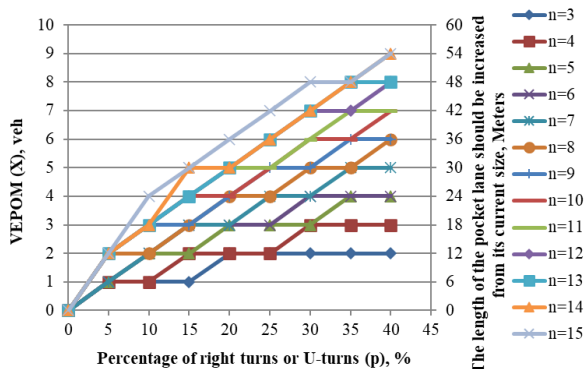


Figure 3 OVEPOM (P), 4%

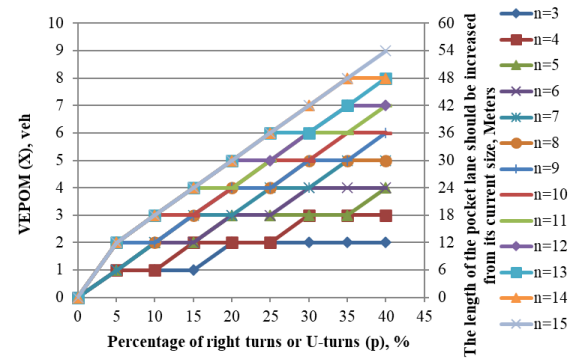


Figure 4 OVEPOM (P), 6%

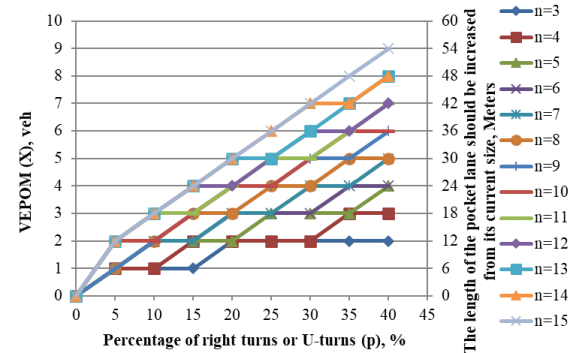


Figure 5 OVEPOM (P), 8%

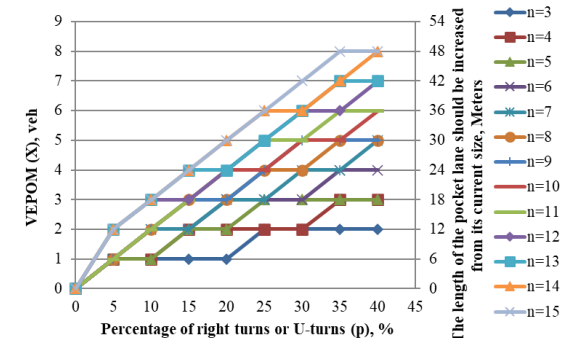


Figure 6 OVEPOM (P), 10%

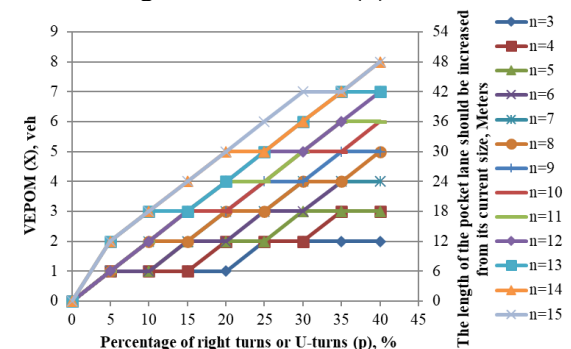


Figure 7 OVEPOM (P), 12%

The study defines the total length of vehicles and the minimum distance between the front and rear bumpers of vehicles that make a U-turn or right turn, averaging 6 meters. Figures 2-11 represent the required length of the pocket lane, determined solely by the number of vehicles exceeding the pocket lane's capacity.

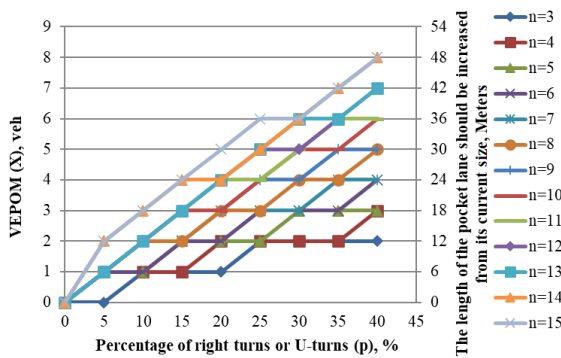


Figure 8 OVEPOM (P), 14%

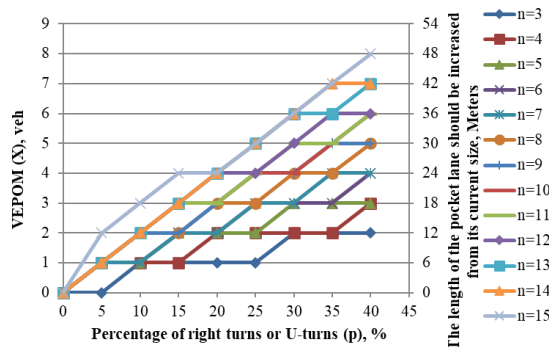


Figure 9 OVEPOM (P), 16%

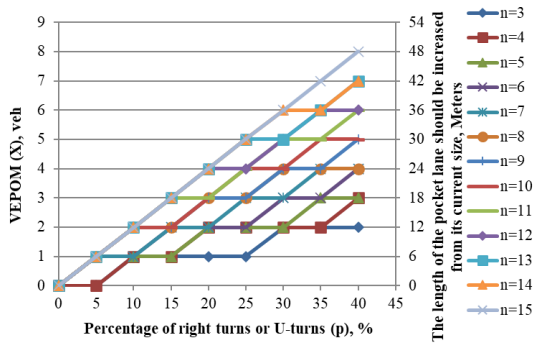


Figure 10 OVEPOM (P), 18%

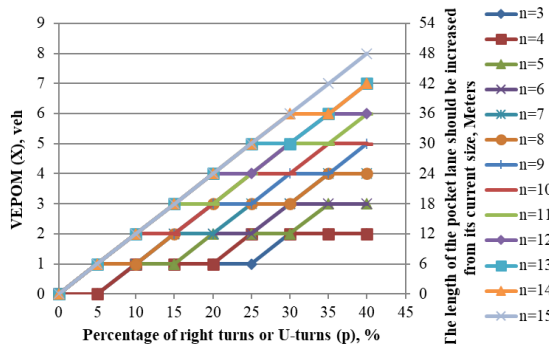


Figure 11 OVEPOM (P), 20%

Figure 2-11 illustrate the relationship between the VEPOM (on the left side of the chart) and the varying proportions of right-turning or U-turning vehicles compared to the total number of vehicles

from the same traffic direction (at the bottom of the chart). These figures help determine the appropriate length that should be added to the area's existing length (on the chart's right side). The opportunity to overturn the right-turn lane's capacity to the main road for 2 to 20 % is a critical factor in this determination. For instance, if the existing area has a length of 50 meters and the value read from the figure is 20 meters, this indicates that after the improvement, the suitable total length of the turning lane will be 70 meters. This consideration is based on the number of vehicles of interest,  $n$ . Table 5. It can be used to simplify the decision-making process. It provides a range of percentages based on the desired length of the pocket lane for the right turn and U-turn. The appropriate lane length can be determined by matching the desired length with the corresponding percentage.

Table 5 provides crucial data for designing the pocket lane length for vehicles making a right turn or U-turn. The following guidelines and examples can be applied in real-world scenarios:

- It is essential to select data based on assumptions or surveys. This will help determine the percentage of vehicles making a U-turn or right turn from traffic volume in one direction (e.g., selecting 20% from row 2 of Table 5).
- Choose the desired or relevant OVEPOM value to calculate the required pocket lane length (e.g., select OVEPOM = 10%).
- Select the number of vehicles in the queue by assumptions or survey data (e.g., select 5 vehicles).
- Refer to Table 5 based on the above inputs (e.g., the minimum required length is 42 meters, as shown by the red dashed line).

The appropriate pocket lane length is determined with precision from the example above. The number of vehicles in the queue, which equals 5 vehicles, combined with the VEPOM obtained from a binomial distribution analysis equals 2 vehicles (as shown in Figure 6). Therefore, the total number of vehicles turning right or making a U-turn is seven. Based on the previously mentioned vehicle spacing, the required pocket lane length can be calculated as  $7 \times 6 = 42$  meters.



Table 5 The appropriate length of pocket lanes for turning, when considering the opportunity to make right turns and U-turns per all traffic volume in the same direction.

|                                        | Percentage of right turns or U-turns (p), %                                     |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                        | 5                                                                               | 10  | 15  | 20  | 25  | 30  | 35  | 40  | 5               | 10  | 15  | 20  | 25  | 30  | 35  | 40  | 5               | 10  | 15  | 20  | 25  | 30  | 35  | 40  | 5   | 10  | 15  | 20  | 25  | 30  | 35  | 40  |
|                                        | The length of the pocket lane should be increased from its current size, Meters |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| Number of vehicles in queue. (n), Veh. | OVEPOM (X), 2%                                                                  |     |     |     |     |     |     |     | OVEPOM (X), 4%  |     |     |     |     |     |     |     | OVEPOM (X), 6%  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 3                                      | 24                                                                              | 24  | 24  | 30  | 30  | 30  | 30  | 30  | 24              | 24  | 24  | 30  | 30  | 30  | 30  | 30  | 24              | 24  | 24  | 30  | 30  | 30  | 30  | 30  | 24  | 24  | 24  | 30  | 30  | 30  | 30  | 30  |
| 4                                      | 30                                                                              | 30  | 36  | 36  | 36  | 42  | 42  | 42  | 30              | 30  | 36  | 36  | 36  | 42  | 42  | 42  | 30              | 30  | 36  | 36  | 36  | 42  | 42  | 42  | 30  | 30  | 36  | 36  | 36  | 42  | 42  | 42  |
| 5                                      | 36                                                                              | 42  | 42  | 48  | 48  | 48  | 54  | 54  | 36              | 42  | 42  | 48  | 48  | 48  | 54  | 54  | 36              | 42  | 42  | 48  | 48  | 48  | 54  | 54  | 36  | 42  | 42  | 48  | 48  | 48  | 54  | 54  |
| 6                                      | 42                                                                              | 48  | 54  | 54  | 54  | 60  | 60  | 60  | 42              | 48  | 54  | 54  | 54  | 60  | 60  | 60  | 42              | 48  | 54  | 54  | 54  | 60  | 60  | 60  | 42  | 48  | 54  | 54  | 54  | 60  | 60  | 60  |
| 7                                      | 48                                                                              | 54  | 60  | 60  | 66  | 66  | 72  | 72  | 48              | 54  | 60  | 60  | 66  | 66  | 72  | 72  | 48              | 54  | 60  | 60  | 66  | 66  | 72  | 72  | 48  | 54  | 60  | 60  | 66  | 66  | 72  | 72  |
| 8                                      | 60                                                                              | 66  | 66  | 72  | 72  | 78  | 78  | 84  | 60              | 66  | 66  | 72  | 72  | 78  | 78  | 84  | 60              | 66  | 66  | 72  | 72  | 78  | 78  | 84  | 60  | 66  | 66  | 72  | 72  | 78  | 78  | 84  |
| 9                                      | 66                                                                              | 72  | 78  | 78  | 84  | 84  | 90  | 90  | 66              | 72  | 72  | 78  | 84  | 84  | 90  | 90  | 66              | 72  | 72  | 78  | 84  | 84  | 90  | 90  | 66  | 72  | 78  | 78  | 84  | 84  | 90  | 90  |
| 10                                     | 72                                                                              | 78  | 84  | 90  | 90  | 96  | 96  | 102 | 72              | 78  | 84  | 84  | 90  | 96  | 96  | 102 | 72              | 78  | 84  | 84  | 90  | 96  | 96  | 102 | 72  | 78  | 84  | 90  | 90  | 96  | 96  | 102 |
| 11                                     | 78                                                                              | 84  | 90  | 96  | 102 | 102 | 108 | 114 | 78              | 84  | 90  | 96  | 96  | 102 | 108 | 108 | 78              | 84  | 90  | 96  | 96  | 102 | 108 | 108 | 78  | 84  | 90  | 96  | 96  | 102 | 102 | 108 |
| 12                                     | 84                                                                              | 90  | 96  | 102 | 108 | 114 | 120 | 120 | 84              | 90  | 96  | 102 | 108 | 114 | 114 | 120 | 84              | 90  | 96  | 102 | 102 | 108 | 114 | 114 | 84  | 90  | 96  | 102 | 102 | 108 | 114 | 114 |
| 13                                     | 90                                                                              | 102 | 108 | 114 | 114 | 120 | 126 | 132 | 90              | 96  | 102 | 108 | 114 | 120 | 126 | 126 | 90              | 96  | 102 | 108 | 114 | 120 | 126 | 126 | 90  | 96  | 102 | 108 | 114 | 114 | 120 | 126 |
| 14                                     | 96                                                                              | 108 | 114 | 120 | 126 | 132 | 132 | 138 | 96              | 102 | 114 | 114 | 120 | 126 | 132 | 138 | 96              | 102 | 108 | 114 | 120 | 126 | 132 | 138 | 96  | 102 | 108 | 114 | 120 | 126 | 132 | 132 |
| 15                                     | 108                                                                             | 114 | 120 | 126 | 132 | 138 | 144 | 150 | 102             | 114 | 120 | 126 | 132 | 138 | 138 | 144 | 102             | 108 | 114 | 120 | 126 | 132 | 138 | 144 | 102 | 108 | 114 | 120 | 126 | 132 | 138 | 144 |
| Number of vehicles in queue. (n), Veh. | OVEPOM (X), 8%                                                                  |     |     |     |     |     |     |     | OVEPOM (X), 10% |     |     |     |     |     |     |     | OVEPOM (X), 12% |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 3                                      | 24                                                                              | 24  | 24  | 30  | 30  | 30  | 30  | 30  | 24              | 24  | 24  | 30  | 30  | 30  | 30  | 30  | 24              | 24  | 24  | 30  | 30  | 30  | 30  | 30  | 24  | 24  | 24  | 30  | 30  | 30  | 30  | 30  |
| 4                                      | 30                                                                              | 30  | 36  | 36  | 36  | 42  | 42  | 42  | 30              | 30  | 36  | 36  | 36  | 42  | 42  | 42  | 30              | 30  | 30  | 36  | 36  | 36  | 42  | 42  | 30  | 30  | 30  | 36  | 36  | 36  | 42  | 42  |
| 5                                      | 36                                                                              | 42  | 42  | 48  | 48  | 48  | 54  | 54  | 36              | 42  | 42  | 48  | 48  | 48  | 54  | 54  | 36              | 42  | 42  | 48  | 48  | 48  | 54  | 54  | 36  | 42  | 42  | 48  | 48  | 48  | 54  | 54  |
| 6                                      | 42                                                                              | 48  | 48  | 54  | 54  | 54  | 60  | 60  | 42              | 48  | 48  | 54  | 54  | 54  | 60  | 60  | 42              | 48  | 48  | 54  | 54  | 54  | 60  | 60  | 42  | 48  | 48  | 54  | 54  | 54  | 60  | 60  |
| 7                                      | 48                                                                              | 54  | 54  | 60  | 60  | 66  | 66  | 72  | 48              | 54  | 54  | 60  | 60  | 66  | 66  | 72  | 48              | 54  | 54  | 60  | 60  | 66  | 66  | 72  | 48  | 54  | 54  | 60  | 60  | 66  | 66  | 72  |
| 8                                      | 54                                                                              | 60  | 66  | 66  | 72  | 72  | 78  | 78  | 54              | 60  | 66  | 66  | 72  | 72  | 78  | 78  | 54              | 60  | 60  | 66  | 66  | 72  | 72  | 78  | 54  | 60  | 60  | 66  | 66  | 72  | 72  | 78  |
| 9                                      | 60                                                                              | 66  | 72  | 78  | 78  | 84  | 84  | 90  | 60              | 66  | 72  | 72  | 78  | 84  | 84  | 90  | 60              | 66  | 72  | 72  | 78  | 84  | 84  | 90  | 60  | 66  | 72  | 72  | 78  | 78  | 84  | 84  |
| 10                                     | 72                                                                              | 72  | 78  | 84  | 84  | 90  | 96  | 96  | 66              | 72  | 78  | 84  | 84  | 90  | 90  | 96  | 66              | 72  | 78  | 78  | 84  | 84  | 90  | 96  | 66  | 72  | 78  | 78  | 84  | 84  | 90  | 96  |
| 11                                     | 78                                                                              | 84  | 84  | 90  | 96  | 96  | 102 | 108 | 72              | 78  | 84  | 90  | 96  | 96  | 102 | 102 | 72              | 78  | 84  | 90  | 96  | 96  | 102 | 102 | 72  | 78  | 84  | 90  | 90  | 96  | 102 | 102 |
| 12                                     | 84                                                                              | 90  | 96  | 96  | 102 | 108 | 108 | 114 | 84              | 90  | 90  | 96  | 102 | 108 | 108 | 114 | 78              | 84  | 90  | 96  | 102 | 102 | 108 | 114 | 78  | 84  | 90  | 96  | 102 | 102 | 108 | 114 |
| 13                                     | 90                                                                              | 96  | 102 | 108 | 108 | 114 | 120 | 126 | 90              | 96  | 102 | 102 | 108 | 114 | 120 | 120 | 90              | 96  | 96  | 102 | 108 | 114 | 120 | 120 | 90  | 96  | 96  | 102 | 108 | 114 | 120 | 120 |
| 14                                     | 96                                                                              | 102 | 108 | 114 | 120 | 126 | 126 | 132 | 96              | 102 | 108 | 114 | 120 | 120 | 126 | 132 | 96              | 102 | 108 | 114 | 114 | 120 | 126 | 132 | 96  | 102 | 108 | 114 | 114 | 120 | 126 | 132 |
| 15                                     | 102                                                                             | 108 | 114 | 120 | 126 | 132 | 138 | 144 | 102             | 108 | 114 | 120 | 126 | 132 | 138 | 138 | 102             | 108 | 114 | 120 | 126 | 132 | 138 | 138 | 102 | 108 | 114 | 120 | 126 | 132 | 132 | 138 |
| Number of vehicles in queue. (n), Veh. | OVEPOM (X), 14%                                                                 |     |     |     |     |     |     |     | OVEPOM (X), 16% |     |     |     |     |     |     |     | OVEPOM (X), 18% |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 3                                      | 18                                                                              | 24  | 24  | 24  | 30  | 30  | 30  | 30  | 18              | 24  | 24  | 24  | 24  | 30  | 30  | 30  | 18              | 24  | 24  | 24  | 24  | 30  | 30  | 30  | 18  | 24  | 24  | 24  | 24  | 30  | 30  | 30  |
| 4                                      | 30                                                                              | 30  | 30  | 36  | 36  | 36  | 36  | 42  | 30              | 30  | 30  | 36  | 36  | 36  | 36  | 42  | 24              | 30  | 30  | 36  | 36  | 36  | 36  | 42  | 24  | 30  | 30  | 36  | 36  | 36  | 36  | 42  |
| 5                                      | 36                                                                              | 36  | 42  | 42  | 42  | 48  | 48  | 48  | 36              | 36  | 42  | 42  | 42  | 48  | 48  | 48  | 36              | 36  | 36  | 42  | 42  | 42  | 48  | 48  | 36  | 36  | 36  | 42  | 42  | 42  | 48  | 48  |
| 6                                      | 42                                                                              | 42  | 48  | 48  | 54  | 54  | 54  | 60  | 42              | 42  | 48  | 48  | 54  | 54  | 54  | 60  | 42              | 42  | 48  | 48  | 48  | 54  | 54  | 60  | 42  | 42  | 48  | 48  | 48  | 54  | 54  | 60  |
| 7                                      | 48                                                                              | 54  | 54  | 60  | 60  | 60  | 66  | 66  | 48              | 48  | 54  | 54  | 60  | 60  | 66  | 66  | 48              | 48  | 54  | 54  | 60  | 60  | 66  | 66  | 48  | 48  | 54  | 54  | 60  | 60  | 66  | 66  |
| 8                                      | 54                                                                              | 60  | 60  | 66  | 66  | 72  | 72  | 78  | 54              | 60  | 60  | 66  | 66  | 72  | 72  | 78  | 54              | 60  | 60  | 66  | 66  | 72  | 72  | 78  | 54  | 60  | 60  | 66  | 66  | 72  | 72  | 78  |
| 9                                      | 60                                                                              | 66  | 72  | 72  | 78  | 78  | 84  | 84  | 60              | 66  | 66  | 72  | 78  | 78  | 84  | 84  | 60              | 66  | 66  | 72  | 78  | 78  | 84  | 84  | 60  | 66  | 66  | 72  | 72  | 78  | 78  | 84  |
| 10                                     | 66                                                                              | 72  | 78  | 78  | 84  | 90  | 90  | 96  | 66              | 72  | 78  | 78  | 84  | 84  | 90  | 96  | 66              | 72  | 72  | 78  | 84  | 84  | 90  | 96  | 66  | 72  | 72  | 78  | 84  | 84  | 90  | 90  |
| 11                                     | 72                                                                              | 78  | 84  | 90  | 90  | 96  | 102 | 102 | 72              | 78  | 84  | 84  | 90  | 96  | 96  | 102 | 72              | 78  | 84  | 84  | 90  | 96  | 96  | 102 | 72  | 78  | 84  | 84  | 90  | 96  | 96  | 102 |
| 12                                     | 78                                                                              | 84  | 90  | 96  | 102 | 102 | 108 | 114 | 78              | 84  | 90  | 96  | 96  | 102 | 108 | 108 | 78              | 84  | 90  | 96  | 96  | 102 | 108 | 108 | 78  | 84  | 90  | 96  | 96  | 102 | 108 | 108 |
| 13                                     | 84                                                                              | 90  | 96  | 102 | 108 | 114 | 114 | 120 | 84              | 90  | 96  | 102 | 108 | 114 | 114 | 120 | 84              | 90  | 96  | 102 | 108 | 114 | 114 | 120 | 84  | 90  | 96  | 102 | 108 | 108 | 114 | 120 |
| 14                                     | 96                                                                              | 102 | 108 | 108 | 114 | 120 | 126 | 132 | 90              | 96  | 102 | 108 | 114 | 120 | 126 | 126 | 90              | 96  | 102 | 108 | 114 | 120 | 126 | 126 | 90  | 96  | 102 | 108 | 114 | 120 | 120 | 126 |
| 15                                     | 102                                                                             | 108 | 114 | 120 | 126 | 126 | 132 | 138 | 102             | 108 | 114 | 114 | 120 | 126 | 132 | 138 | 96              | 102 | 108 | 114 | 120 | 126 | 132 | 138 | 96  | 102 | 108 | 114 | 120 | 126 | 132 | 138 |
| Number of vehicles in queue. (n), Veh. | OVEPOM (X), 20%                                                                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 3                                      | 18                                                                              | 24  | 24  | 24  | 24  | 30  | 30  | 30  |                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 4                                      | 24                                                                              | 30  | 30  | 30  | 36  | 36  | 36  | 36  |                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 5                                      | 36                                                                              | 36  | 36  | 42  | 42  | 42  | 48  | 48  |                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 6                                      | 42                                                                              | 42  | 48  | 48  | 48  | 54  | 54  | 54  |                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 7                                      | 48                                                                              | 48  | 54  | 54  | 60  | 60  | 66  | 66  |                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 8                                      | 54                                                                              | 54  | 60  | 66  | 66  | 66  | 72  | 72  |                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 9                                      | 60                                                                              | 66  | 66  | 72  | 72  | 78  | 78  | 84  |                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 10                                     | 66                                                                              | 72  | 72  | 78  | 84  | 84  | 90  | 90  |                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 11                                     | 72                                                                              | 78  | 84  | 84  | 90  | 96  | 96  | 102 |                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 12                                     | 78                                                                              | 84  | 90  | 96  | 96  | 102 | 108 | 108 |                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 13                                     | 84                                                                              | 90  | 96  | 102 | 108 | 108 | 114 | 120 |                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 14                                     | 90                                                                              | 96  | 102 | 108 | 114 | 120 | 120 | 126 |                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 15                                     | 96                                                                              | 102 | 108 | 114 | 120 | 126 | 132 | 138 |                 |     |     |     |     |     |     |     |                 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |



#### 4. Conclusions

Our study area is the U-turn and signalized intersection locations. When considering the equivalent passenger car unit (PCU), we found that the average saturation flow rate at three U-turn locations was 930 veh/hr, significantly lower than the average saturation flow rate at three intersection locations, which was 1,653 veh/hr. This substantial difference of 723 veh/hr underscores the need for further research in this area, as it reveals that the saturation flow rate at U-turn locations is 43.74% lower than at intersections.

The appropriate length of the right-turn and U-turn pocket lane depends on the proportion of the total volume of vehicles that need to turn right or make a U-turn. Considering a 5% increase in the length of the right-turn and U-turn pocket lane, it is found that the suitable length depends on the number of VEPOM. The choice of the proportion of vehicles turn right and make a U-turn may depend on the analyst's discretion, whether they want a longer or shorter waiting lane. For a longer waiting lane, consider the proportion of vehicles turning right and making a U-turn concerning the total volume of vehicles that is smaller. For a shorter waiting lane, consider the proportion of vehicles turning right and making a U-turn concerning the larger total volume of vehicles.

#### 5. References

- [1] Thipsuda K, Ratthaphon P. A study of U-turn behavior at signalized U-turn. *SWU Engineering Journal*. 2013; 8(1). Thai.
- [2] Fred LM, Scott SW. Road Vehicle Performance and Geometric Design of Highways. In: *Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis*, Fifth Edition. R. R. Donnelley and Sons Company, Von Hoffman. 2012. p. 9-28.
- [3] Department of Highways. *DESIGN GUIDELINE: Type of road Medians and cross- section design of Road Widening*. Bureau of location and design, Department of Highways, Thailand; 2011. Thai.
- [4] Kingdom of Thailand, Ministry of Transport, Department of Highways. *Standard drawing for highway design and construction: 2015 revision (Edition 2018)*. Bangkok: Ministry of Transport; 2018.
- [5] Andreas NP, Demetrios LA. Binomial Distribution. In: *International Encyclopedia of Statistical Science*. Springer; 2011.
- [6] Malaya M, Partha PD. Modeling the lane changing behavior of major stream traffic due to U-turns. *Transportation Engineering* 2; 2020. 100012.
- [7] Zong ZT, Ning W. Probabilistic model for signalized intersection capacity with a short right-turn lane. *Journal of transportation engineering*, 2006;132:3(205).
- [8] Yi GQ, Lei G, Lei Y, M.ASCE, Hualiang T. Estimation of Design Lengths of Left-Turn Lanes. *Journal of transportation engineering*, 2012;138:3.
- [9] Sugiarto S, Thirayoot L, Takashi N. Dropped in capacity and traffic speed of urban arterial: A case study at U-turn section in Aceh province, Indonesia. *Aceh International Journal of Science and Technology*. 2012;1(3):86-92.
- [10] Kittipong S. Study of physical factors affecting saturation flow at U-turn locations. M. Eng. Thesis. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University; 2010. Thai.
- [11] Yotsawat S. Effect of performing U-turns in exclusive right-turn lane at signalized intersection based on passenger car size: M.Eng. Thesis. Suranaree University of Technology, Thailand; 2016. Thai.
- [12] Meel IP, Brannolte U, Satirasetthavee D, Kanitpong K. Safety impact of application of auxiliary lanes at downstream locations of Thai U-turns. *IATSS Research*. 2017;41.
- [13] Wonmango LS, Didier W. A mixed effects negative binomial analysis of road mortality determinants in Sub-Saharan African countries. *Transportation Research Part F*. 2018;52:120-126.
- [14] Kai W, Tanmoy B, Shanshan Z, Naveen E, Eric J. Highway safety assessment and improvement through crash prediction by injury severity and vehicle damage using Multivariate Poisson-Lognormal model and Joint Negative Binomial-Generalized Ordered Probit Fractional Split model. *Journal of Safety Research*. 2021;76:44-55.
- [15] Yu-Ting H, Tzu-Chang L. A binomial distribution model for describing pedestrian-vehicle crashes in urban areas. *Asian Transport Studies*. 2024;10.



## Reducing Sink Mark Defect of Cup Plastic Injection by Biodegradable Material with an Injection Rate

Adirake Chainawakul<sup>1</sup>, Teerawat Sangkas<sup>1</sup>, Suthaphat Kamthai<sup>2</sup> and Supasit Manokruang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Tools and Die Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna  
128 Huay Kaew Road, Mueang Chiang Mai, Chiang Mai, Thailand, 50300

<sup>2</sup> Division of Packing Technology, School of Agro-Industry, Faculty of Agro-Industry, Chiang Mai University

155 Moo 2, Mae Hia, Mueang Chiang Mai, Chiang Mai, 50100

\*Corresponding Author: supasit.m@rmutl.ac.th. Phone Number: 053 921 444 ext. 2300

Received: 4 November 2024, Revised: 13 January 2025, Accepted: 13 January 2025

### Abstract

In this research, the issue of shrinkage in coffee cup sleeves filled with biodegradable plastic materials is investigated. Polylactic acid (PLA) and coffee grounds are two combined materials that are difficult to form by injection molding. The quality of the coffee cup sleeves declined as their surface was reduced. This study aims to investigate the effects of various plastic injection molding parameters (including clamping force, injection pressure, injection rate, and cooling times) that influence sink marks on the molded parts. The goal is to determine the optimal conditions for reducing sink marks on the molded parts. Experimental results revealed that setting the injection speed rate to 40 cm<sup>3</sup>/s and the injection pressure to 54 bar significantly reduced shrinkage, thereby enhancing the surface quality of the product. The findings suggest that configuring the injection speed rate at 40 cm<sup>3</sup>/s, the injection pressure at 54 bar, the clamping force at 100 tons, the material's melting temperature ( $T_m$ ) at 180 °C, and the mold temperature ( $T_w$ ) at 60 °C effectively minimized sink marks. This optimization resulted in a smoother and visibly improved surface finish of the molded components. These results provided an important guideline for the development of injection molding technology employing bioplastic materials that use higher viscosity than generally used with synthetic plastics. Other bioplastic goods can be produced using this method with favorable outcomes.

**Keywords:** Plastic injection molding, Shrinkage, Biodegradable, Injection parameters

### 1. Introduction

The extensive utilization of resources in global trends has had a significant influence on the environment and natural resources. Manufacturing products that decompose naturally after use has emerged as a competitive alternative that minimizes impact on the environment, and exemplifies efficient resource management. As a result, using alternatives that reduce the use of finite resources and help reduce plastic waste is essential to the development of ecologically friendly materials. Biodegradable plastics can help reduce the amount of plastic waste that ends up in the environment by breaking down naturally. Biodegradability is the property of polymers that allows microorganisms to break them down into smaller molecules [1-3], which may help solve the problem of plastic waste accumulation in soil, water, and living organisms. This research aims to develop a coffee cup using biodegradable plastic materials formed and blended with coffee grounds. Quality control of molded parts is important to prevent defects such as shrinkage, weld marks, flow marks, and sink marks. Mahajan et al. [4-5] applied statical methods to determine the optimal

injection molding conditions. The research focused on mold closing speeds, which had a significant effect on quality characteristics. Moayyedien et al. [6] concluded a melt temperature is the most influential for short-shot possibility by resolving the optimum levels of gate type, filling time, and melt temperature. Moreover, the factor analysis of high-density polyethylene (HDPE) in the injection process is studied for reducing shrinkage problems by Supasit et al. [7]. Various factors cause these defects, especially the injection molding parameters. This has a significant impact on the quality of the formed parts. In order to develop the quality, and avoid the defects, a number of researchers applied an optional device for solving these problems. To reduce defect rates and circumvent high-cost expenditure on new molds, Li et al. [8] presented an experimental framework aiming to implement process optimization efficiently and attain a predictable level for the quality characteristics. Masato et al. [9] described the design of a multivariate shrinkage sensor (MVSS) incorporating a spring-biased pin with a digital linear displacement transducer to measure in-mold



shrinkage directly. The modeled main effects highlight the different shrinkage behaviors of HIPS and PP, indicating the need for in-mold shrinkage data. Yuan et al. [10] summarized mold temperature, melt temperature, injection speed, and holding pressure affect defects. The process parameters influence iridescent patterns by changing retardation and transmittance. Regarding these studies, the main parameters influencing the quality of plastic injection molding are such things as injection pressure, injection speed rate, cooling time, and mold temperature. From the experiment of microplastic injection molding investigation, Ong et al. [11] found that mold temperature was most significant for cavity filling. Krebelj et al. [12] studied the cooling rate effect of glass transition temperature; this research summarized the importance of volumetric relaxation in cavity pressure prediction. Yadav et al. [13] observed the influence of injection and holding pressure on thermoplastic; the results showed that injection pressure affected the mechanical properties. These studies attempted to improve the product's quality on ordinary plastic materials. Plastic injection molding sink mark problems are a serious flaw that impairs the practical and aesthetic quality of molded items, and the uneven shrinkage that occurs during the molding process's cooling phase is the main cause of this problem. Therefore, this research focuses on adjusting parameters in the injection molding process of coffee cups made from biodegradable plastic materials to solve the problem of shrinking. Mohan et al. [14] The research aims to investigate and report the influence of injection molding process parameters on the strength, shrinkage, and twisting of parts after molding. In particular, this research focuses on how these parameters affect the shrinkage and twisting of polypropylene parts after molding. Wang et al. [15] This study focuses on addressing defects in rapid heat cycle molding (RHCM). To reduce sink marks, a 'bench form' structure for screw studs was developed, along with a lifter structure for the mold, and external gas-assisted packing was introduced. To minimize warpage, the study employed Taguchi's methods to examine the impact of process parameters – such as melt temperature, injection time, packing pressure, packing time, and cooling time. Simulations with Moldflow software had been conducted to analyze warpages under different conditions. Signal-to-noise analysis identified the optimal processing parameters, and ANOVA quantified the contribution of each parameter. The results show that these optimized parameters can effectively reduce warpage in RHCM parts. Vanek et al. [16]

This study investigates the methods, including software simulations and experimental validation, using polycarbonate test samples (optical lenses). Significant parameters such as melt temperature, mold temperature, injection pressure, and packing pressure were varied to assess their impact on geometric accuracy and visual properties. The results showed that lower melt temperatures and higher mold temperatures significantly reduce the occurrence of dimensional defects. Additionally, the design of the gate system was found to be crucial in minimizing defects and ensuring uniform material flow. Effective packing pressure was essential in reducing volumetric shrinkage and sink marks. Butt MS et al. [17] In this research, the mechanical and degradation properties of biodegradable magnesium (Mg) strengthened poly-lactic acid (PLA) composites produced through plastic injection molding have been extensively studied. These composites exhibit enhanced mechanical performance and controlled degradation rates, making them suitable for biomedical applications, particularly in orthopedic implants.

Previous studies indicate that biodegradable materials exhibit unique and distinct characteristics, often posing significant challenges for forming processes. 3D printing has been commonly utilized for shaping such materials by converting them into filaments prior to additive manufacturing. However, there is a notable lack of research on direct forming processes using raw biodegradable materials. This study emphasizes the critical role of injection pressure and injection rate in enhancing the quality of eco-friendly plastic products. These factors are particularly crucial given the limited existing research and the inherent challenges associated with forming biodegradable materials using various parameters.

## **2. Materials and Methods**

### **2.1 Biodegradable Materials**

The material selected for the injection molding of coffee cups is a prototype biodegradable plastic (PLA/coffee ground: 80/20 with compounds), which has been tested for its biodegradability and has demonstrated no adverse environmental impact [18]. The material consists of polylactic acid (PLA) combined with coffee grounds, a byproduct. This mixture has desired properties such as flexibility, strength, and a shiny surface created coffee grinding oil. The injection parameters utilized in this study are detailed in Table 1.



## 2.2 Calculation of Injection Molding Parameters

The design of the 16 oz coffee cup has a diameter of 92 mm for the cup body. The bottom diameter is 60 mm, the height is 102 mm, and the wall thickness is 1.5 mm, as illustrated in Figure 1. The injection molding process allows for the production of two cups per cycle, with a spacing of 120 mm. The height of the pinpoint gate is 30 mm, the length of the runner is 145 mm, and the height of the sprue is 70 mm, as shown in Figures 1 and 2, respectively.

Table 1 Injection Parameters of Polylactic acid: PLA and Coffee Grounds [20]

| List                       | Value     | Unit               |
|----------------------------|-----------|--------------------|
| Density ( $\rho$ )         | 1.25      | $\text{g/cm}^3$    |
| Melt Temperature ( $T_m$ ) | 165-180   | $^{\circ}\text{C}$ |
| Mold Temperature ( $T_w$ ) | 60        | $^{\circ}\text{C}$ |
| Tensile Strength           | 38 - 47.8 | MPa                |
| Tensile Modulus            | 4,200     | MPa                |
| Melt Flow Index            | 5.9-8.46  | $\text{g/10min}$   |
| Shrinkage                  | 0.3       | %                  |

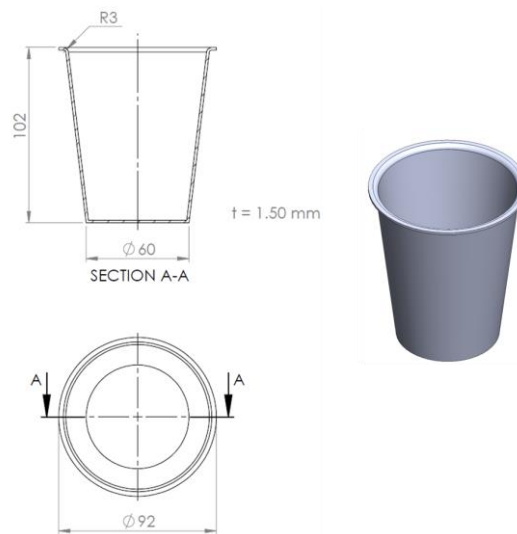


Figure 1 Coffee Cup Dimension

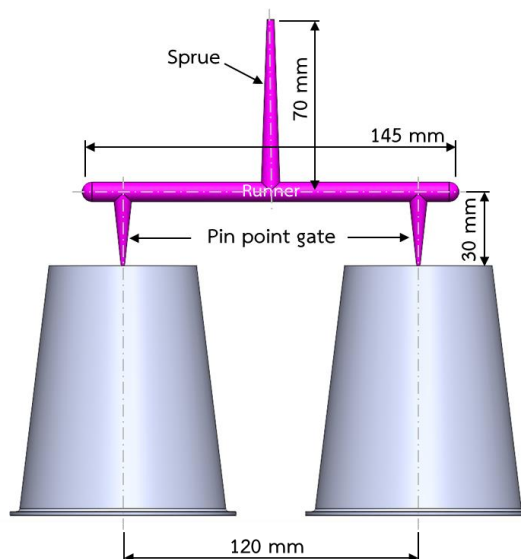


Figure 2 Cavity Layout

Formula (1) presents mass calculation of coffee cup

$$m = v \times \rho \quad (1)$$

where;  $m$  is mass (g),  $v$  represent as volume ( $\text{cm}^3$ ), and  $\rho$  refer to density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

The injection volume of the workpiece is  $54.53 \text{ cm}^3/\text{piece}$  and the runner system (sprue + runner + pinpoint gate) is  $10.04 \text{ cm}^3$ . The total volume is  $(54.53 \text{ cm}^3 \times 2) + 10.04 \text{ cm}^3$  is  $119.10 \text{ cm}^3$ . Therefore, the weight of the workpiece per cycle injection is  $148.88 \text{ g}$  ( $119.10 \text{ cm}^3 \times 1.25 \text{ g}/\text{cm}^3$ ).

### 2.3 Design of the Coffee Cup Injection Mold

The coffee cup injection mold, a three-plate molding type (3-plate molding), has three parting lines (PL) and a pinpoint gate for the liquid plastic in the middle area at the bottom of the coffee cup. The size of the mold is  $270 \times 300 \times 375 \text{ mm}$  (W x L x H) as shown in Figure 3.

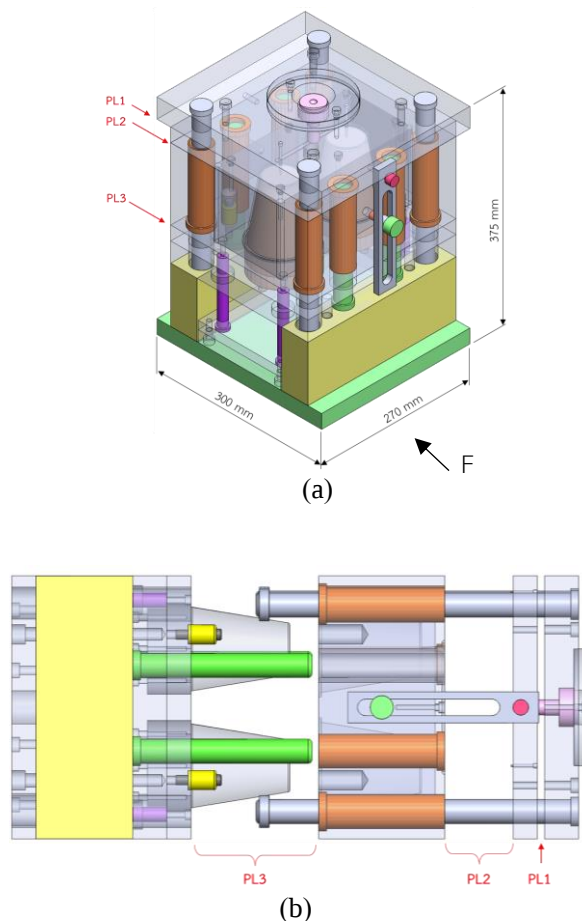


Figure 3 Biodegradable Cup Molding Design  
 (a) Mold Dimension (b) Parting Line

### 2.4 Injection Mold Parameters Adjusting Process

Injection molding parameters are critical in affecting the quality of manufactured components. The injection process is divided into 5 steps with a percent cycle time given: 1) mold closing (5%) 2) injection time (10%) 3) Filling time (15%), 4) Cooling time (70%), and 5) Mold opening (5%). All 5 processes mentioned above affect the quality of the workpiece during the injection molding process as shown in Figure 4.

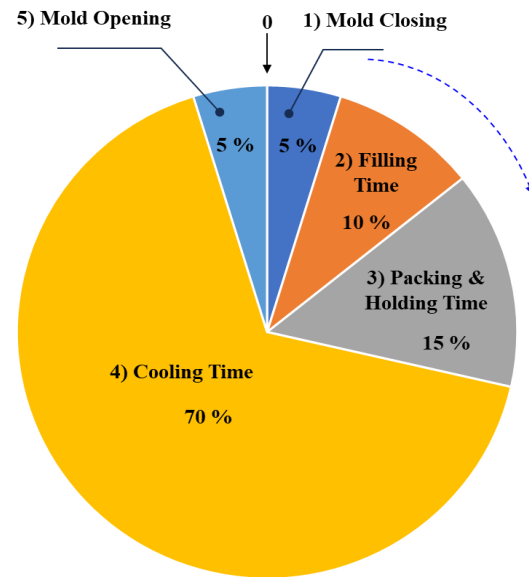


Figure 4 Plastic Injection Process [4]

### 2.5 Clamping force Calculation

The clamping force is the force that keeps the mold closed during the injection of plastic into the mold, preventing it from opening. The clamping force must exceed the injection pressure, an appropriate clamping force contributes to the improved quality of the injection-molded components, while insufficient clamping force may lead to defects in the parts [20]. The equation for calculating the clamping force is presented in Equation 2.

$$F = P \times A \quad (2)$$

where;  $F$  is clamping force (ton),  $P$  represent as injection pressure ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ), and  $A$  refer to the projected area of workpiece ( $\text{cm}^2$ )

The injection pressure  $P$  in the mold is derived from the injection molding pressure of the PLA material, which is  $703 \text{ kgf}/\text{cm}^2$  [20]. The projected area  $A$  of the two molded components (Cavity 1 and 2) has a diameter of  $9.2 \text{ cm}$ . The area of the components is calculated as  $A_1 = \pi r^2 \times 2 = 132.95 \text{ cm}^2$  and the area of the runner is

$A_2 = W \times L = 14.5 \times 6 = 8.7 \text{ cm}^2$ . Total projected area is  $132.95 + 8.7 = 141.65 \text{ cm}^2$ . Therefore, selected clamping force is  $703 \text{ kgf/cm}^2 \times 141.65 \text{ cm}^2 = 99.58 \text{ Ton} \approx 100 \text{ Ton}$ . The projected area is illustrated in Figure 5.

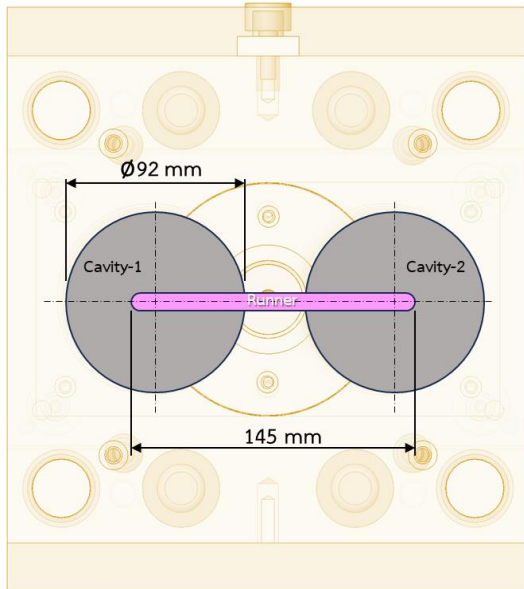


Figure 5 Projection Area and Runner

## 2.6 Plastic Injection Machine

Plastic injection molding machines are responsible for introducing material into the mold and workpiece as desired. There are many types of plastic injection machines which depend on workpiece design and mold size. This experiment chose to utilize a horizontal single-screw injection molding machine which is suitable for 2-plate and 3-plate molds [22]. The model HYF-1000 is shown in Figure 6, and details of the injection molding machine are shown in Table 2.

## 2.7 Injection Pressure

The injection pressure refers to the pressure applied when injecting material into the mold and creating internal pressure within the mold [23]. It is a major contributor to defects in plastic injection molding [24]. This is compared to the maximum injection pressure of injection machine; HYF-1000, PRC, with clamping force 100 Tons. Tie bar range is 360 x 315 mm. The calculation can be performed according to Equation 3.

$$P = \frac{P_{max} \times P_{mat}}{P_{M/C}} \quad (3)$$

where;  $P$  represent as injection pressure (bar),  $P_{max}$  is maximum injection pressure (bar),  $P_{mat}$

is injection pressure of material (bar), and  $P_{M/C}$  refer to injection pressure of machine ( $\text{kg/cm}^3$ ). The experiment has been set:  $P_{max}$  of the HYF-1000 injection molding machine, which is 140 bar.  $P_{mat}$  of PLA is  $703 \text{ kgf/cm}^2 \approx 690 \text{ bar}$  [20],  $P_{M/C}$  is  $1,835 \text{ kg/cm}^3$  (1,799.52 bar). Therefore, the adjusted injection pressure for the coffee cup components is calculated to be at 53.68 bar, or approximately 54 bar.



Figure 6 Plastic Injection Machine; HYF-1000

Table 2 HYF-1000 Specifications

| System           | List                | Value     | Unit                   |
|------------------|---------------------|-----------|------------------------|
| Injection System | Screw Size (Ø)      | 35        | mm                     |
|                  | Max. Volume         | 160       | $\text{cm}^3$          |
|                  | Injection Pressure  | 1,835     | $\text{kg/cm}^2$       |
|                  | Injection Rate      | 90        | $\text{cm}^3/\text{s}$ |
|                  | Speed               | 0-200     | rpm                    |
| Clamping System  | Max. Mold Size      | 360 x 315 | mm                     |
|                  | Max. Clamping Force | 100       | Ton                    |
|                  | Max. Open Distance  | 305       | mm                     |
|                  |                     |           |                        |

## 3. Results and Discussion

### 3.1 Adjustment of Injection Molding Parameters

Adjusting injection molding parameters is a crucial process that significantly impacts the quality of the components. In this study, the screening parameter experiments were conducted using a novel composite material prototype, with limited prior knowledge regarding the injection molding parameters. In this phase, human insight and expertise are employed to adjust the injection parameters, which are widely utilized in empirical industrial situations and are called operational techniques. The objective is to find the best-so-far parameters for product forming which is more effective than the conventional trial-and-error method.

Therefore, this research set a number of experiments up to 2,000 shots of screening to obtain the best so far for operational guideline parameters. In order to test the problem of biodegradable coffee cup injection, the initial set of parameters is outlined in Table 3 which are impact on sink mark problem solving [13-15, 17].

Table 3 Injection Parameter

| List                       | Value | Unit               |
|----------------------------|-------|--------------------|
| Melt Temperature ( $T_m$ ) | 180   | °C                 |
| Mold Temperature ( $T_w$ ) | 60    | °C                 |
| Clamping Force ( $F$ )     | 100   | Ton                |
| Injection Pressure ( $P$ ) | 54    | bar                |
| Injection Rate ( $I$ )     | 20    | cm <sup>3</sup> /s |

### 3.2 Injection of Biodegradable Coffee Cup

In the forming process stage, the biodegradable coffee cup mold is mounted on the injection molding machine using the initial parameters. Bio-plastic is injected into the mold (core and cavity), and the components are allowed to cool within the cooling time. Once cooled, the mold is opened, and the components are ejected from the mold, as shown in Figure 7. The results of the coffee cup components revealed the presence of sink marks on the cup's surface (both inside and outside), as illustrated in Figure 8.



Figure 7 Workpiece Ejection System

Upon analyzing the results, non-destructive testing (NDT), specifically visual inspection, was utilized to observe sink marks on both the internal and external surfaces of the coffee cup components. These marks were attributed to plastic injection molding surface allowances [25]. The findings suggest that the high viscosity of the biodegradable plastic material derived from coffee grounds is significantly higher than that of conventional synthetic materials. Consequently, the injection rate was increased in correlation with the injection pressure, as shown in Figure 9. This figure demonstrates that increasing the injection rate to 30 and 40 cm<sup>3</sup>/s leads to a sequential improvement in the surface quality of the coffee cup components. However, beyond a certain threshold, further increases in the injection rate resulted in a decrease in surface quality, ultimately reducing the occurrence of sink marks.

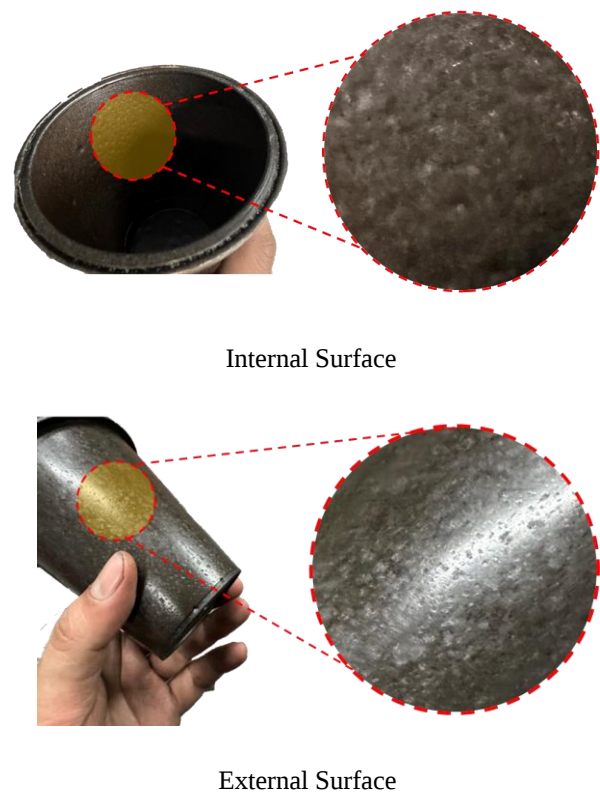


Figure 8 Sink Mark Phenomena

### 4. Conclusion

From the adjusting parameters procedure, the results indicate that the injection molding of coffee cups utilizing biodegradable plastic derived from PLA and coffee grounds mixed significantly reduces sink marks on the components through the adjustment of injection process parameters.

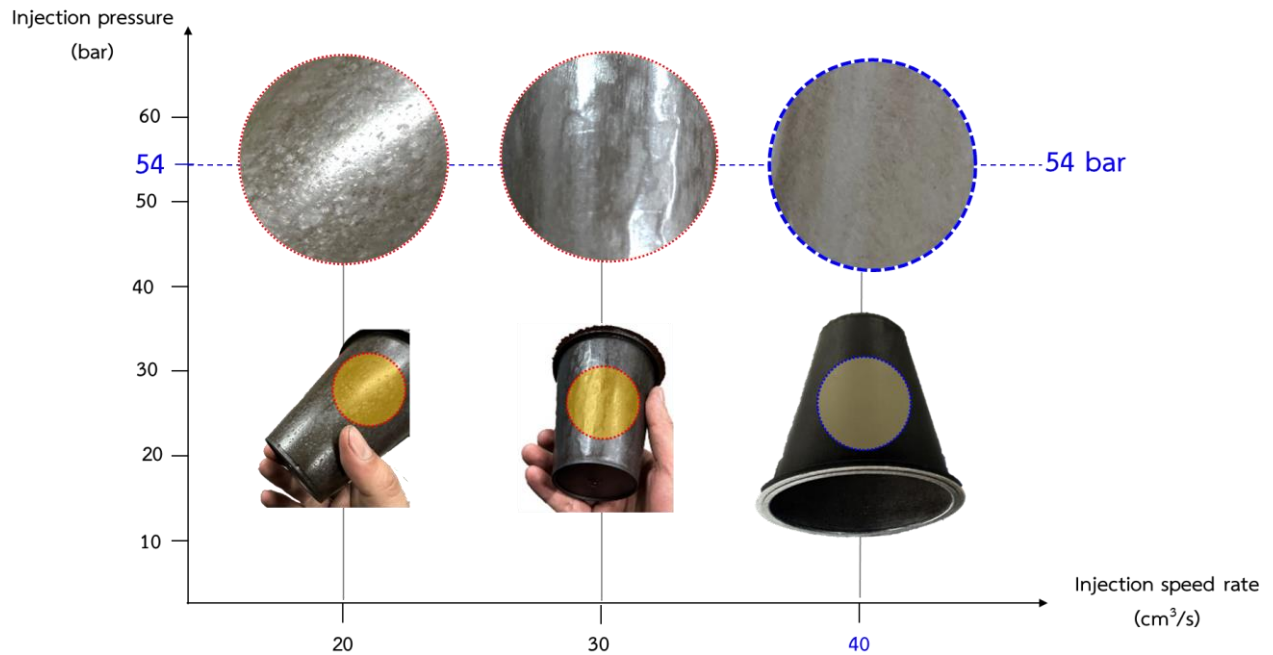


Figure 9 Sink Mark Problem Solving Result

The experiments thus demonstrated that setting the injection speed rate at 40 cm<sup>3</sup>/s and the injection pressure at 54 bar, along with a clamping force of 100 tons, a melting temperature of the material ( $T_m$ ) at 180 °C, and a mold temperature ( $T_w$ ) at 60 °C, effectively minimized sink marks, resulting in a smoother and visibly improved surface quality of the components. The adjustment of the injection speed rate has a direct impact on reducing sink marks, as the high viscosity of the material requires increased injection speed to facilitate better flow within the mold and complete filling of the mold. This clearly illustrates the relationship between injection rate and injection pressure in addressing surface quality issues of the components.

This research focused on parameter adjusting results outperform a new operational guideline to solve the quality improvement in the bio-plastic injection process which is different from [6-7] and [10-11] in terms of the material sustainable used, especially in a new eco-friendly biodegradable plastic which is difficult to form by the injection process.

## 5. Acknowledgments

The authors would like to express gratitude to Tools and Die Engineering program, Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, for providing the tools and machinery for the design and construction of the injection mold. And would also like to extend an

appreciation to Division of Packing Technology, School of Agro-Industry, Faculty of Agro-Industry, Chiang Mai University, for their assistance in developing the biodegradable plastic material containing coffee grounds for this research.

## 6. Reference

- [1] Kim MS, Chang H, Zheng L, Yan Q, Pflieger BF, Klier J, et al. A review of biodegradable plastics: chemistry, applications, properties, and future research needs. *Chem Rev.* 2023 Jul 20;123(16):9915-39.
- [2] Harkal VA, Deshmukh SP. A review on biodegradable polymers: used as packaging materials. *GSC Biol Pharm Sci.* 2023;25(2):107-15.
- [3] Filiciotto L, Rothenberg G. Biodegradable plastics: standards, policies, and impacts. *ChemSusChem.* 2021;14(1):56-72.
- [4] Chacinski T, Sutowski P. Common defects in injection molding of plastic products and their influence on product quality. *J Mech Energy Eng.* 2021;5(1):7-14.
- [5] Mahajan LD, Ulhe PN. Analysis of Injection Molding Process to Reduced Defects (Short-Shot). *Int J. Eng Technol Manag Res.* 2018;5(6):113-9.



- [6] Moayyedean M, Abhary K, Marian R. The analysis of defects prediction in injection molding. *Int J. Mech Mechatron Eng.* 2016;10(12): 1883-6.
- [7] Manokruang S, Chainawakul A. Optimal Factor Analysis in the Injection Process of High-density Polyethylene Plastic Screw Caps to Reduce Shrinkage Problems: A Case Study. *Kasem Bundit Eng J.* 2023;13(2): 162-76.
- [8] Li Y, Chen JC, Ali WM. Process optimization and in-mold sensing enabled dimensional prediction for high precision injection molding. *Int J. Interact Des Manuf (IJIDeM).* 2021:1-7.
- [9] Masato D, Kazmer DO, Panchal RR. Analysis of in-mold shrinkage measurement for amorphous and semicrystalline polymers using a multivariate sensor. *Int J. Adv Manuf Technol.* 2023;125(1-2):587-602.
- [10] Yuan S, Qiu Z. Influence mechanism of injection process parameters on iridescent pattern defects on optical molded parts. *J. Appl Polym Sci.* 2023:e55144.
- [11] Liparoti S, Speranza V, Pantani R, Titomanlio G. Modeling of the injection molding process coupled with the fast mold temperature evolution. *J. Electrochem Soc.* 2019; 166(9):B3148.
- [12] Krebelj K, Halilović M, Mole N. The cooling rate dependence of the specific volume in amorphous plastic injection molding. *Int J. Adv Manuf Technol.* 2019;103:1175-84.
- [13] Yadav R, Pancharya A, Kant R. Influence of injection and holding pressure on tribological and mechanical behavior of injection moulded thermoplastic. *Mater Today Proc.* 2021; 41:915-20.
- [14] Mohan M, Ansari MN, Shanks RA. Review on the effects of process parameters on strength, shrinkage, and warpage of injection molding plastic component. *Polym Plast Technol Eng.* 2017; 56(1):1-2.
- [15] Wang X, Zhao G, Wang G. Research on the reduction of sink mark and warpage of the molded part in rapid heat cycle molding process. *Mater Des.* 2013;47: 779-92.
- [16] Vanek J, Ovsik M, Stanek M, Hanzlik J, Pata V. Study of Injection Molding Process to Improve Geometrical Quality of Thick-Walled Polycarbonate Optical Lenses by Reducing Sink Marks. *Polymers.* 2024;16(16): 2318.
- [17] Butt MS, Bai J, Wan X, Chu C, Xue F, Ding H, Zhou G. Mechanical and degradation properties of biodegradable Mg strengthened poly-lactic acid composite through plastic injection molding. *Mater Sci Eng C.* 2017;70: 141-7.
- [18] Qin M, Chen C, Song B, Shen M, Cao W, Yang H, et al. A review of biodegradable plastics to biodegradable microplastics: another ecological threat to soil environments. *J. Clean Prod.* 2021;312:127816.
- [19] 3D4Create. PLA, ABS, Nylon & PETG Shrinkage & Compensation: Essential Facts. Available from: <http://3d4create.com/> [Accessed 10th June 2023].
- [20] Poszwa P, Brzek P, Gontarev I. Influence of processing parameters on clamping force during injection molding process. In *Advances in Manufacturing II: Mechanical Engineering.* 2019;4: 287-99.
- [21] RTP company. Molding and Processing Guidelines for PLA (Polylactic Acid) Compounds. Available from: [www.rtpcompany.com/technical-info/molding-guidelines/pla-compounds/](http://www.rtpcompany.com/technical-info/molding-guidelines/pla-compounds/) [Accessed 2024].
- [22] Rosato DV, Rosato MG. *Injection Molding Handbook.* Springer Science & Business Media; 2012. p. 12-3.
- [23] Tim A, Turg LS, Gramann P, editors. *Injection Molding Handbook.* Hanser; 2007.
- [24] Saporit A, Quadri C, Kloth N, Capdevila X. The effect of rate of injection on injection pressure profiles measured using in-line and needle-tip sensors: an in-vitro study. *Anaesthesia.* 2019 Jan; 74(1):64-8.
- [25] Mohanraj T, Sivakumar K, Pradeep T. Application of non-destructive testing in plastic injection molding. *J. Polym Eng.* 2022; 42(5): 245-58.



## ผลตอบสนองทางสถิตศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลิโนเมียลอันดับที่ห้ารับแรงดันน้ำสถิต

### Static Responses of Fifth- Order Polynomial Shaped Shell under Hydrostatic Pressure

วีรพันธุ์ เจียมมีปรีชา<sup>1\*</sup> คมกร ไชยเดชธร<sup>1</sup> เสริมศักดิ์ ดิยะแสงทอง<sup>1</sup> การันต์ คล้ายฉำ<sup>2</sup> และสิทธิศักดิ์ แจ่มนาม<sup>3</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

1 หมู่ 6 ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Weeraphan Jiammeepreecha<sup>1\*</sup>, Komkorn Chaidachatorn<sup>1</sup>, Sermsak Tiyaangthong<sup>1</sup>,  
Karun Klaycham<sup>2</sup> and Sittisak Jamnam<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan Nakhon Ratchasima

744 Suranarai Road, NaiMuang, Mueang, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus

1 Moo 6, Kamphaeng Saen, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom, Thailand, 73140

<sup>3</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, Thailand, 10800

\*ผู้รับผิดชอบบทความ: weeraphan.ji@rmu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 09-1779-0935

Received: 26 March 2024, Revised: 22 August 2024, Accepted: 22 August 2024

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลตอบสนองทางสถิตศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลิโนเมียลอันดับที่ห้ารับแรงดันน้ำสถิต การคำนวณหารูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างเปลือกบางฟังก์ชันโพลิโนเมียลอันดับที่ห้าจะอาศัยหลักการของเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์แบบจำลองโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลิโนเมียลอันดับที่ห้าสร้างได้โดยใช้ชิ้นส่วนของคานฟังก์ชันโพลิโนเมียลอันดับที่ห้าแบบ 1 มิติแบ่งตามแนวรัศมี การศึกษาครั้งนี้จะทำการแบ่งโครงสร้างเปลือกบางออกเป็น 2 ช่วงเพื่อป้องกันค่าอนุพันธ์  $dZ/dr=\infty$  และลดค่าความเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ตำแหน่งระนาบอิกซ์เตอร์ ที่จุดต่อทั้ง 2 ช่วงจะกำหนดให้ค่าการเคลื่อนตัวและความลาดชันมีความต่อเนื่องกัน ฟังก์ชันพลังงานของโครงสร้างเปลือกบางสามารถคำนวณได้ใช้หลักการของงานเสมือน และใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณหาผลตอบสนองทางสถิตศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบาง ผลการศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงความลึกของระดับน้ำทะเล ความหนาและโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างเปลือกบางจะส่งผลต่อค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลิโนเมียลอันดับที่ห้า



**คำสำคัญ** ผลตอบสนองทางสถิตศาสตร์ โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า แรงดันน้ำสถิต เรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ หลักการของงานเสมือน

## Abstract

This paper presents the static responses of the fifth-order polynomial shaped shell that supports the hydrostatic pressure. The geometry of the fifth-order polynomial shaped shell was computed by the differential geometry. The model of fifth-order polynomial shaped shell was designed by using one-dimensional beam elements, which divided along the shell radius. In this study, the shell was separated into 2 regions for preventing  $dZ/dr=\infty$  and reducing the errors of result at equator plane. At the junction of two regions, was defined the function values, of displacements and continuous slopes. The energy function of the shell can be derived by the principle of virtual work, and the static responses of the shell can be obtained by the finite element method. The results indicate that the sea level, shell thickness, and elastic modulus affect the displacement of the fifth-order polynomial shaped shell.

**Keywords:** Static Response, Fifth-Order Polynomial Shaped Shell, Hydrostatic Pressure, Differential Geometry, Principle of Virtual Work

## 1. บทนำ

งานวิจัยทางด้านกลศาสตร์โครงสร้างเปลือกบางได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีขนาดน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับความสามารถในการรับแรงกระทำจากภายนอกและภายใน [1–2] การวิเคราะห์โครงสร้างเปลือกบางจะนิยมกำหนดให้เป็นปัญหาโครงสร้างที่มีลักษณะสมมาตรตามแนวแกน เช่น โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงกลม รูปทรงพาราโบลา รูปทรงห้ววยาง รูปทรงกระบอก และรูปทรงกรวย เป็นต้น [3–10] ในบางกรณี โครงสร้างเปลือกบางอาจจะมีรูปแบบผสมเช่นในงานวิจัยของ Shi and Ohtsu [11] ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ปัญหาแบบขอบเขตจำกัดโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์แบบเชิงเส้นของโครงสร้างเปลือกบางสำหรับบรรจุของเหลวรูปทรงกรวยผสมกับรูปทรงกระบอกโดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบและผลการคำนวณเชิงตัวเลข Zingoni [12] ได้ทำการศึกษาความเค้นและค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงไข่สำหรับบรรจุของเหลวโดยใช้ส่วนของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงกลมทั้งหมด 4 ส่วนย่อย และใช้ทฤษฎีเมมเบรนในการวิเคราะห์ จากนั้น Zingoni et al. [13] ได้ทำการพัฒนาสมการเพื่อใช้ศึกษาความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงกลมที่มีหลายชิ้นส่วนย่อยประกอบกัน จนกระทั่ง

ในปี 2020 ได้เริ่มมีการนำทฤษฎีเชลล์มาใช้ในการวิเคราะห์ช่วงรอยต่อระหว่างชิ้นส่วนย่อยในงานวิจัยของ Zingoni et al. [14–15] นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงอื่น ๆ อีกเช่นแบบจำลองโครงสร้างตาในงานวิจัยของ Yeh et al. [16–17] และเลนส์กระจกตาในงานของ Chen et al. [18] เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการผ่าตัดของจักษุแพทย์ ดังนั้นบทความวิจัยนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์โครงสร้างเปลือกบางที่สามารถนิยามรูปทรงทางเรขาคณิตได้ด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้าโดยพิจารณาผลของเมมเบรนและโมเมนต์ดัดซึ่งยังไม่มีมีการศึกษามาก่อน สมการที่ได้จากบทความนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงอื่น ๆ ได้ตามความเหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับรูปทรงของโครงสร้างเปลือกบางที่ไม่สามารถนิยามได้ด้วยฟังก์ชันทั่วไป เช่น โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงกลม รูปทรงกรวย รูปทรงกระบอก และรูปทรงพาราโบลา เป็นต้น

สำหรับการประยุกต์ใช้โครงสร้างดังกล่าวในงานวิศวกรรมนอกชายฝั่งทะเลโดยโครงสร้างดังกล่าวจะถูกติดตั้งลงในทะเลลึก ดังนั้นแรงดันน้ำสถิตจึงถูกนำมาใช้ในสมการแปรรูปสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาด้วย ซึ่งลักษณะปัญหาดังกล่าวได้เคยถูกนำเสนอในงานวิจัยของ Yasuzawa [19] และ Wang et al. [20] ได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของ

โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงกลมรับแรงดันน้ำสถิต จากนั้น Jiammeepreecha et al. [21] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงกลมภายใต้แรงดันน้ำสถิตโดยพิจารณาผลของของเหลวที่บรรจุภายใน สำหรับโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงอื่น ๆ ได้ถูกนำเสนอในงานวิจัยของ Jiammeepreecha and Chucheeepsakul [22] และ Tangbanjongkij et al. [23] การคำนวณหารูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างเปลือกบางฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้าจะใช้หลักการของเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ [24] การสร้างแบบจำลองโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้าสามารถทำได้โดยใช้ชิ้นส่วนของคานาฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้าแบบ 1 มิติแบ่งตามแนวรัศมี [25] โดยแบ่งโครงสร้างเปลือกบางออกเป็น 2 ช่วงเพื่อป้องกันค่าอนุพันธ์  $dZ/dr = \infty$  และเพื่อลดค่าความเคลื่อนที่ของผลลัพธ์ตำแหน่งระนาบอิกเวเตอร์ที่จุดต่อทั้ง 2 ช่วงจะกำหนดให้ค่าการเสียรูปและความลาดชันมีความต่อเนื่องกัน [26] ฟังก์ชันพลังงานของโครงสร้างเปลือกบางเขียนได้โดยใช้หลักการของงานเสมือน [27] และใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณหาผลตอบสนองทางสถิตศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้าภายใต้แรงดันน้ำสถิต

## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 สมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์

วัสดุของโครงสร้างเปลือกบางมีคุณสมบัติยืดหยุ่นแบบเชิงเส้น และความหนาของโครงสร้างไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งก่อนและหลังการเสียรูป ฐานรองรับโครงสร้างเปลือกบางจะสมมติให้เป็นแบบยึดแน่นอย่างสมบูรณ์ โดยที่น้ำหนักของโครงสร้างมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงดันสถิตของน้ำจึงไม่นำมาพิจารณาในการศึกษาครั้งนี้ รวมถึงค่าแรงดันวิกฤติของโครงสร้าง

### 2.2 เรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ของโครงสร้างเปลือกบาง

การวิเคราะห์โครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้าภายใต้แรงดันน้ำสถิตสามารถทำได้โดยการกำหนดให้พื้นผิว  $S$  เป็นพื้นผิวอ้างอิง (Reference Surface) ที่สามารถนิยามได้ดังสมการ

$$\mathbf{r} = X\mathbf{i} + Y\mathbf{j} + Z\mathbf{k} \quad (1)$$

โดยที่  $X, Y, Z$  คือระบบพิกัดฉากสำหรับนิยามพื้นผิวที่สถานะอ้างอิง มีค่าดังสมการที่ (2)

$$X = r(x) \cos y \quad (2ก)$$

$$Y = r(x) \sin y \quad (2ข)$$

$$Z = Z(x) \quad (2ค)$$

เมื่อ  $x$  และ  $y$  คือค่าพารามิเตอร์ของพื้นผิวโดยวัดตามแนวแกนรัศมีและเส้นพิกัดลองจิจูด ตามลำดับ จากรูปที่ 1 พบว่าถ้าใช้พิกัด  $\mathbf{r} = x$  ในการวิเคราะห์พบว่าจะเกิดค่าอนุพันธ์  $dZ/dr = \infty$  ที่ตำแหน่งอิกเวเตอร์ ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวและลดค่าความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ตำแหน่งระนาบอิกเวเตอร์ จึงได้ทำการแบ่งโครงสร้างเปลือกบางออกเป็น 2 ช่วงคือช่วง A และ B โดยมีค่าพารามิเตอร์เรขาคณิตได้แก่  $\alpha$  และ  $\beta$  โดยในช่วง A และ B จะได้ว่า  $Z = Z(r)$  และ  $\varphi = \varphi(\zeta)$  ตามลำดับ ดังนั้นสมการที่ (1) จะได้ค่าพิกัดของโครงสร้างเปลือกบางในช่วง A ดังสมการที่ (3)

$$\mathbf{r} = X \quad (3ก)$$

$$X = x \cos y \quad (3ข)$$

$$Y = x \sin y \quad (3ค)$$

$$Z = Z(x) \quad (3ง)$$

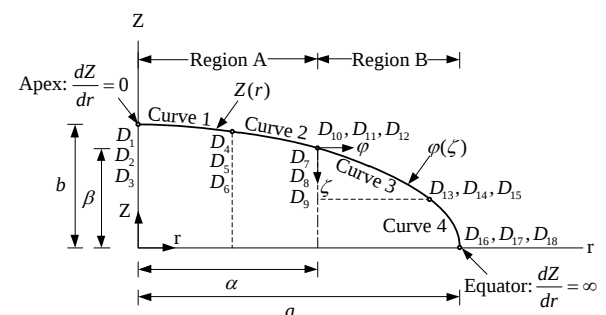
สำหรับช่วง B สามารถเขียนค่าพิกัดของโครงสร้างเปลือกบางได้ดังสมการที่ (4)

$$\mathbf{r} = \alpha + \varphi(\zeta) \quad (4ก)$$

$$X = (\alpha + \varphi) \cos y \quad (4ข)$$

$$Y = (\alpha + \varphi) \sin y \quad (4ค)$$

$$Z = \beta - \zeta \quad (4ง)$$



รูปที่ 1 รูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างเปลือกบาง



จากสมการที่ (1) ผลรวมเชิงอนุพันธ์ของความยาวชิ้นส่วน  $\mathbf{r}$  สามารถหาได้ดังสมการที่ (5)

$$d\mathbf{r} = r_x dx + r_y dy \quad (5)$$

ในที่นี้ตัวห้อย  $x$  และ  $y$  แสดงถึงอนุพันธ์ย่อยตามแนวระบบพิกัดของโครงสร้างเปลือกบาง นั่นคือ  $\mathbf{r}_x = \partial \mathbf{r} / \partial x$  และ  $\mathbf{r}_y = \partial \mathbf{r} / \partial y$  ตามลำดับ จากหลักการเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์สามารถแสดงส่วนประกอบของเมตริกซ์เทนเซอร์ (Metric Tensor) ได้ดังสมการที่ (6)

$$\mathbf{E} = \mathbf{r}_x \cdot \mathbf{r}_x \quad (6ก)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{r}_x \cdot \mathbf{r}_y \quad (6ข)$$

$$\mathbf{G} = \mathbf{r}_y \cdot \mathbf{r}_y \quad (6ค)$$

กำหนดให้  $\mathbf{A} = \sqrt{\mathbf{E}}$  และ  $\mathbf{B} = \sqrt{\mathbf{G}}$  ดังนั้นสมการที่ (6ก) และ (6ค) ของโครงสร้างเปลือกบางในช่วง A สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (7)

$$\mathbf{A} = \sqrt{1 + Z_x^2} \quad (7ก)$$

$$\mathbf{B} = x \quad (7ข)$$

และในช่วง B สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (8)

$$\mathbf{A} = \sqrt{1 + \varphi_\xi^2} \quad (8ก)$$

$$\mathbf{B} = \alpha + \varphi \quad (8ข)$$

สำหรับเมตริกซ์ความโค้ง (Metric Curvature) ของพื้นผิวอ้างอิง  $\mathbf{S}$  สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (9)

$$\mathbf{L} = \mathbf{r}_{xx} \cdot \hat{\mathbf{n}} \quad (9ก)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{r}_{xy} \cdot \hat{\mathbf{n}} \quad (9ข)$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{r}_{yy} \cdot \hat{\mathbf{n}} \quad (9ค)$$

เมื่อ  $\hat{\mathbf{n}}$  คือเวกเตอร์ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวอ้างอิง  $\mathbf{S}$  ซึ่งหาได้จากสมการที่ (10)

$$\hat{\mathbf{n}} = \frac{\mathbf{r}_x \times \mathbf{r}_y}{AB} \quad (10)$$

### 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับกระบวนการเสีรูป

เวกเตอร์ระบุตำแหน่ง  $\mathbf{R}$  บนพื้นผิวที่เกิดการเสีรูป  $\mathbf{S}^*$  โดยอ้างอิงจากตำแหน่งของเวกเตอร์ระบุตำแหน่ง  $\mathbf{r}$  บนพื้นผิว

ที่อ้างอิง  $\mathbf{S}$  ที่ตำแหน่งเดียวกันสามารถนิยามได้ดังสมการที่ (11)

$$\mathbf{R} = \mathbf{r} + \mathbf{q} \quad (11)$$

เมื่อ  $\mathbf{q}$  คือเวกเตอร์การเสีรูปจากพื้นผิวอ้างอิง  $\mathbf{S}$  ไปยังพื้นผิวที่เกิดการเสีรูป  $\mathbf{S}^*$  ซึ่งหาได้จากสมการที่ (12)

$$\mathbf{q} = \frac{r_x}{\sqrt{E}} \mathbf{u} + \frac{r_y}{\sqrt{G}} \mathbf{v} + \hat{\mathbf{n}} w \quad (12)$$

เมื่อ  $(\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w})$  คือองค์ประกอบค่าการเสีรูปตามแนวสัมผัสกับเส้นเมอร์ริเดียน แนวเส้นรอบรูป และแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียน ตามลำดับ ในกรณีที่ปัญหาแบบสมมาตรตามแนวแกน จะกำหนดให้ค่าการเสีรูปตามแนวเส้นรอบรูปมีค่าเป็นศูนย์ ( $\mathbf{v} = 0$ ) ดังนั้นสมการที่ (12) จะมีการพิจารณาค่าการเสีรูปเฉพาะแนวสัมผัสกับเส้นเมอร์ริเดียนและแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียน เท่านั้น สำหรับส่วนประกอบของเมตริกซ์เทนเซอร์ของพื้นผิวที่เสีรูป  $\mathbf{S}^*$  สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (13)

$$\mathbf{E}^* = \mathbf{R}_x \cdot \mathbf{R}_x \quad (13ก)$$

$$\mathbf{F}^* = \mathbf{R}_x \cdot \mathbf{R}_y \quad (13ข)$$

$$\mathbf{G}^* = \mathbf{R}_y \cdot \mathbf{R}_y \quad (13ค)$$

กำหนดให้  $\{\mathbf{g}\}^T = \left[ u w \frac{du}{dx} \frac{dw}{dx} \frac{d^2u}{dx^2} \frac{d^2w}{dx^2} \right]$  ดังนั้นความสัมพันธ์ของความเครียดกับกระบวนการเสีรูปตามนิยามความเครียดแบบลากรองจ์ (Lagrangian Strains) [28] มีค่าดังสมการที่ (14)

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = \mathbf{L}_k^i \mathbf{g}_k \quad (14)$$

เมื่อ  $\mathbf{L}_k^i$  คือเวกเตอร์ความเครียดแบบโทลลากรองจ์ มีค่าดังสมการที่ (15)

$$\{\mathbf{L}_1\}^T = \left[ 0 \quad -\frac{L}{E} \quad \frac{1}{A} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right] \quad (15ก)$$

$$\{\mathbf{L}_2\}^T = \left[ \frac{B_x}{AB} \quad -\frac{N}{G} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right] \quad (15ข)$$

สำหรับค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความโค้งหลักของพื้นผิวที่กึ่งกลางความหนาของโครงสร้างเปลือกบางเนื่องจากผลของการตัดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (16)

$$\boldsymbol{\kappa}_i = \mathbf{S}_k^i \mathbf{g}_k \quad (16)$$



เมื่อ  $S_k^i$  คือเวกเตอร์ค่าความโค้งหลัก มีค่าดังสมการที่ (17)

$$\{S_1\}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{A_x}{A^3} & 0 & -\frac{1}{A^2} \end{bmatrix} \quad (17ก)$$

$$\{S_2\}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{B_x}{A^2 B} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17ข)$$

#### 2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบาง

การจำลองโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียล ดังแสดงในรูปที่ 2 จะสามารถนิยามได้โดยใช้สมการฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า ดังสมการที่ (18)

$$y = [1 \quad x \quad x^2 \quad x^3 \quad x^4 \quad x^5] \{a\} \quad (18)$$

เมื่อ  $\{a\}$  คือเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันโพลีโนเมียล มีค่าดังสมการที่ (19)

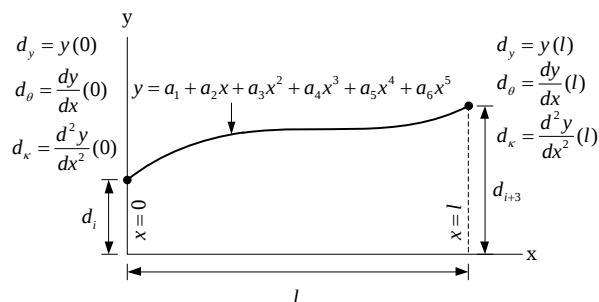
$$\{a\} = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad a_5 \quad a_6]^T \quad (19)$$

จากสมการที่ (18) สามารถเขียนใหม่ได้ว่าดังสมการที่ (20)

$$\{d\} = [C_0] \{a\} \quad (20)$$

เมื่อ  $\{d\}$  คือเวกเตอร์ดีกรีอิสระเฉพาะที่ (Local Degree of Freedom) มีค่าดังสมการที่ (21)

$$\{d\}^T = \begin{bmatrix} y(0) \frac{dy}{dx}(0) \frac{d^2y}{dx^2}(0) \dots \\ \dots y(l) \frac{dy}{dx}(l) \frac{d^2y}{dx^2}(l) \end{bmatrix} \quad (21)$$



รูปที่ 2 พิกัดเฉพาะที่ของชิ้นส่วนย่อยฟังก์ชันโพลีโนเมียล

และ  $[C_0]$  คือเมตริกซ์จัตุรัสซึ่งมีค่าดังสมการที่ (22)

$$[C_0] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & l^2 & l^3 & l^4 & l^5 \\ 0 & 1 & 2l & 3l^2 & 4l^3 & 5l^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6l & 12l^2 & 20l^3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

จากสมการที่ (18) และ (21) จะได้สมการที่ (23)

$$y = [M_1 \quad M_2 \quad M_3 \quad M_4 \quad M_5 \quad M_6] \{d\} \quad (23)$$

ในที่นี้

$$M_1 = 1 - 10 \frac{x^3}{l^3} + 15 \frac{x^4}{l^4} - 6 \frac{x^5}{l^5} \quad (24ก)$$

$$M_2 = x - 6 \frac{x^3}{l^2} + 8 \frac{x^4}{l^3} - 3 \frac{x^5}{l^4} \quad (24ข)$$

$$M_3 = \frac{1}{2} x^2 - \frac{3}{2} \frac{x^3}{l} + \frac{3}{2} \frac{x^4}{l^2} - \frac{1}{2} \frac{x^5}{l^3} \quad (24ค)$$

$$M_4 = 10 \frac{x^3}{l^3} - 15 \frac{x^4}{l^4} + 6 \frac{x^5}{l^5} \quad (24ง)$$

$$M_5 = -4 \frac{x^3}{l^2} + 7 \frac{x^4}{l^3} - 3 \frac{x^5}{l^4} \quad (24จ)$$

$$M_6 = \frac{1}{2} \frac{x^3}{l^4} - \frac{x^4}{l^2} + \frac{1}{2} \frac{x^5}{l^3} \quad (24ฉ)$$

#### 2.5 พลังงานความเครียดของโครงสร้างเปลือกบาง

ค่าพลังงานความเครียดของโครงสร้างเปลือกบาง จะแบ่งออกเป็น 2 เทอมคือเมมเบรน (Membrane Strain Energy,  $U_m$ ) และการดัด (Bending Strain Energy,  $U_b$ ) มีค่าดังสมการที่ (25)

$$U_m = \frac{1}{2} \int_{x_1}^{x_2} \{\varepsilon\}^T [C'] \{\varepsilon\} dx \quad (25ก)$$

$$U_b = \frac{1}{2} \int_{x_1}^{x_2} \{\kappa\}^T [D'] \{\kappa\} dx \quad (25ข)$$

เมื่อ  $[C']$  และ  $[D']$  คือเมตริกซ์ความแข็งแกร่งเนื่องจากการยืดหดตัว (Extensional Rigidity) และ การดัด (Bending Rigidity) ตามลำดับ มีค่าดังสมการที่ (26)

$$[C'] = \frac{E't}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu \\ \mu & 1 \end{bmatrix} \quad (26ก)$$

$$[D'] = \frac{E't^3}{12(1-\mu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \mu \\ \mu & 1 \end{bmatrix} \quad (26ข)$$

ดังนั้นการแปรผันของพลังงานความเครียดในเทอมเมมเบรน และการดัด สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (27)

$$\delta U_m = \int_{x_1}^{x_2} \delta \{g\}^T [\tilde{k}_m] \{g\} dx \quad (27ก)$$

$$\delta U_b = \int_{x_1}^{x_2} \delta \{g\}^T [\tilde{k}_b] \{g\} dx \quad (27ข)$$

ในที่นี้

$$[\tilde{k}_m] = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 C'_{ij} (\{L_i\} \{L_j\}^T) \quad (28ก)$$

$$[\tilde{k}_b] = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 D'_{ij} (\{S_i\} \{S_j\}^T) \quad (28ข)$$

## 2.6 งานเสมือนที่เกิดจากแรงดันน้ำสถิตแบบเชิงเส้น

งานเสมือนเนื่องจากแรงดันน้ำสถิตแบบเชิงเส้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (29ก)

$$\delta\Omega = - \int_{x_1}^{x_2} p_w \{\delta w\} AB dx \quad (29ก)$$

เมื่อ  $p_w$  คือค่าแรงดันน้ำสถิตแบบเป็นเชิงเส้น (Linear Hydrostatic Pressure) ที่กระทำในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของโครงสร้างเปลือกบางสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (29ข)

$$p_w = \rho_w g' Z_w \quad (29ข)$$

เมื่อ  $\rho_w$  คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำ,  $kg/m^3$

$g'$  คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก,  $m/s^2$

$Z_w$  คือ ระยะในแนวตั้งวัดจากระดับน้ำผิวน้ำ,  $m$

## 2.7 ผลรวมของงานเสมือน

การคำนวณหาผลตอบสนองทางสถิตศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้ารับแรงดันน้ำสถิตจะได้จากผลรวมของงานเสมือน ดังสมการที่ (30)

$$\delta U_m + \delta U_b - \delta\Omega = 0 \quad (30)$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าจากสมการที่ (27) และ (29ก) ลงไปในสมการที่ (30) จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (31)

$$\int_{x_1}^{x_2} \delta\{g\}^T ([\tilde{k}_m] + [\tilde{k}_b]) \{g\} dx + \int_{x_1}^{x_2} p_w \{\delta w\} AB dx = 0 \quad (31)$$

## 2.8 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เนื่องจากพฤติกรรมผลตอบสนองทางสถิตศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้าถูกนำมาพิจารณาภายใต้เงื่อนไขของการรับแรงดันน้ำสถิต จะทำให้พื้นผิวของโครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะเส้นเมอร์ริเดียนเท่านั้น ดังนั้นในการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [25] สามารถทำได้โดยการจำลองโครงสร้างเปลือกบางด้วยชิ้นส่วนของคานแบบ 1 มิติ และแบ่งเป็นชิ้นส่วนของโครงสร้างเปลือกบางออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ ตามแนวพิกัด  $x$  ดังแสดงในรูปที่ 3 ดังนั้นเมื่อพิจารณาชิ้นส่วนใด ๆ จะได้ว่าค่าการประมาณค่าการเคลื่อนที่ ณ จุดต่าง ๆ บนชิ้นส่วนย่อยจะสามารถทำได้โดยการกำหนดให้แต่ละจุดหัวของ

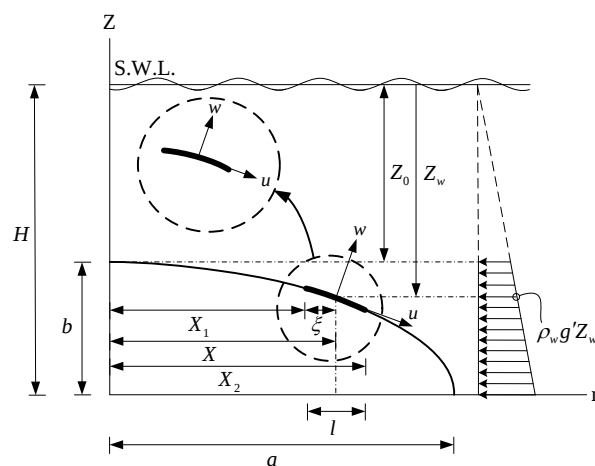
ชิ้นส่วนย่อยมีดิกิริอิสระเท่ากับ 6 และใช้ฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้าเป็นฟังก์ชันการเคลื่อนที่เพื่อหาฟังก์ชันรูปร่างและประมาณค่าการเสียรูปในแนวสัมผัส  $u$  และแนวตั้งฉาก  $w$  ได้ดังสมการที่ (32)

$$\{g\} = [\psi] \{d\} \quad (32)$$

เมื่อ  $\{g\}$  คือ เวกเตอร์การเคลื่อนที่ที่จุดต่อ

$\{d\}$  คือ เวกเตอร์ของดิกิริอิสระที่จุดต่อ

$[\psi]$  คือ เมตริกซ์ฟังก์ชันรูปร่างโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า



รูปที่ 3 โครงสร้างเปลือกบางฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้าภายใต้แรงดันน้ำสถิตแบบเชิงเส้น

จากนั้นทำการแทนค่าสมการที่ (32) ลงไปในสมการที่ (31) จะได้ดังสมการที่ (33)

$$\{\delta d\}^T \int_{x_1}^{x_2} [\psi]^T [\tilde{k}] [\psi] dx \{d\} + \{f\} = 0 \quad (33)$$

ในที่นี้

$$[\tilde{k}] = [\tilde{k}_m] + [\tilde{k}_b] \quad (34ก)$$

$$\{f\} = \{\delta w\}^T \int_{x_1}^{x_2} p_w \{\psi\} AB dx \quad (34ข)$$

เนื่องจากดิกิริอิสระเฉพาะที่  $\{d\}$  เหมือนกับดิกิริอิสระรวม  $\{Q\}$  ดังนั้นสมการที่ (33) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (35)

$$[K] \{Q\} + \{F\} = 0 \quad (35)$$

เนื่องจากโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้าที่มีความสมมาตรตามแนวแกนถูกนำมาพิจารณา



ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตที่ตำแหน่งบนสุดของโครงสร้างเปลือกบางจะมีค่าดังสมการที่ (36)

$$u = w_x = 0 \quad (36)$$

สำหรับเงื่อนไขที่บริเวณฐานรองรับจะพิจารณาให้เป็นแบบยึดแน่นดังสมการที่ (37)

$$u = w = w_\zeta = 0 \quad (37)$$

และเงื่อนไขของความต่อเนื่องที่เปลี่ยนจากช่วง A ไปเป็นช่วง B จะมีค่าดังสมการที่ (38)

$$u^A - u^B = 0 \quad (38ก)$$

$$w^A - w^B = 0 \quad (38ข)$$

$$\frac{u_x^A}{\sqrt{1+Z_x^2}} - \frac{u_x^B}{\sqrt{1+\varphi_x^2}} = 0 \quad (38ค)$$

$$\frac{w_x^A}{\sqrt{1+Z_x^2}} - \frac{w_x^B}{\sqrt{1+\varphi_x^2}} = 0 \quad (38ง)$$

เงื่อนไขของความต่อเนื่องในสมการที่ (38) สามารถแก้สมการได้โดยอาศัยหลักการของตัวคูณลากรองจ์ (Lagrange's multipliers) โดยจะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (39)

$$\pi_c = \{\lambda\}^T [G] \{Q\} \quad (39)$$

ในที่นี้

$$\{\lambda\}^T = [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \quad \lambda_4] \quad (40ก)$$

$$\{Q\}^T = \begin{bmatrix} u^A w^A u_x^A w_x^A \dots \\ \& \dots u^B w^B u_\zeta^B w_\zeta^B \end{bmatrix} \quad (40ข)$$

$$[G] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{1+Z_x^2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{1+Z_x^2}} \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{1+\varphi_\zeta^2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{1+\varphi_\zeta^2}} \end{bmatrix} \quad (40ค)$$

ที่สภาวะสมดุลจะได้ว่า  $\delta\pi_c = (\partial\pi_c/\partial\lambda)\delta\lambda = 0$  โดยที่  $\delta\lambda \neq 0$  นั่นคือ  $\partial\pi_c/\partial\lambda = [G]\{Q\} = 0$  เมื่อนำไปรวมกับสมการที่ (31) จะได้ดังสมการที่ (41)

$$\begin{bmatrix} [K] & | & [G] \\ \hline [G]^T & | & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{Q\} \\ \{\lambda\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (41)$$

ในกรณีที่ต้องการคำนวณค่าแรงภายในได้แก่ แรงในระนาบ (Membrane Forces) และโมเมนต์ (Bending Moment) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (14) และ (16) ร่วมกับค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้น สำหรับการหาค่าความเครียดและการเปลี่ยนแปลงความโค้งหลัก ตามลำดับ จากนั้นสามารถคำนวณค่าแรงในระนาบและโมเมนต์ได้โดยใช้สมการแสดงพฤติกรรมของวัสดุ (Constitutive Equation) [24]

### 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

สำหรับการนำเสนอผลการวิเคราะห์ทางสถิตศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้ารับแรงดันน้ำสถิต จะเริ่มต้นจากการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันโพลีโนเมียลในสมการที่ (19) โดยในที่นี้จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ A และ B ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยที่ค่าดิกิริอิสระเฉพาะที่  $d_1, d_2$  และ  $d_3$  สำหรับชิ้นส่วนลำดับต่อไปที่ติดกันจะเท่ากับดิกิริอิสระเฉพาะที่  $d_4, d_5$  และ  $d_6$  ของชิ้นส่วนเดิม ตามลำดับ นอกจากนี้สมการของเส้นโค้งจะต้องมีเงื่อนไขขอบเขตที่จุดปลายบนสุด (Apex) ดังสมการที่ (42)

$$D_2 = 0 \quad (42ก)$$

$$\frac{D_3}{(1+D_2^2)^{3/2}} = \frac{1}{r_1} \quad (42ข)$$

เมื่อ  $1/r_1$  คือค่าความโค้ง (Curvature) ณ ตำแหน่งจุดปลายบนสุด สำหรับค่าดิกิริอิสระรวมที่เปลี่ยนจากช่วง A ไปเป็นช่วง B นั่นคือ  $D_7, D_8, D_9$  และ  $D_{10}, D_{11}, D_{12}$  จะต้องมีความต่อเนื่องกันทั้ง 3 ค่า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขของความต่อเนื่อง (Continuity Constraint Conditions) ดังสมการที่ (43)

$$D_{10} = 0 \quad (43ก)$$

$$D_8 D_{11} + 1 = 0 \quad (43ข)$$



การกำหนดเงื่อนไข  $D_{10}=0$  และ  $D_8D_{11}+1=0$  เพื่อให้เกิดความต่อเนื่องระหว่างสมการเส้นโค้งที่ 2 และ 3 ภายใต้การเปลี่ยนแปลงทิศทางของระบบแกนอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นจากเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขของความต่อเนื่องดังกล่าวข้างต้น จะสามารถกำหนดสมการเส้นโค้งได้ดังสมการที่ (44)

$$y_1=1.5-0.0375x^2-0.03x^3+0.04x^4-0.015x^5 \quad (44ก)$$

$$y_2=1.40297-0.15469x-0.13875x^2+0.045x^3-0.003x^4-0.002x^5 \quad (44ข)$$

$$\varphi_3=2.79086x-1.75x^2-13.9x^3+47.9x^4-43.7x^5 \quad (44ค)$$

$$\varphi_4=0.83907+1.008x-4.60023x^2+18.35x^3-35.6244x^4+24.45x^5 \quad (44ง)$$

ในที่นี้เมื่อทำการแทนค่า  $x=0$  ลงในสมการที่ (44ค) จะได้  $\varphi_3=0$  สอดคล้องกับเงื่อนไข  $D_{10}=0$  และเมื่อทำการแทนค่า  $x=\alpha/2$  และ  $x=0$  ลงในสมการที่ (44ข) และ (44ค) ตามลำดับ จะพบว่าผลคูณค่าความชันของเส้นโค้งจะมีสอดคล้องกับเงื่อนไข  $D_8D_{11}+1=0$  ซึ่งทำให้เส้นโค้งมีค่าความชันความต่อเนื่อง

สำหรับโปรแกรมการวิเคราะห์ทางสถิติศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้ารับแรงดันน้ำสถิตจากภายนอกจะถูกเขียนบน MATLAB 2015b โดยเริ่มต้นจากการทดสอบระยะการเสียรูปที่ปลายด้านบนสุดของโครงสร้างเพื่อหาค่าจำนวนชิ้นส่วนย่อยที่เหมาะสม โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 ในที่นี้กำหนดให้จำนวนชิ้นส่วนย่อยในช่วง B มีค่าเป็น 2 เท่าของช่วง A เพื่อป้องกันผลของความคลาดเคลื่อนตรงบริเวณฐานรองรับ จากตารางที่ 2 พบว่าเมื่อจำนวนชิ้นส่วนย่อยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลง ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าไม่เกินร้อยละ 0.05 เมื่อเทียบกับการเลือกใช้จำนวนชิ้นส่วนย่อยที่สูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้จำนวนชิ้นส่วนย่อย

ในช่วง A และ B จำนวน 10 และ 20 ชิ้น ตามลำดับ ซึ่งมีจำนวนชิ้นส่วนย่อยทั้งหมด 30 ชิ้นส่วน จากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ และศึกษาผลตอบสนองทางสถิติศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้ารับแรงดันน้ำสถิตจากภายนอก โดยทำการแปรเปลี่ยนค่าระดับน้ำ ความหนาและโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างเปลือกบาง ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโครงสร้าง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการเปรียบเทียบกับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS [29] โดยใช้ชิ้นส่วนแบบจำลอง SAX2 ซึ่งเป็นการประมาณค่าการเคลื่อนที่แบบฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับสอง (Axisymmetric Quadratic Shell) จำนวน 24 ชิ้นส่วนย่อย พบว่ารูปร่างของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้ารับแรงดันน้ำสถิตจะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4 เนื่องจากค่าการเสียรูปของโครงสร้างเปลือกบางมีค่าน้อย ดังนั้นในบทความนี้จึงได้ทำการคูณขยายค่าการเสียรูปเพิ่มขึ้น (Displacement Amplification Factor) เท่ากับ 100 เพื่อให้เห็นรูปร่างของโครงสร้างเปลือกบางภายหลังการเสียรูปมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าระยะการเสียรูปที่ปลายด้านบนสุดของโครงสร้างจะพบว่ามีค่าความแตกต่างอยู่ที่ร้อยละ 0.45 ซึ่งถือว่าน้อยมาก นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบระยะการเสียรูปในแนวราบและแนวตั้งของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า พบว่ามีค่าแตกต่างเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 5 อย่างไรก็ตามการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS จะพบว่ามีข้อจำกัดในหลายประการเช่นไม่สามารถคำนวณหาค่าการเสียรูปตามแนวสัมผัสกับเส้นเมอร์ริเดียนและแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียนได้โดยตรง ซึ่งค่าการเสียรูปทั้งสองถือเป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์โครงสร้างเปลือกบางเชิงลึกซึ่งจะกล่าวถึงในลำดับต่อไป

ตารางที่ 1 ข้อมูลและสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์

| รายการ                          | ปริมาณ                          |
|---------------------------------|---------------------------------|
| 1. ความหนาของโครงสร้างเปลือกบาง | 0.05 เมตร                       |
| 2. ความลึกของระดับน้ำ           | 50 เมตร                         |
| 3. โมดูลัสยืดหยุ่น              | $2 \times 10^{11}$ ปาสคาล       |
| 4. อัตราส่วนปัวส์ซอง            | 0.3                             |
| 5. ความหนาแน่นของน้ำ            | 1000 กิโลกรัม/เมตร <sup>3</sup> |

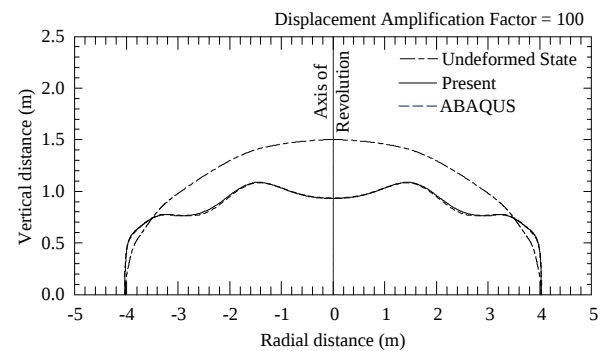
ตารางที่ 2 การทดสอบการลู่เข้าของระยะการเสียรูปที่ปลายด้านบนของโครงสร้างเปลือกบาง

| จำนวนชิ้นส่วนย่อย | ระยะการเสียรูป (เมตร) |
|-------------------|-----------------------|
| 6                 | -0.005439             |
| 12                | -0.005646             |
| 18                | -0.005687             |
| 24                | -0.005699             |
| 30                | -0.005703             |
| 36                | -0.005705             |

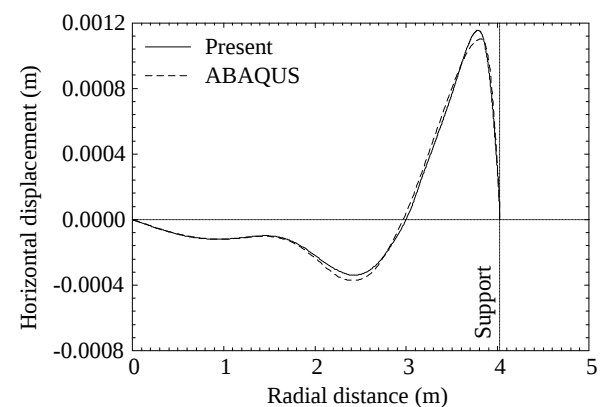
### 3.2 ผลของค่าระดับน้ำที่มีต่อโครงสร้างเปลือกบาง

สำหรับการศึกษาผลของระดับน้ำที่มีต่อผลตอบสนองทางสถิติศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้าที่สามารถทำได้โดยการแปรเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความสูงของระดับน้ำต่อความหนาของโครงสร้างเปลือกบางจาก 500 ถึง 2500 โดยที่ค่าความหนาของโครงสร้างเป็นค่าคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง สำหรับข้อมูลและคุณสมบัติของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้าที่ใช้ในการคำนวณจะใช้ค่าดังแสดงในตารางที่ 1 ผลการศึกษาพบว่าแนวโน้มการเสียรูปของโครงสร้างมีลักษณะคล้ายคลึงกันดังแสดงในรูปที่ 6 นั่นคือเมื่อความสูงของระดับน้ำมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างมีการเสียรูปเพิ่มสูงขึ้น สำหรับระยะการเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียนและแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียนภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่าระดับน้ำจะแสดงได้ดังรูปที่ 7 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการเสียรูปในแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียนจะมีจุดตัดกลับที่เปลี่ยนจากค่าบวกไปเป็นลบอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันไม่ขึ้นอยู่กับค่าความลึกของระดับน้ำ ดังแสดง

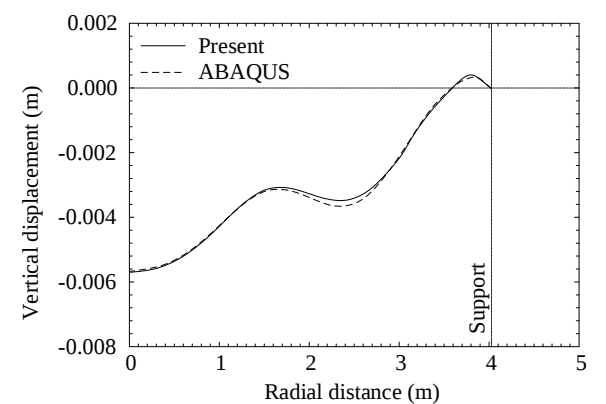
ในรูปที่ 7(ข) อีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าที่ตำแหน่งดังกล่าวเกิดขึ้นในช่วงของเส้นโค้งดังสมการที่ (44ค) และมีความสำคัญในการวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างเปลือกบางเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่เกิดปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพของโครงสร้าง (Loss of Stability) [30-31]



รูปที่ 4 ผลการเปรียบเทียบรูปร่างของโครงสร้างเปลือกบางฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า

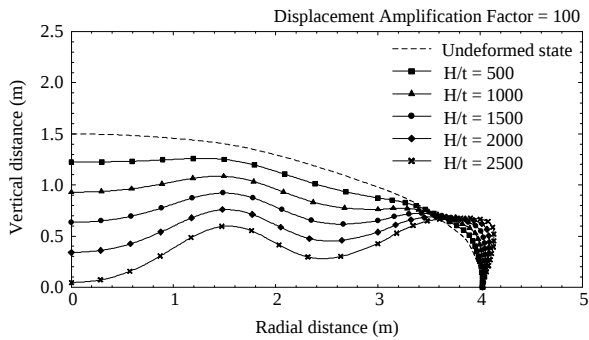


(ก) การเสียรูปตามแนวราบ

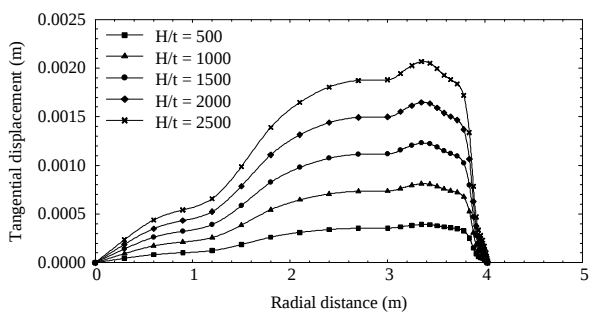


(ข) การเสียรูปแนวตั้ง

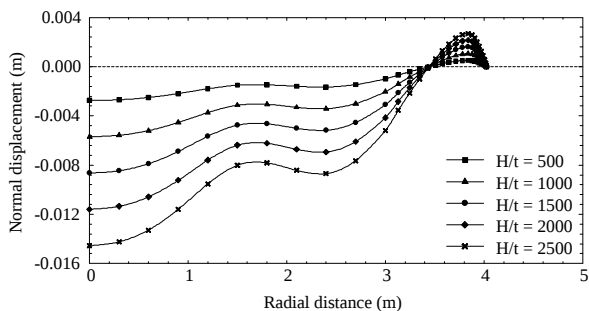
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเสียรูปกับแนวแกนรัศมีของโครงสร้างเปลือกบางฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า



รูปที่ 6 ผลของการแปรเปลี่ยนระดับน้ำต่อรูปร่างของโครงสร้างเปลือกบางฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า



(ก) การเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียน



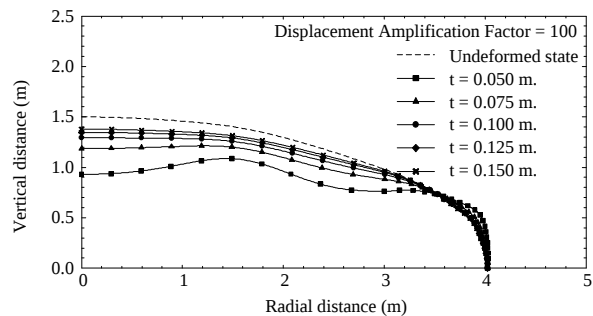
(ข) การเสียรูปแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียน

รูปที่ 7 ผลของการแปรเปลี่ยนระดับน้ำต่อระยะการเสียรูปของโครงสร้างเปลือกบางฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า

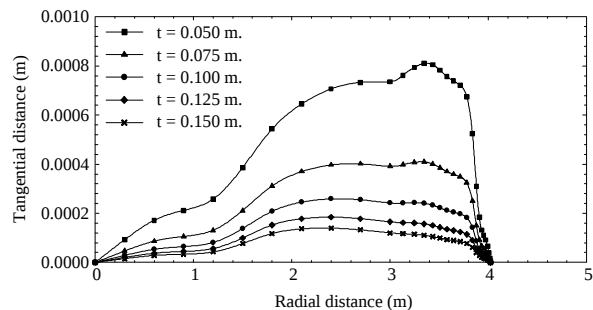
### 3.3 ผลของความหนาที่มีต่อโครงสร้างเปลือกบาง

การศึกษาผลของความหนาที่มีต่อโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า สามารถทำได้โดยใช้ความหนาตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.15 เมตร ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 มีค่าคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพบว่าเมื่อความหนาของโครงสร้างมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้การเสียรูปของโครงสร้างมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 8 อย่างไรก็ตามพบว่าค่าการเสียรูปมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นแบบไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงเนื่องจากผลของค่าการดัดที่เกิดขึ้น ซึ่งจะแตกต่างจากงานวิจัยของ Jiammeepreecha et al. [6]

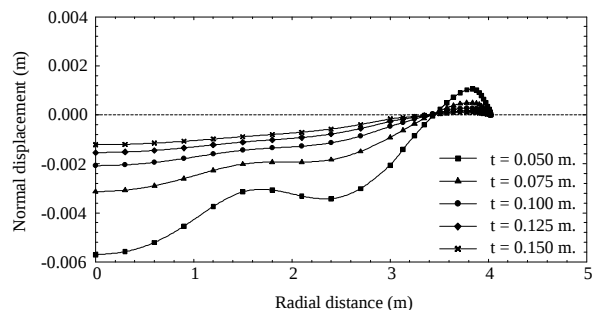
สำหรับรูปที่ 9 จะแสดงผลของการแปรเปลี่ยนความหนาที่มีต่อระยะการเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียนและแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียนของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าการเสียรูปทั้งสองจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าความหนามีค่าลดลง และค่าการเสียรูปในแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียนจะมีจุดตัดกลับที่เปลี่ยนจากค่าบวกไปเป็นลบอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันเหมือนกับการแปรเปลี่ยนค่าความสูงระดับน้ำ



รูปที่ 8 ผลของการแปรเปลี่ยนความหนาต่อรูปร่างของโครงสร้างเปลือกบางฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า



(ก) การเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียน



(ข) การเสียรูปแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียน

รูปที่ 9 ผลของการแปรเปลี่ยนความหนาต่อระยะการเสียรูปของโครงสร้างเปลือกบางฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า

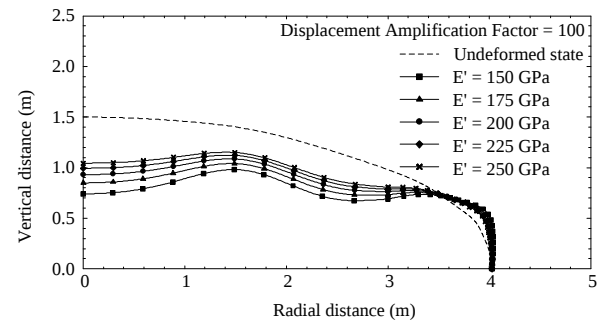
### 3.4 ผลของโมดูลัสยืดหยุ่นที่มีต่อโครงสร้างเปลือกบาง

สำหรับค่าพารามิเตอร์สุดท้ายที่จะทำการศึกษาในครั้งนี้นี้คือผลของโมดูลัสยืดหยุ่นที่มีต่อโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า โดยทำการแปรเปลี่ยนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตั้งแต่  $150 \times 10^3$  ถึง  $250 \times 10^3$  เมกะปาสกาล พบว่าค่าการเสียรูปจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 10 และ 11 สำหรับรูปร่างของโครงสร้างหลังการเสียรูป ระยะการเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียนและแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียนของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า ตามลำดับ นั่นคือความแข็งแรงของโครงสร้างจะมีค่าลดลงนั่นเอง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการเสียรูปในแนวตั้งฉากจะมีจุดดัดกลับที่ตำแหน่งเดียวกันเช่นเดียวกับกรณีการแปรเปลี่ยนค่าความสูงระดับน้ำและความหนาของโครงสร้างเปลือกบาง

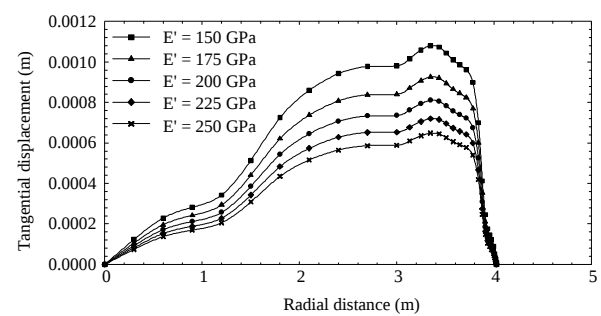
จากผลการแปรเปลี่ยนค่าระดับน้ำ ความหนา และโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างเปลือกบาง พบว่าจุดดัดกลับที่เกิดขึ้นในรูปที่ 7(ข), 9(ข) และ 11(ข) เกิดที่ตำแหน่งเดียวกันเนื่องจากรูปทรงของโครงสร้างและแรงดันที่กระทำมีลักษณะแบบเดียวกันจึงส่งผลให้ตำแหน่งดังกล่าวเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน ในกรณีที่ต้องการคำนวณหาค่าแรงภายในได้แก่ แรงในระนาบ (Membrane Forces) และโมเมนต์ (Bending Moment) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (14) และ (16) ร่วมกับค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้น สำหรับการหาค่าความเครียดและการเปลี่ยนแปลงความโค้งตัดตามลำดับ จากนั้นสามารถคำนวณหาค่าแรงในระนาบและโมเมนต์ได้โดยใช้สมการแสดงพฤติกรรมของวัสดุ (Constitutive Equation) [24]

## 4. บทสรุป

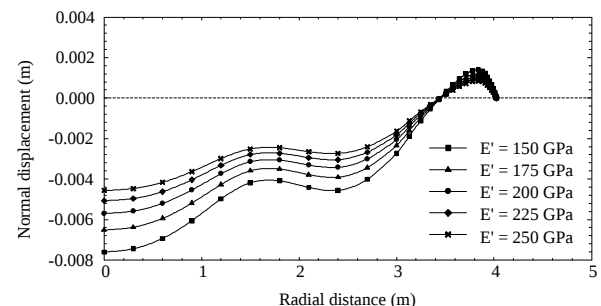
การศึกษาผลตอบสนองทางสถิติศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้ารับแรงดันน้ำสถิตโดยใช้ทฤษฎีเรขาคณิตเชิงอนุพันธ์ในการกำหนดรูปทรงโครงสร้าง และใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาผลลัพธ์เชิงตัวเลขสำหรับค่าการเสียรูปทางสถิติศาสตร์ของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้าสามารถสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 10 ผลของการแปรเปลี่ยนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อรูปร่างของโครงสร้างเปลือกบางฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า



(ก) การเสียรูปตามแนวเมอร์ริเดียน



(ข) การเสียรูปแนวตั้งฉากกับเส้นเมอร์ริเดียน

รูปที่ 11 ผลของการแปรเปลี่ยนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อระยะการเสียรูปของโครงสร้างเปลือกบางฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า

4.1 ความลึกของระดับน้ำ ความหนา และโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างเปลือกบางจะส่งผลกระทบต่อระยะการเสียรูปของโครงสร้างเปลือกบางรูปทรงฟังก์ชันโพลีโนเมียลอันดับที่ห้า

4.2 ค่าการเสียรูปในแนวตั้งฉากจะมีจุดดัดกลับที่เปลี่ยนจากค่าบวกไปเป็นลบอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันไม่ขึ้นอยู่กับค่าความลึกของระดับน้ำ ความหนา และโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างเปลือกบาง

4.3 วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของโครงสร้างเปลือกบางและสามารถรวมผลของแรงดันที่เกิดขึ้นเนื่องจาก



ของเหลวที่บรรจุภายในได้ ซึ่งจะเป็นงานวิจัยเชิงลึกในลำดับต่อไป โดยที่โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ABAQUS จะมีข้อจำกัดในเรื่องดังกล่าว

## 5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ตามคำรับรองการปฏิบัติตามเงื่อนไขของการอนุมัติงบประมาณโครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2567 เลขที่ FF67/P1-038

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Reddy JN. Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells. Boca Raton: CRC Press;2007.
- [2] Zingoni A. Liquid-containment shells of revolution: a review of recent studies on strength, stability and dynamics. Thin-Walled Struct. 2015;87:102-14.
- [3] Pai PF, Young LG. Fully nonlinear modeling and analysis of precision membranes. Int J. Comp Engrg Sci. 2003;4(1):16-65.
- [4] Rotter JM, Sadowski, AJ. Cylindrical shell bending theory for orthotropic shells under general axisymmetric pressure distributions. Engrg Struct. 2012;42:258-65.
- [5] Al-Gahtani H, Khathlan A, Sunar M, Naffa'a M. Local pressure testing of spherical vessels. Int J. Pres Ves Pip. 2014;114-115:61-8.
- [6] Jiammeepreecha W, Chucheeesakul S, Huang T. Nonlinear static analysis of deep water axisymmetric spherical half drop shell. KMUTT Res Develop J. 2014;37(1):239-55. Thai.
- [7] Jiammeepreecha W, Detphan S, Chaidachatorn K, Ngohpok C, Tiyasangthong S, Detphan P, Lerdchaipong K, Jamnam S. Large displacement analysis of toroidal dome structures having variable thickness under external pressure. RMUTL Engrg J. 2023;9(1). Thai.
- [8] Zingoni A. Shell Structures in Civil and Mechanical Engineering: Theory and Analysis. London: ICE Publishing;2017.
- [9] Tangbanjongkij C, Chucheeesakul S, Jiammeepreecha W. Large displacement analysis of ellipsoidal pressure vessel heads using the fundamental of differential geometry. Int J Pres Ves Pip. 2019;172:337-47.
- [10] Jiammeepreecha W, Suebsuk J, Chucheeesakul S. Nonlinear static analysis of liquid-containment toroidal shell under hydrostatic pressure. J. Struct Engrg. 2020;146(1):04019169.
- [11] Shi Z, Ohtsu M. Application of linear programming to the limit analysis of conical-shaped steel water tanks. J. Struct Engrg. 2001;127(11):1316-23.
- [12] Zingoni A. Stresses and deformations in egg-shaped sludge digestors: membrane effects. Engrg Struct. 2001;23(11):1365-72.
- [13] Zingoni A, Mokhothu B, Enoma N. A theoretical formulation for the stress analysis of multi-segmented spherical shells for high-volume liquid containment. Engrg Struct. 2015;87:21-31.
- [14] Enoma N, Zingoni A. Analytical formulation and numerical modelling for multi-shell toroidal pressure vessels. Comp Struct. 2020;232:105811.
- [15] Zingoni A, Enoma N. Strength and stability of spherical-conical shell assemblies under external hydrostatic pressure. Thin-Walled Struct. 2020;146:106472.
- [16] Yeh HS, Huang T, Schachar RA. A solid shell element for the shell structured eyeball with application to radial keratotomy. Int J. Numer Method Engrg. 1992;33:1875-90.



- [17] Yeh HS, Huang T, Schachar RA. A closed shell structured eyeball model with application to radial keratotomy. *J. Biomech Engrg.* 2000; 122(5):504-10.
- [18] Chien CHM, Huang T, Schachar RA. Analysis of human crystalline lens accommodation. *J. Biomech*, 2006;39(4):672-80.
- [19] Yasuzawa Y. Structural response of underwater half drop shaped shell: Proceedings of the 3rd International Offshore and Polar Engineering Conference; 1993 June 6-11; Singapore. 1993. p. 476-81.
- [20] Wang CM, Vo KK, Chai YH. Membrane analysis and minimum weight design of submerged spherical domes. *J. Struct Engrg.* 2006;132(2): 253-59.
- [21] Jiammeepreecha W, Chucheeepsakul S, Huang T. Nonlinear static analysis of an axisymmetric shell storage container in spherical polar coordinates with constraint volume. *Engrg Struct.* 2014;68:111-20.
- [22] Jiammeepreecha W, Chucheeepsakul S, Nonlinear static analysis of an underwater elastic semi-toroidal shell. *Thin-Walled Struct.* 2017;116:12-8.
- [23] Tangbanjongkij C, Chucheeepsakul S, Jiammeepreecha W. Analytical and numerical analyses for a variety of submerged hemi-ellipsoidal shells. *J. Engrg Mech.* 2020;146: 04020066.
- [24] Langhaar H. Foundations of Practical Shell Analysis. Illinois: University of Illinois;1964.
- [25] Cook RD, Malkus DS, Plesha ME, Witt RJ. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. New York: John Wiley & Sons;2002.
- [26] Goan LA. An Analysis of an Axisymmetrical Closed Shell Subjected to Equatorial Pull with Application to Accommodation of the Crystalline Lens. PhD thesis. The University of Texas at Arlington; 2000.
- [27] Langhaar H. Energy Methods in Applied Mechanics. New York: John Wiley & Sons;1962.
- [28] Mase GT, Mase GE. Continuum Mechanics for Engineers. Florida: CRC Press;1999.
- [29] Abaqus. ABAQUS User's Manual, Rhode Island: Hibbit, Karlsson and Sorensen;2016.
- [30] Shilkrut DI. Bifurcation in tension of nonlinear spherical caps. *J. Engrg Mech.* 1983;109(1):289-95.
- [31] Ross CTF, Youster P, Sadler R. The buckling of plastic oblate hemi- ellipsoidal dome shells under external hydrostatic pressure. *Ocean Engr.* 2001;28(7):789-803.





## บล็อกประสานปูพื้นจากเถ้าขานอ้อยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ใช้ทรายและกากแร่แคลไซด์เป็นมวลรวมละเอียด

### Concrete Paving Block Using Bagasse Ash and Calcium Carbide Residue with Sand and Calcite Residue as Fine Aggregate

รัฐพล สมนา<sup>1</sup> ประชุม คำพุ่ม<sup>2</sup> และเกียรติสุดา สมนา<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ที่ 1 ถนนรังสิต - นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 12110

Rattapon Somna<sup>1</sup>, Prachoom Khamput<sup>2</sup> and Kiatsuda Somna<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan

744 Suranarai Road, Nai Mueang Subdistrict, Mueang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

39 Moo 1, Rangsit - Nakhon Nayok Road, Khlong Hok Subdistrict, Khlong Luang District, Pathum Thani 12110, Thailand

\*ผู้รับผิดชอบบทความ: kiatsuda.so@rmu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-6512-6468

Received: 22 May 2024, Revised: 20 September 2024, Accepted: 13 November 2024

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มุ่งเน้นศึกษาบล็อกประสานปูพื้นจากเถ้าขานอ้อยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ใช้ทรายและกากแร่แคลไซด์เป็นมวลรวมละเอียด เถ้าขานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าชีวมวล กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นของเสียที่ได้จากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทีลีน และกากแร่แคลไซด์ได้จากเหมืองแร่หินปูน บล็อกประสานปูพื้นใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานระหว่าง 0.45 – 0.63 โดยน้ำหนัก เถ้าขานอ้อยต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เท่ากับ 90:10 70:30 และ 50:50 โดยน้ำหนัก และใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20 และ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสำหรับเถ้าขานอ้อยต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่อัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก จากนั้นศึกษาผลกระทบของการใช้กากแร่แคลไซด์เป็นมวลรวมละเอียดแทนทราย โดยใช้อัตราส่วนเถ้าขานอ้อยต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนทรายต่อกากแร่แคลไซด์ เท่ากับ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปเป็นบล็อกประสานปูพื้นด้วยมือ ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3 7 14 และ 28 วัน และทดสอบค่าการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน จากผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนเถ้าขานอ้อยต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก และใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด และมีค่าการดูดน้ำซึมน้ำต่ำที่สุด เมื่อใช้กากแร่แคลไซด์เป็นมวลรวมละเอียด พบว่า อัตราส่วนทรายต่อกากแร่แคลไซด์ เท่ากับ 0:100 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด แต่ยังคงมีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าการใช้ทรายเป็นมวลรวมละเอียด แม้กระนั้นก็ตาม กำลังอัดของบล็อกประสานปูพื้นจากเถ้าขานอ้อยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ยังมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ตาม มอก. 827-2565 แต่ยังสามารถรับกำลังอัดได้มากกว่า 17 เมกะปาสคาล แนะนำให้นำไปใช้สำหรับงานที่ไม่รับกำลังอัดสูง นอกจากนี้ ยังเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งในภาคอุตสาหกรรม ลดการใช้ปูนซีเมนต์ ลดต้นทุนการผลิต และเป็นแนวทางในการจัดการของเสียในสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่ง



**คำสำคัญ** เถ้าขานอ้อย กากแคลเซียมคาร์ไบด์ กากแรกกากแร่แคลไซด์ บล็อกประสานปูน

### Abstract

This research focuses on the development of concrete paving blocks using bagasse ash and calcium carbide residue as binders, with sand and calcite residue as fine aggregates. Bagasse ash is a by-product from biomass power plants, calcium carbide residue is a waste material from acetylene gas production, and calcite residue is obtained from limestone mining. The concrete paving blocks were produced using a binder-to-aggregate ratio of 1:3 by weight and a water-to-binder ratio from 0.45 to 0.63. The ratios of bagasse ash to calcium carbide residue used were 90:10, 70:30, and 50:50 by weight. Additionally, ordinary Portland cement was incorporated at 10%, 20%, and 80% by weight of the binder for the 70:30 mixture. The effects of using calcite residue as a fine aggregate replacement for sand were investigated using sand-to-calcite residue ratios of 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, and 0:100 by weight, based on a binder ratio of bagasse ash to calcium carbide residue of 70:30. The concrete paving blocks were hand-formed and tested for compressive strength at the ages of 3, 7, 14, and 28 days, and for water absorption at 28 days. The results indicate that the 70:30 mixture of bagasse ash to calcium carbide residue with 80% cement replacement achieved the highest compressive strength and lowest water absorption. When calcite residue was used as the fine aggregate, the 0:100 sand-to-calcite residue ratio provided the highest compressive strength among the replacement levels, although it remained lower than when using sand alone. Although the compressive strength of these concrete paving blocks did not meet the standard requirements of TIS 827-2565, they still exceeded 17 MPa, making them suitable for non-load-bearing applications. This study demonstrates a practical approach for utilizing industrial byproducts, reducing cement consumption, lowering production costs, and promoting environmental waste management.

**Keywords:** Bagasse ash, calcium carbide residue, calcite residue, concrete paving blocks

### 1. บทนำ

กากแคลเซียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน เป็นก๊าซที่ใช้ในอุตสาหกรรมงานเชื่อมและงานตัดโลหะ โดยกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีนทำได้โดยการนำหินปูน ( $\text{CaCO}_3$ ) เข้าเตาหลอม และจากกระบวนการนี้จะได้ผลผลิตคือ ปูนขาว ( $\text{CaO}$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) หลังจากนั้น เติมน้ำในถังเพื่อทำปฏิกิริยากับปูนขาวที่อยู่ในเตาหลอม จะได้แคลเซียมคาร์ไบด์ ( $\text{CaC}_2$ ) เมื่อนำแคลเซียมคาร์ไบด์ไปทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ผลผลิตเป็นก๊าซอะเซทิลีน ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) ส่วนที่เหลือคือกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่อยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) มีลักษณะเป็นโคลนสีเทาอมขาว เมื่อปล่อยให้ตกตะกอนจะจับตัวเป็นก้อน กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีคุณสมบัติความแข็งแรงสูงและมีความ

ต้องการนำไปใช้ประโยชน์เนื่องจากเหลือทิ้งกองเป็นจำนวนมาก ด้วยองค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นหลัก สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานกับวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน เถ้ากลบ เถ้าขานอ้อยได้ [1] ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาวัสดุประสานจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ร่วมกับเถ้าขานอ้อย ซึ่งเถ้าขานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล หลังจากการหีบอ้อยเพื่อนำไปผลิตเป็นน้ำตาล มีการใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในโรงงานและขาย หลังจากการเผาขานอ้อยทำให้มีเถ้าขานอ้อยเหลือทิ้งเป็นปริมาณมากและต้องนำไปกำจัด หากกำจัดไม่ถูกวิธีทำให้เกิดเป็นมลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้ จากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อย พบว่า มีซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ในปริมาณสูงมีคุณสมบัติในความเป็นวัสดุปอซโซลาน สามารถนำมาใช้ใน



งานคอนกรีตและงานวัสดุประสานได้ปฏิกิริยาปอซโซลาน เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และซิลิกาหรืออลูมินาจากวัสดุปอซโซลาน ได้สารเชื่อมประสาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ที่มีคุณสมบัติในการรับกำลังอัดได้ วัสดุปอซโซลานที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุประสานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ ได้แก่ เถ้าถ่านหินที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ และเถ้าถ่านหินบดละเอียด ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด เท่ากับ 284 และ 335 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ [2] นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งกำลังอัดเพื่อใช้เป็นคอนกรีตกำลังสูงได้ [3] และยังมีการใช้ประโยชน์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าถ่านหินเพื่อเป็นวัสดุประสานในการผลิตบล็อกประสานปูพื้น [4] ที่ให้คุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 60-2561 จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุประสานจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน พบสารเชื่อมประสานจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต [5] นอกจากการใช้เถ้าถ่านหินแล้ว มีความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าชีวมวลเป็นวัสดุประสานร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์เพื่อเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งกลุ่มเถ้าชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เช่น การใช้เถ้าชานอ้อย [6] เถ้าแกลบ เป็นต้น ในส่วนของ กากแร่ แคลไซต์ คือ แร่คาร์บอเนตที่มีสูตรทางเคมีคือ  $\text{CaCO}_3$  ในประเทศไทยมีการขุดกากแร่แคลไซต์ขึ้นมาเพื่อผลิตเป็นผงแคลเซียมคาร์บอเนต โดยผ่านกระบวนการแต่งแร่ ทำให้มีส่วนที่เหลือของกากแร่แคลไซต์ที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กใกล้เคียงกับทราย มีประมาณ 36,000 – 72,000 ตันต่อปี [7] จากรูปร่างลักษณะและคุณสมบัติ งานวิจัยนี้จึงสนใจนำมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดแทนที่ทราย

งานวิจัยนี้สนใจศึกษา บล็อกประสานปูพื้นจากเถ้าชานอ้อยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ใช้ทรายและกากแร่แคลไซต์เป็นมวลรวมละเอียด โดยใช้อัตราส่วนเถ้าชานอ้อย (BA) ต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CR) 90:10 70:30 และ 50:50 โดยน้ำหนัก ใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารเร่งร้อยละ 10 20 และ 80 โดยน้ำหนัก และศึกษาการใช้กากแร่แคลไซต์มาแทนที่ทราย ซึ่งเป็นมวลรวมจากธรรมชาติ ที่สัดส่วนทรายต่อกากแร่แคลไซต์ เท่ากับ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดเป็นอิฐ

บล็อกประสานปูพื้น ทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน และทดสอบค่าการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน จากผลการศึกษาทำให้ได้แนวทางในการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือทิ้งทั้งสามชนิดในการประยุกต์ใช้สำหรับผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้าง และเป็นการจัดการสิ่งแวดล้อมได้อีกแนวทางหนึ่ง

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

เถ้าชานอ้อย ได้จากโรงน้ำตาล จังหวัดสุรินทร์ และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CR) ได้จากบริษัท ไทยอะเซทีลีน จำกัด จังหวัดปทุมธานี ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก มวลรวมละเอียดที่ใช้ได้แก่ แร่กากแร่แคลไซต์ ได้จาก โรงงานสุรินทร์ออมยา เคมิคอล จังหวัดลพบุรี และทรายแม่น้ำ

### 2.2 การเตรียมตัวอย่าง

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ นำมาตากให้แห้งแล้วเก็บบรรจุในถุงเพื่อป้องกันความชื้น เถ้าชานอ้อยใช้แบบปรับปรุงคุณภาพด้วยการบด ควบคุมเวลาที่ 15 นาทีและนำมาใช้โดยไม่มีกรร่อนคัดขนาด และหาขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของวัสดุ การบดจะช่วยลดความพรุนและเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของเถ้าชานอ้อยในการทำปฏิกิริยา Le et al., 2023 [8] และแนะนำ ขนาดที่ละเอียดของเถ้าชานอ้อยช่วยในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานและเติมเต็มในช่องว่างของเพสต์ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงขึ้น

### 2.3 การผลิตบล็อกปูพื้นจากเถ้าชานอ้อยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์

การสังเคราะห์วัสดุประสานบล็อกปูพื้นจากเถ้าชานอ้อย (BA) และกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CR) แบ่งเป็น 2 ชุดการศึกษา โดยมีรายละเอียดในแต่ละชุดการทดลองดังนี้

#### 2.3.1 ชุดที่ 1 การผลิตบล็อกประสานปูพื้นจากเถ้าชานอ้อยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์

บล็อกประสานปูพื้นใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานระหว่าง 0.45 – 0.63 โดยน้ำหนัก สำหรับการปรับสัดส่วนให้สามารถขึ้นรูปเป็นบล็อกประสานปูพื้นได้ ใช้อัตราส่วนเถ้าชานอ้อยต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เท่ากับ 90:10 70:30 และ 50:50 โดยน้ำหนัก (ใช้สัญลักษณ์ B90-C10, B70-C30 และ B50-C50 ตามลำดับ) นอกจากนี้ยังใช้ปูนซีเมนต์ (CM)



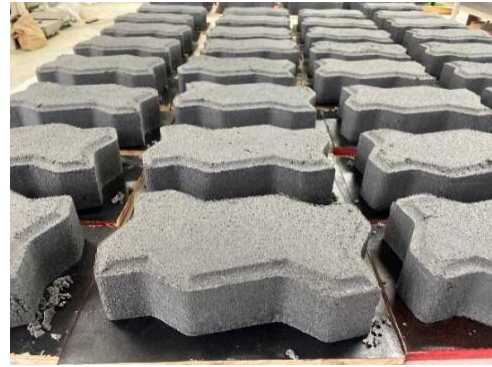
เพื่อเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 10, 20 และ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานสำหรับอัตราส่วนเถ้าขานอ้อยต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ เท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดด้วยมือเป็นบล็อกประสานปูพื้น เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3 7 14 และ 28 วัน และทดสอบค่าการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน โดยรูปที่ 1 แสดงบล็อกประสานปูพื้นจากการทดลองชุดที่ 1



รูปที่ 1 บล็อกประสานปูพื้นจากการทดลองชุดที่ 1

2.3.2 ชุดที่ 2 การผลิตบล็อกประสานปูพื้นจากเถ้าขานอ้อยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์และการใช้กากแร่แคลไซด์เป็นวัสดุมวลรวมแทนทราย

การทดลองนี้ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมและ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเช่นเดียวกับการทดลองชุดที่ 1 เลือกอัตราส่วนของเถ้าขานอ้อยต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์เท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 80 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด ใช้อัตราส่วนทรายต่อกากแร่แคลไซด์ (SA:CC) เท่ากับ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดด้วยมือเป็นอิฐบล็อกประสานปูพื้น เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3 7 14 และ 28 วัน และทดสอบค่าการดูดซึมน้ำที่อายุ 28 วัน และศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุด้วยเทคนิค Optical microscope (OM) โดยรูปที่ 2 แสดงบล็อกประสานปูพื้นจากการทดลองชุดที่ 2



รูปที่ 2 บล็อกประสานปูพื้นจากการทดลองชุดที่ 2

### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุตั้งต้น

##### 3.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าขานอ้อย

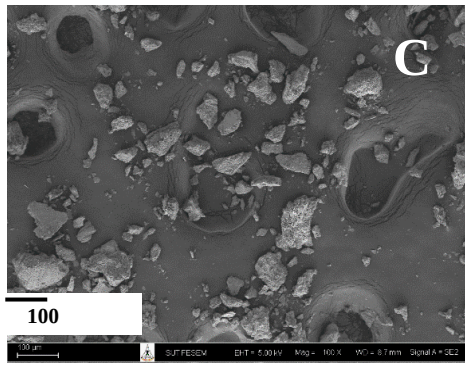
ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CR) และเถ้าขานอ้อย (BA) พบว่าเถ้าขานอ้อยมีค่าซิลิกาสูงที่สุดร้อยละ 81.12 จัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C618 [9] ในขณะที่ กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 98.187 และมีค่า LOI ร้อยละ 2.37

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น

| สารประกอบออกไซด์               | BA    | CR    |
|--------------------------------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 81.12 | N/A   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.20  | 0.55  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.21  | 0.86  |
| CaO                            | 5.17  | 98.18 |
| SO <sub>3</sub>                | 1.23  | 0.13  |
| K <sub>2</sub> O               | 2.44  | N/A   |
| LOI                            | -     | 2.37  |

##### 3.1.2 ลักษณะพื้นผิวของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าขานอ้อย

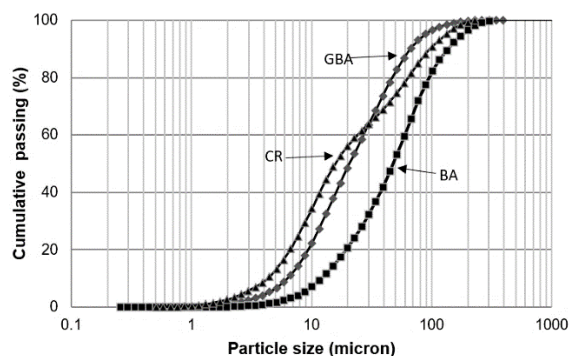
รูปที่ 3 แสดงลักษณะพื้นผิวของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าขานอ้อยหลังการบดที่ กำลังขยาย 100X ขนาด 100 ไมครอนพบว่า เถ้าขานอ้อยมีขนาดเล็กรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมมีรูพรุน ในขณะที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีพื้นผิวที่ขรุขระอนุภาคมีขนาดใหญ่ มีเหลี่ยมมุมเช่นเดียวกัน



รูปที่ 3 ลักษณะพื้นผิวของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชานอ้อย

### 3.1.3 ขนาดอนุภาคของเถ้าชานอ้อยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์

รูปที่ 4 แสดงขนาดอนุภาคของเถ้าชานอ้อย เถ้าชานอ้อยบดและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีค่ากลางอนุภาคเท่ากับ 16.55 ไมครอน มีขนาดเล็กกว่าเถ้าชานอ้อยเมื่อเทียบกับขนาดของเถ้าชานอ้อยที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพที่มีขนาด 48.20 ไมครอน เมื่อนำเถ้าชานอ้อยมาปรับปรุงคุณภาพด้วยการบด ควบคุมเวลาที่ 15 นาที พบว่าเถ้าชานอ้อยมีขนาดเล็กลงและมีค่ากลางอนุภาคเท่ากับ 20.05 ไมครอน



รูปที่ 4 ขนาดอนุภาคของเถ้าชานอ้อย เถ้าชานอ้อยบดและกากแคลเซียมคาร์ไบด์

### 3.1.4 คุณสมบัติของวัสดุประสาน ทรายและกากแร่แคลไซต์

คุณสมบัติของวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุประสานแสดงดังตารางที่ 2 คุณสมบัติของทรายและกากแร่แคลไซต์ดังตารางที่ 3 พบว่า ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และ เถ้าชานอ้อย มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.03, 2.35 และ 2.31 ตามลำดับ ทรายมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.59 ความถ่วงจำเพาะ (SSD) เท่ากับ 2.63 และการดูดซึมน้ำร้อยละ 2.24 กากกากแร่แคลไซต์มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.54 ความถ่วงจำเพาะ (SSD) เท่ากับ 2.72 และการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.42

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุประสาน

| คุณสมบัติ           | ความถ่วงจำเพาะ |
|---------------------|----------------|
| ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก  | 3.03           |
| กากแคลเซียมคาร์ไบด์ | 2.35           |
| เถ้าชานอ้อย         | 2.31           |

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของทราย

| คุณสมบัติ                   | ทราย | กากแร่กากแร่แคลไซต์ |
|-----------------------------|------|---------------------|
| โมดูลัสความละเอียด          | 1.59 | 2.45                |
| ความถ่วงจำเพาะ (SSD)        | 2.63 | 2.72                |
| ร้อยละการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ) | 2.24 | 0.42                |

### 3.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของบล็อกประสานปูพื้นที่ไม่ส่วนผสมของกากแร่แคลไซต์

#### 3.2.1 ผลของกำลังอัด

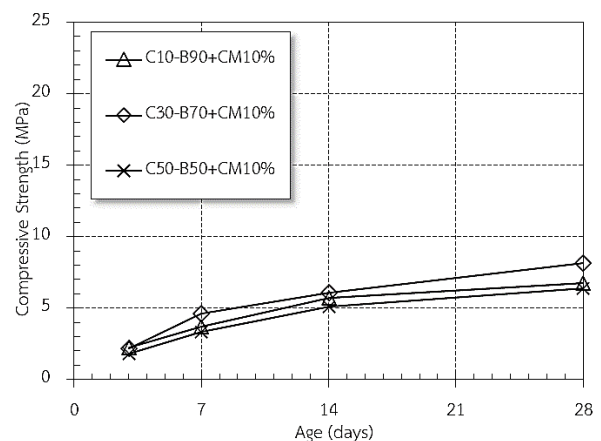
รูปที่ 5 ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานปูพื้นที่ไม่ส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชานอ้อยที่มีปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 พบว่า การใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ทำให้ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานปูพื้นมีค่าสูงกว่า 5 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน อัตราส่วนของเถ้าชานอ้อยต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์เท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด แสดงให้เห็นว่า ปฏิกริยาไฮเดรชันจากปูนซีเมนต์ และปฏิกริยาปอซโซลานจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าชานอ้อยในสัดส่วนผสมที่



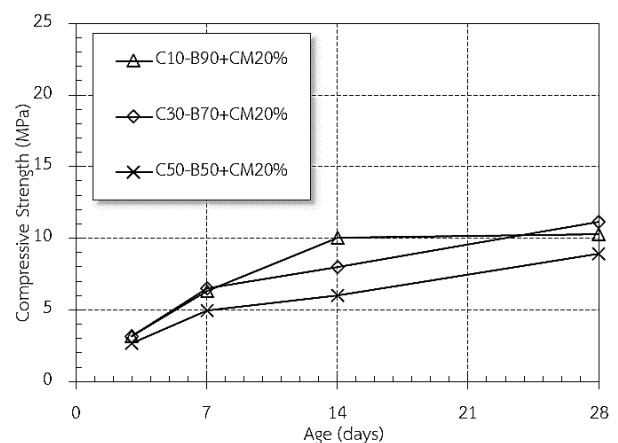
เหมาะสมสามารถพัฒนากำลังอัดของบล็อกประสานปูพื้นได้ แต่เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ช้า ส่งผลให้กำลังอัดของบล็อกประสานปูพื้นมีค่าไม่สูงนัก เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของปูนซีเมนต์เพื่อเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 ดังรูปที่ 6 พบว่า กำลังอัดของบล็อกประสานปูพื้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนเถ้าขานอ้อยต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์เท่ากับ 70:30 และมีปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด เท่ากับ 11 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน

บล็อกประสานปูพื้นมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น 2 ประเภทได้แก่ ปฏิกิริยาไฮเดรชันจากปูนซีเมนต์และปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งเกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ และจากผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ทำปฏิกิริยากับซิลิกาจากเถ้าขานอ้อยทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีคุณสมบัติที่สามารถรับกำลังอัดได้ ผลการทดลองสอดคล้องกับข้อมูลของ R., Lima et. Al. (2020) [10] ที่มีการใช้ปูนขาวร่วมกับเถ้าขานอ้อย ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่สามารถรับกำลังได้

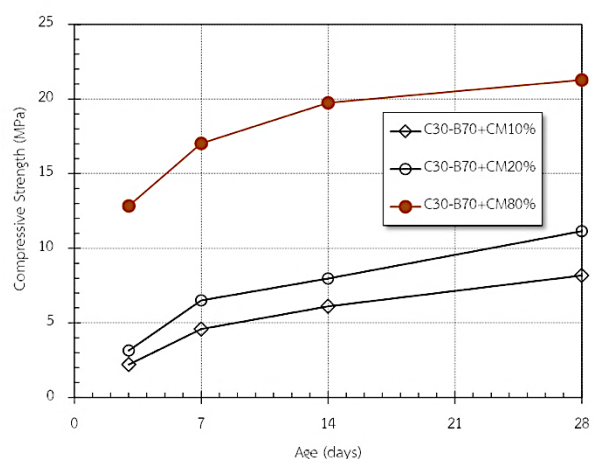
จากผลการศึกษาอัตราส่วนของเถ้าขานอ้อยต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ พบว่า ที่อัตราส่วน 70:30 มีแนวโน้มพัฒนากำลังอัดได้ดี เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่ได้จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าขานอ้อย [11] จากผลการทดลองมีการพัฒนากำลังอัดที่ไม่สูงนัก ในงานวิจัยนี้จึงเร่งการเกิดปฏิกิริยาด้วยการใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมโดยศึกษาปริมาณปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 10 20 และ 80 โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 7 พบว่า เมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นกำลังอัดของบล็อกประสานปูพื้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นโดยการเพิ่มปูนซีเมนต์ถึงร้อยละ 80 ได้ค่ากำลังอัด 21 เมกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน ดังนั้น การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์จึงสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุประสานเพื่อให้บล็อกประสานปูพื้นมีกำลังอัดเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 5 ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานปูพื้นจากการแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าขานอ้อยที่มีปูนซีเมนต์ร้อยละ 10



รูปที่ 6 ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานปูพื้นจากการกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าขานอ้อยที่มีปูนซีเมนต์ร้อยละ 20

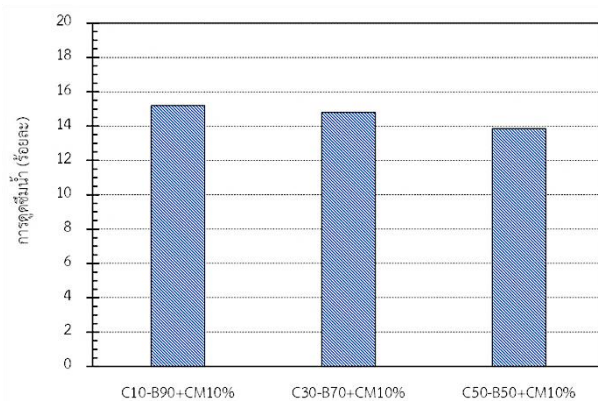


รูปที่ 7 ค่ากำลังอัดของบล็อกประสานปูพื้นจากการกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าขานอ้อยที่มีปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 20 และ 80

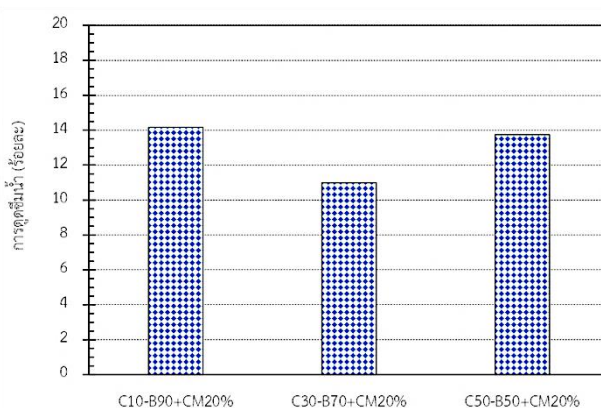


### 3.2.2 ค่าการดูดซึมน้ำ

รูปที่ 8 และ 9 แสดงผลของการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานปูพื้นที่มีการใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ พบว่า การใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 มีค่าการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ที่น้อยทำให้ไม่มีอิทธิพลในการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานปูพื้น ในขณะที่การใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และการใช้เถ้าขานอ้อยต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่อัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มมีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่าส่วนผสมอื่นๆ เนื่องจากให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่า ตัวอย่างมีความแน่นมากกว่า การดูดซึมน้ำจึงมีค่าลดลง



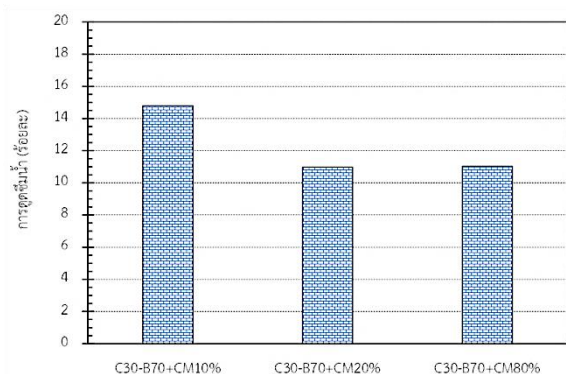
รูปที่ 8 ผลของการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานปูพื้นที่มีการใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10



รูปที่ 9 ผลของการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานปูพื้นที่มีการใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20

รูปที่ 10 แสดงผลของการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานปูพื้นที่ใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 20 และ 80 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้นค่าร้อยละ

การดูดซึมน้ำของบล็อกประสานปูพื้นมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของกำลังอัดของบล็อกประสานปูพื้นเมื่อใช้อัตราส่วนเถ้าขานอ้อยต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์เท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก และใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 80 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด แสดงดังรูปที่ 7 และมีค่าอัตราการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด เท่ากับร้อยละ 11 ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจาก เมื่อส่วนผสมมีค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นเนื้อของบล็อกประสานปูพื้นมีความแน่นมากขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของน้ำลดลงทำให้มีค่าอัตราการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด [12] นอกจากนี้ ค่าการดูดซึมน้ำของตัวอย่าง C30-B70+CM20% มีค่าใกล้เคียงกับ C30-B70+CM80% อาจเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันจากปูนซีเมนต์ และปฏิกิริยาปอซโซลานจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าขานอ้อย ทำให้บล็อกประสานปูพื้นมีความแน่นขึ้นแต่ไม่ใช่เป็นสารประกอบที่ช่วยในการรับกำลังอัด ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำ



รูปที่ 10 ผลของการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานปูพื้นที่มีการใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 20 และ 80

จากการศึกษาทดลองชุดที่ 1 การใช้เถ้าขานอ้อยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่อัตราส่วน 30:70 โดยน้ำหนัก และใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 80 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุดและค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด พบว่า การใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 80 ให้ค่ากำลังอัดสูงขึ้นร้อยละ 61.9 และ 47.2 จากเดิมที่ใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากการใช้ปูนซีเมนต์ที่สูงทำให้ได้สารเชื่อมประสาน ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ช่วยในด้านการรับกำลังอัดและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาจากเถ้าขานอ้อยได้สารเชื่อมประสานเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ช่วยรับกำลังอัดได้นำส่วนผสมนี้ไปศึกษาในการทดลองชุดที่ 2

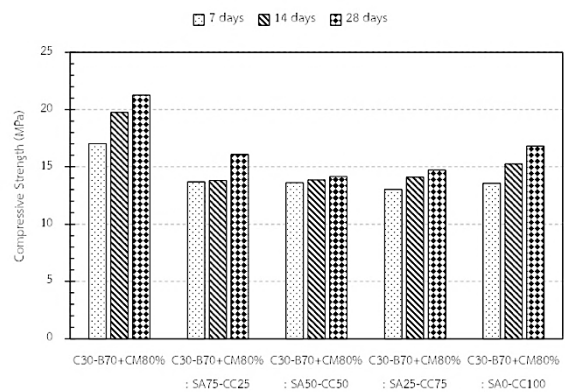


### 3.3 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของบล็อกประสานปูพื้นที่มีส่วนผสมของกากแร่แคลไซต์

#### 3.3.1 ผลของกำลังอัด

รูปที่ 11 แสดงผลกำลังอัดของบล็อกประสานปูพื้นจากเถ้าขาน้อยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่อัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก และใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 80 ที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อกากแร่แคลไซต์ (SA:CC) เท่ากับ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษา พบว่า บล็อกประสานปูพื้นที่ใช้ทรายเป็นมวลรวมละเอียดให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด ในขณะที่การใช้กากแร่แคลไซต์ซึ่งมีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตอาจมีบางส่วนของแคลเซียมที่ถูกสารละลายต่างชะออกมาได้แต่การเกิดสารเชื่อมประสานไม่สมบูรณ์ อาจอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) หรือแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ทำให้เมื่อมีการแทนที่กากแร่แคลไซต์บางส่วนกำลังอัดของบล็อกประสานมีค่าลดลง แต่เมื่อใช้กากแร่แคลไซต์เพิ่มขึ้น แคลเซียมที่ถูกชะละลายออกมาในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ทำให้ความเป็นต่างในระบบเพิ่มขึ้น ช่วยเสริมกำลังอัดของบล็อกประสานปูพื้นได้ [13] การใช้อัตราส่วนทรายต่อกากแร่แคลไซต์ (SA:CC) เท่ากับ 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 16, 14, 15 และ 17 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ที่อายุ 28 วัน ซึ่งร้อยละการแทนที่กากแร่แคลไซต์ด้วยทรายในทุกอัตราส่วนให้ค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกัน

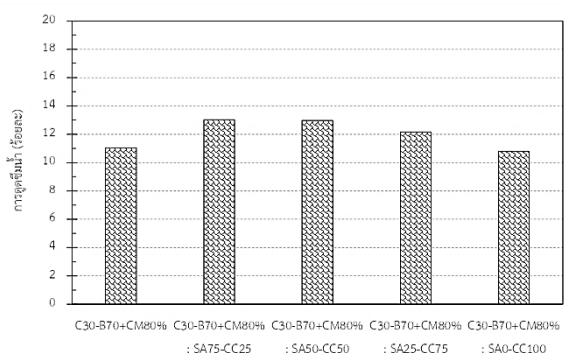
จากผลการศึกษา พบว่า กากแร่แคลไซต์เป็นวัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากโรงงานถลุงแร่ องค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับหินปูน แต่มีขนาดเล็กกว่า และคล้ายกับทรายประกอบด้วยสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ซึ่งบางส่วนของแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้เล็กน้อยจึงทำให้อาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดของบล็อกประสานปูพื้นได้ เนื่องจากในส่วนผสมของบล็อกประสานปูพื้นมีการใช้น้ำเป็นส่วนผสม ในขณะที่ทรายมีสารซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นหลัก มีคุณสมบัติเป็นสารเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมใดๆ รวมถึงทำปฏิกิริยากับน้ำ หากต้องการให้เกิดปฏิกิริยาจะต้องใช้การเร่งปฏิกิริยาด้วยการใช้อุณหภูมิสูงมากกว่า 1000 องศาเซลเซียส



รูปที่ 11 ผลกำลังอัดของบล็อกประสานปูพื้นจากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าขาน้อยที่อัตราส่วน 30:70 และใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 80 ที่มีการใช้กากแร่แคลไซต์แทนทราย

#### 3.3.2 ค่าการดูดซึมน้ำ

รูปที่ 12 แสดงผลของค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานปูพื้นที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายเป็นมวลรวมละเอียด พบว่า การใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำที่สูงขึ้นกว่าการใช้ทราย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณกากแร่แคลไซต์ ร้อยละการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานปูพื้นมีค่าลดลง ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานปูพื้นที่มีการใช้อัตราส่วนทรายต่อกากแร่แคลไซต์ (SA:CC) เท่ากับ 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนัก มีค่าเท่ากับร้อยละ 13, 13, 12 และ 11 ตามลำดับ

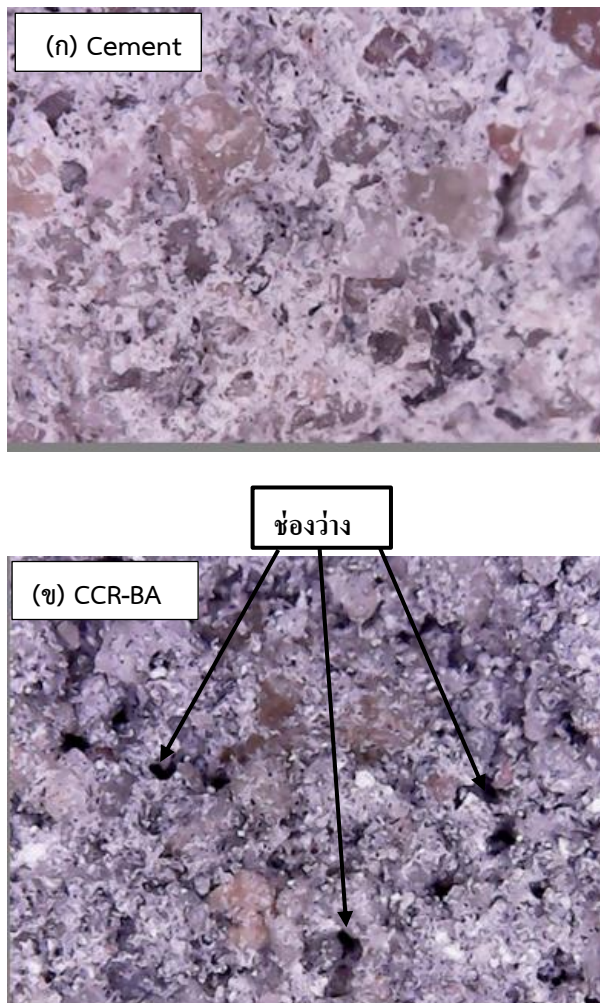


รูปที่ 12 ผลของค่าการดูดซึมน้ำของบล็อกประสานปูพื้นที่ใช้กากแร่กากแร่แคลไซต์แทนทรายเป็นมวลรวมละเอียด

### 3.4 ลักษณะพื้นผิวของบล็อกประสานปูพื้น

รูปที่ 13 แสดงลักษณะพื้นผิวของบล็อกประสานปูพื้นจากการใช้ปูนซีเมนต์ (รูป ก) และการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าขาน้อย (รูป ข) พบว่า บล็อกประสานปูพื้นจากการใช้ปูนซีเมนต์มีลักษณะพื้นผิวเป็นสีขาวและมีความแน่นของเนื้อ

มากกว่า ในส่วนของการใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์กับเถ้าชานอ้อยที่พื้นผิวของบล็อกประสานปูพื้นเป็นสีเข้มที่เกิดจากสีของเถ้าชานอ้อยที่มีสีดำ และเห็นช่องว่างที่มีความพรุนมากกว่า แม้กระนั้นก็ตามพื้นผิวของการใช้วัสดุประสานทั้งสองชนิดในการผลิตบล็อกประสานปูพื้นสามารถสังเกตได้ถึงการผสมรวมกันของมวลรวมและวัสดุประสานที่เกิดการยึดติดเป็นโครงข่ายที่ทำให้บล็อกประสานปูพื้นทั้งสองชนิดสามารถรับกำลังอัดได้



รูปที่ 13 ลักษณะพื้นผิวของบล็อกประสานปูพื้น

#### 4. สรุปผลการทดลอง

บล็อกประสานปูพื้นจากเถ้าชานอ้อยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่ใช้ทรายและกากแร่แคลไซต์เป็นมวลรวมละเอียด สามารถสรุปผลการศึกษา ได้ดังนี้

1. การใช้เถ้าชานอ้อยร่วมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ทำให้วัสดุแข็งตัวและรับกำลังอัดได้ การใช้อัตราส่วนของเถ้าชานอ้อยต่อกากแคลเซียมคาร์ไบด์เท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก และใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 80 ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด ให้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด

2. การใช้อัตราส่วนทรายต่อกากแร่แคลไซต์ 0:100 โดยน้ำหนักเป็นมวลรวมละเอียด ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด แต่ยังมีค่าต่ำกว่าการใช้ทรายเป็นมวลรวมละเอียด และให้ค่าการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียงกับการใช้ทรายเป็นมวลรวมละเอียด

3. เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของบล็อกประสานปูพื้นจากเถ้าชานอ้อยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์พบว่า มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน มอก. 827-2565 [14] (กำลังอัดต้องไม่ต่ำกว่า 40.0 เมกะปาสคาล) ร้อยละ 47.5 แม้กระนั้นก็ตาม บล็อกประสานปูพื้นยังสามารถรับกำลังอัดได้ 21 เมกะปาสคาล เมื่อใช้ทรายเป็นมวลรวมละเอียด และรับกำลังอัดได้ 17 เมกะปาสคาล เมื่อใช้กากแร่แคลไซต์เป็นมวลรวมละเอียด

4. ข้อเสนอแนะในการใช้งาน สามารถนำไปใช้เป็นบล็อกประสานปูพื้นสำหรับงานที่ไม่รับกำลังอัดสูง เช่น พื้นทางเดิน หรือการตกแต่งสนามหญ้า เนื่องจากการนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดปัญหาการกองเก็บและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัด เป็นการจัดการสิ่งแวดล้อมในอีกทางหนึ่งด้วย

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ทูสนันสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ประจำปี 2565 สัญญาเลขที่ FRB650059/NMA/29 ขอขอบคุณบริษัท ไทย อะเซทีลีน จำกัด ที่ให้การสนับสนุนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ บริษัท สุรินทร์ออมย่า เคมีคอล ที่ให้การสนับสนุนกากกากแร่กากแร่แคลไซต์ โรงน้ำตาล สุรินทร์ ที่ให้การสนับสนุนเถ้าชานอ้อย และขอขอบคุณ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ให้ความอนุเคราะห์เครื่องทดสอบการหาค่ากำลังอัดและการทดสอบการกลของวัสดุ



## 6.เอกสารอ้างอิง

- [1] Krammart P, Martputhorn S, Jaturapitakkul C, Ngaopisadarn V. A study of compressive strength of mortar made from calcium carbide residue and fly ash. *Res Dev J.* 1996;7(2):65–75.
- [2] Laosamathikul T. Study on the properties of concrete using calcium carbide residue mixed with fly ash or rice husk-bark ash as a binder [Master's thesis]. Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2008.
- [3] Amnatnua K. Study on high-strength concrete using calcium carbide residue and fly ash as binders [Master's thesis]. Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi; 2010.
- [4] Triphong K, Chiammeepricha W, Abdulmatin A. Utilization of calcium carbide residue and bottom ash as binders for interlocking paving blocks. *J. Eng Srinakharinwirot Univ.* 2019;15(2):1-11.
- [5] Somna K, Jaturapitakkul C, Kajitvichyanukul P. Microstructure of calcium carbide residue–ground fly ash paste. *J. Mater Civ Eng.* 2011;23(3):298-304.
- [6] Rattanashotinunt C, Thairit P, Tangchirapat W, Jaturapitakkul C. Use of calcium carbide residue and bagasse ash mixtures as a new cementitious material in concrete. *Mater Des.* 2013;46:106-11.
- [7] Supromwan J. Physical properties and sulfate resistance of cement mortar using calcite ore waste as sand replacement [Master's thesis]. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2014.
- [8] Thang L, Desa S, Khabbaz H. The influence of bagasse fly ash particle size in controlling expansive soils in combination with hydrated lime. *Aust Geomech J.* 2023. doi: 10.56295/agj5812.
- [9] ASTM - American Society for Testing and Materials. Annual book of ASTM standards, C 618–05. 2021.
- [10] Lima RF, Pavia S. A study of the parameters that determine the reactivity of sugarcane bagasse ashes (SCBA) for use as a binder in construction. *SN Appl Sci.* 2020. doi: 10.1007/S42452-020-03224-W.
- [11] Bonilla M, Borrachero MV, Monzó J, Akasaki JL, Ma-Tay D, Payá J. Study of pozzolanic properties of two sugarcane bagasse ash samples from Honduras. *Key Eng Mater.* 2015. doi:10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.668.357.
- [12] Bayapureddy Y, Muniraj K, Gangireddy MR, Mutukuru R. Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in cement composites: strength, durability, and microstructural analysis. *J. Korean Ceram Soc.* 2020. doi: 10.1007/S43207-020-00055-8.
- [13] Zhang X, Liu Z, Lan XX, Li M, Shi J, Zhao X. Molecular insight into the structural and mechanical properties of Ca-based geopolymers. *J. Build Eng.* 2024. doi: 10.1016/j.jobbe.2024.109570.
- [14] Thai Industrial Standards Institute. Industrial Product Standard for Interlocking Concrete Paving Blocks (TIS 827-2022). Bangkok: Ministry of Industry; 2022.



## การวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ในการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานสำหรับกลุ่มอาคารที่พักอาศัยด้วยวิธีหาค่าความเหมาะสม

### Economic Suitability Analysis of Solar Photovoltaic Modules and Energy Storage Systems Installation in Residential Units Group with Optimization Method

จิรกร รียะทา<sup>1</sup> ยศธนา คุณาทร<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

<sup>2</sup>สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

155 ม.2 ตำบลแม่เหียะ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50100

Jirakorn Riyathar<sup>1</sup>, Yottana Khunatorn<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiangmai University

239 Huay Kaew Road, Mueang, Chiang Mai, Thailand, 50300

<sup>2</sup>Energy Research and Development Institute-Nakornping Chiangmai, Thailand 50100

155 Moo 2, Mae Hia Subdistrict, Mueang District, Chiang Mai Province 50100

\*ผู้รับผิดชอบบทความ: jirakorn\_riyathar@cmu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-8268-3878

Received: 30 September 2024, Revised: 15 January 2025, Accepted: 17 January 2025

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานสำหรับกลุ่มที่พักอาศัยรวม 11 หลังมีห้องพักจำนวน 220 ห้อง โดยใช้การสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์และคำนวณหาค่าความเหมาะสมด้วยวิธีเกรเดียนต์ลดรูปแบบวางนัยทั่วไป GRG (Generalized Reduced Gradient) ที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) แบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) โดยการให้ค่าต่ำสุดของมูลค่ารวมโครงการภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดผลการวิเคราะห์พบว่า การติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10 kW เพียงอย่างเดียวทำให้มูลค่ารวมของโครงการต่ำที่สุด และยังทราบถึงกำลังผลิตที่เหมาะสมในการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์พร้อมระบบกักเก็บพลังงานจะไม่มี ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากราคาต่อหน่วยของระบบกักเก็บพลังงานในปัจจุบันมีราคาสูงจึงใช้เกณฑ์ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานเพื่อให้ใช้ประสิทธิภาพจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ 100% คือเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผลิตเหลือเกินจากความต้องการมาใช้ ในระบบกักเก็บพลังงาน พบว่าค่าที่เหมาะสมของกำลังผลิตของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์คือ 11kW และระบบกักเก็บพลังงาน 8kWh โดยการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีระยะเวลาคืนทุน 2 ปี 9 เดือน สามารถลดการใช้พลังงานจากกริดได้ 23,158 หน่วย/ปี ลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าลงได้ 99,579 บาท/ปี และช่วยลดการปล่อย CO<sub>2</sub> ได้ 27,790 กิโลกรัมต่อปี ในกรณีติดตั้งร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานจะมีระยะเวลาคืนทุน 4 ปี สามารถลดการใช้พลังงานจากกริดได้ 25,689 หน่วย/ปี และช่วยลดการปล่อย CO<sub>2</sub> ได้ 30,827 กิโลกรัมต่อปี ผลลัพธ์เหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการตัดสินใจลงทุนและจัดทำนโยบายในการจัดหาพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล และองค์ความรู้ใหม่ที่ได้รับ คือ ขบวนการหาค่าความเหมาะสมโดยใช้สมการวัตถุประสงค์จากตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

**คำสำคัญ** อัลกอริทึม GRG ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โมเดลทางคณิตศาสตร์ ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์



## Abstract

This article presents an economic feasibility analysis of installing solar photovoltaic (PV) modules and energy storage systems for a residential complex of 11 buildings with 220 rooms. In total. The analysis employed a mathematical model and the Generalized Reduced Gradient (GRG) method to solve nonlinear optimization problems, by finding the minimum total project cost under specified conditions. The analysis reveals that installing a standalone 10 kW solar PV module results in the lowest total project cost and the optimal production capacity. Installing solar PV modules combin with an energy storage system is found to be economically unfeasible due to the high recent cost per unit of energy storage systems. Energy storage is applied for using the 100% solar energy efficiency by storing excess produced energy over the demand. The optimal product of the solar PV module and the energy storage system are 11 kW and 8 kWh, respectively. The installation of solar PV module has a payback period of 2 years and 9 months, which reduce the consumption of grid electricity by 23,158 kWh per year, decrease the electricity costs by 99,579 Baht per year, and diminish the CO<sub>2</sub> emissions by 27,790 kilograms per year. While the solar PV module with an energy storage system, has the payback period in 4 years, with the reduction of grid electricity consumption by 25,689 kWh per year and the reduction of CO<sub>2</sub> emissions by 30,827 kilograms per year. These findings are crucial for decision-making and policy formulation regarding renewable energy adoption as an alternative to fossil fuels. The key contribution of this study is the methodology for optimization using an objective function derived from relevant variables.

**Keywords:** GRG Algorithm, Objective Function, Mathematical Model, Economic Suitability Analysis

## 1. บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ประเทศไทยได้กำหนดเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี ค.ศ. 2050 และปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์ในทุกภาคส่วน ภายในปี ค.ศ. 2065 [1] จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) แม้เกาะในฐานะผู้ผลิตไฟฟ้าหลักจากเชื้อเพลิงถ่านหินจึงตระหนักถึงการเปลี่ยนแปลงนี้ โดยโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีอัตราการปล่อย CO<sub>2</sub> ในระดับ 1.1 - 1.3 kg CO<sub>2</sub>/kWh [2] ประเทศไทยมีแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า [3] ตั้งเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนในระบบไฟฟ้าให้มากขึ้น โรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งเป็นโรงไฟฟ้าที่ผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลจะได้รับผลกระทบเนื่องจากใช้เชื้อเพลิงจากถ่านหินเป็นหลัก ดังนั้นเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเนื่องจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นพื้นที่ยุทธศาสตร์ในการจ่ายไฟฟ้าให้ภาคเหนือ (Must Run) จึงต้องเดินเครื่องต่อเนื่องดังนั้นต้องมีการศึกษาวิจัยความคุ้มค่าของการติดตั้งพลังงานทางเลือกอื่นมาใช้ผลิตไฟฟ้าร่วมกับโรงไฟฟ้าแม่เมาะเพื่อลดการใช้พลังงานจากฟอสซิล ตามที่ กฟผ. ได้จัดทำ

ข้อเสนอโครงการแม่เมาะเมืองน่าอยู่ [4] เพื่อขอรับการพิจารณาเป็นเมืองอัจฉริยะของประเทศไทย (SmartCity) จากสำนักงานเศรษฐกิจดิจิทัลตามนโยบายของรัฐบาล คือการพัฒนาพื้นที่ อ.แม่เมาะให้ เป็นเมืองอัจฉริยะด้านพลังงาน (Smart Energy) ปัจจุบัน กฟผ. มีนโยบายใช้พื้นที่ กฟผ. แม่เมาะ จัดทำศูนย์สาธิตพลังงานโดยให้พื้นที่บ้านพักพนักงาน กฟผ. ได้มีโครงการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบดิจิทัลเพื่อบันทึกข้อมูลการใช้ไฟฟ้า รวมทั้งมีแผนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานเพื่อลดความต้องการการใช้ไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นในการศึกษาความเหมาะสมของขนาดระบบผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงาน การจัดเก็บข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อทำนายถึงพฤติกรรมของผู้ใช้ไฟฟ้าอีกทั้งวิเคราะห์ปริมาณการผลิตไฟฟ้าจากโมดูล แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานเพื่อประมวลผลหาความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ โดยลักษณะการอยู่อาศัยเป็นบ้านพักสำหรับพนักงานที่ปฏิบัติงานใน กฟผ. แม่เมาะ และสามารถพักอาศัยร่วมกับครอบครัวได้การพักอาศัยของพนักงานมีอยู่ 2 ประเภท คือ พนักงานที่ทำงาน



ตามเวลาปกติและพนักงานที่ทำงานเป็นกะโดยบ้านพักพนักงานเป็นที่พักอาศัยประเภทแฟลตมีการจัดกลุ่มสำหรับแฟลตที่อยู่ใกล้กันจะนับเป็น 1 กลุ่มแฟลต โดยบ้านพักพนักงาน กฟผ.แม่เมาะ ถูกแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มแฟลตซึ่งจะมีรูปแบบพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าชุมชนคือมีพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าส่วนมากอยู่ในช่วงกลางวัน สำหรับกลุ่มอาคารที่พักอาศัยในรูปแบบดังกล่าวมีความท้าทายในเรื่องของการลดการใช้พลังงานจากพลังงานทดแทนเนื่องจากพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าส่วนมากอยู่ในช่วงกลางวัน แต่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟได้ในช่วงกลางวันซึ่งการเพิ่มระบบกักเก็บพลังงานเพื่อลดการใช้ไฟฟ้านั้นก็มีต้นทุนที่สูงเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการวิเคราะห์ความเหมาะสมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์โดยวิธีหาค่าความเหมาะสมแบบ GRG [5] โดยมีเป้าหมายคือต้องการติดตั้งระบบผลิตพลังงานพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานพลังงานโดยมีต้นทุนรวมต่ำที่สุด

## 1.2 การทบทวนวรรณกรรม

การศึกษาปัจจัยด้านพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้าของชุมชน [6] โดยใช้วิธีการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากย่านที่พักอาศัยทุก 30 นาทีเป็นเวลาหนึ่งปีและเก็บข้อมูลจากการทำแบบสอบถามครัวเรือนที่เก็บข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าเกี่ยวกับลักษณะที่อยู่อาศัย จำนวนผู้พักอาศัย เครื่องใช้ไฟฟ้า ทักษะคนในการอนุรักษ์พลังงานผลที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่าการวิเคราะห์แบบ Wrapper Feature Selection (WFS) สามารถใช้หาตัวแปรพฤติกรรมที่มีผลต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้า คือ การครอบครองเครื่องใช้ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวจะไม่ส่งผลโดยตรงต่อการใช้ไฟฟ้า ครัวเรือนที่มีเตาไฟฟ้าหนึ่งเครื่องหรือมากกว่านั้นมักจะเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าสูงและใช้คัดเลือกตัวแปรที่ไม่เกี่ยวข้องออกโดยการลบปัจจัยที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้นกับปัจจัยอื่น ๆ ออกเช่น การใช้โทรทัศน์และการใช้ตู้เย็นถูกลบออกเนื่องจากความสัมพันธ์ภายในกับตัวแปรอื่นในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ มีงานวิจัยที่ดำเนินการทดสอบตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยสมการการถดถอยเชิงเส้น [7] 2 แบบ คือ การถดถอยเชิงเส้น, การถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปร ผลการวิจัยพบว่าปัจจัยปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผง

โซล่าเซลล์ขึ้นอยู่กับ ค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ มายังระนาบทำมุมของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และยังพบว่าอุณหภูมิไม่มีผลต่อปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ และมีงานวิจัยที่ทำการวิเคราะห์สมรรถนะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ ณ จังหวัดเชียงใหม่ [8] โดยพบว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลแปรผันตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกบนระนาบโมดูล และแปรผกผันกับอุณหภูมิโมดูล ถ้าอุณหภูมิโมดูลเพิ่มขึ้นที่ค่าความเข้มรังสีเดียวกันกำลังไฟฟ้าที่ได้จะลดลงพบว่าอุณหภูมิแผงโมดูลแผงโมดูลเฉลี่ยสูงสุดประมาณ  $61^{\circ}$  โดยที่อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีผลต่ออุณหภูมิโมดูลอีกด้วย และยังพบว่า ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับมุมของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบโมดูลโดยจะมีความเข้มสูงสุดเมื่อทำมุม  $90^{\circ}$  และมุมเฉียงจะมีประสิทธิภาพลดลงตามค่าโคไซน์ของมุมตกกระทบผลการทดสอบที่ได้จากโมเดลมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงในด้านการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรมเชิงเส้นเพื่อหาความเหมาะสมในการลงทุนระบบพลังงานหมุนเวียนโดยศึกษากับอาคารที่มีการใช้พลังงานเท่ากับศูนย์ (Net Zero Energy Building) ในประเทศเดนมาร์ก [9] พบว่าสามารถหาค่าความต้องการใช้พลังงานสูงสุดจากแผงโซล่าเซลล์และพื้นที่ติดตั้งที่ครอบคลุมความต้องการการใช้ไฟฟ้าในครัวเรือนได้ และอีกงานวิจัยที่มีการศึกษาอาคารที่มีการใช้พลังงานใกล้เคียงเท่ากับศูนย์ [10] โดยได้วิเคราะห์พฤติกรรมการใช้พลังงาน พร้อมทั้งเก็บข้อมูลเครื่องใช้ไฟฟ้าเพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณความต้องการการใช้ไฟฟ้าในแต่ละเดือนมีวัตถุประสงค์ให้อาคารมีการใช้พลังงานสุทธิใกล้เคียงเท่ากับศูนย์พร้อมติดตั้งระบบพลังงานทดแทนให้เพียงพอการดำเนินการวิจัยได้เปลี่ยนอุปกรณ์ทางไฟฟ้าให้ใช้กำลังไฟลดลงติดตั้งโซล่าเซลล์และระบบกักเก็บพลังงาน การปรับปรุงอาคารในด้านสถาปัตยกรรมเพื่อลดความร้อนและภาระของเครื่องปรับอากาศ ทำการทดสอบการจัดการพลังงานในแนวทางการจัดการพลังงานดังนี้ Firm คือ การจัดการพลังงานให้มีความเสถียรและเชื่อถือได้ Peak Shaving คือการจัดการเพื่อลดการใช้พลังงานในช่วงเวลาที่มีความต้องการสูงสุด วิธีนี้ช่วยลดภาระของระบบไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานสูง Backup Power คือ การใช้ระบบพลังงานสำรองทำให้มีไฟฟ้าใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง ลดความเสี่ยงจากการสูญเสียพลังงาน



และช่วยเพิ่มความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า Load Shifting คือ การเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานจากช่วงเวลาที่มีความต้องการพลังงานสูง (Peak Demand) ไปยังช่วงเวลาที่มีความต้องการพลังงานต่ำ (Off-Peak) ซึ่งช่วยลดภาระของระบบไฟฟ้า และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานผลของงานวิจัยดังกล่าวพบว่ามีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดลดลงจากเดิมประมาณ 20% จากมาตรการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ไฟฟ้า และความร้อนที่ลดลงจากการปรับปรุงด้านสถาปัตยกรรม, อาคารที่วิจัยอยู่ในเกณฑ์การใช้พลังงานใกล้เคียงเท่ากับศูนย์, วิธีบริหารจัดการพลังงานใหม่ Firm เหมาะกับอาคารที่เป็นสำนักงานทั่วไป โหมด Peak Shifting เหมาะกับการใช้งานกับประเภทโรงงานหรือโรงแรม โหมด Load Shifting เหมาะกับอาคารที่มีการใช้พลังงานสูงในช่วงเวลาหนึ่ง และอาคารที่ใช่วิจัยเหมาะสมกับโหมด Adaptive Operation เนื่องจากมีการใช้พลังงานที่ค่อนข้างจะผันผวนจำเป็นต้องรู้ค่าของพลังงานที่อาคารต้องการโดยเฉลี่ยตลอดทั้งวัน เพื่อที่จะได้คำนวณและกำหนดขนาดของพลังงานได้ในแต่ละช่วงเวลางานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ของระบบพลังงานทดแทน และระบบกักเก็บพลังงานเพื่อสร้างอาคารที่ใช้พลังงานเป็นศูนย์หรือใกล้เคียงศูนย์ Near Zero (nZEB) โดยมีวัตถุประสงค์คือใช้งบประมาณในการติดตั้งน้อยที่สุด [11] ได้มีการทดสอบแบบจำลอง เพื่อหาแนวทางที่มีความคุ้มค่าในการลงทุนมากที่สุด ผลที่ได้จากงานวิจัยพบว่าการใช้พลังงานทดแทนสามารถใช้เป็นตัวแปรในการประเมินการสร้างอาคารที่ใช้พลังงานเป็นศูนย์หรือใกล้เคียงศูนย์โดยใช้งบประมาณต่ำสุดได้ และงานวิจัยการหาความเหมาะสมสำหรับการใช้พลังงานรวมสุทธิในอาคารเป็นศูนย์ ได้นำเสนอตัวแปรการหาความเหมาะสมที่แตกต่างกันในแต่ละภูมิภาค [12] เช่น ความเหมาะสมในด้าน เศรษฐศาสตร์ สิ่งแวดล้อม พลังงาน ความมั่นคงของกริดจากสภาวะอากาศที่แตกต่างกันในแต่ละภูมิภาคจากหลากหลายงานวิจัยซึ่งมีความแตกต่างกันของแต่ละสภาพปัจจัยแวดล้อมโดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อช่วยนักออกแบบของ Net Zero ในการเลือกตัวเลือกการออกแบบที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากการประเมินอย่างเป็นระบบ และงานวิจัยการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า โดยใช้เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี

ประสิทธิภาพสูงที่สุด [13] พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทโมโนคริสตัลไลน์มีประสิทธิภาพดีที่สุด ระบบไฮบริดที่ออกแบบสามารถลดต้นทุนพลังงานและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ได้อย่างมีประสิทธิภาพสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าระบบทั่วไป และงานวิจัยศึกษาและวิเคราะห์ระบบพลังงานหมุนเวียนแบบออฟกริด [14] มีเป้าหมายหลักคือการลดต้นทุนพลังงานโดยวิเคราะห์จากมูลค่าปัจจุบันสุทธิพบว่า การเพิ่มอัตราเงินเพื่อช่วยลดต้นทุนพลังงานได้และยังนำเสนอผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านลดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และ Shivam K et al. [15] ทบทวนสถานะปัจจุบัน ความท้าทาย และทิศทางในอนาคตของระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดที่รวมแบตเตอรี่มีบทบาทสำคัญในการลดการใช้พลังงานฟอสซิลและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ความท้าทายหลักของระบบนี้คือต้นทุนที่สูงของแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้มากขึ้นหากนำเทคโนโลยี AI มาช่วยจัดการพลังงานอย่างชาญฉลาด โดยเฉพาะในช่วงที่ความต้องการพลังงานสูงสุด (Peak Load) ซึ่งแบตเตอรี่สามารถเข้ามาช่วยลดภาระของระบบได้ ด้วยเหตุนี้ ระบบไฮบริดจึงถือเป็นโซลูชันที่มีศักยภาพสูงสำหรับการผลิตพลังงานอย่างยั่งยืนในอนาคต

## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการหาขนาดที่เหมาะสมในการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ [16] และระบบกักเก็บพลังงานส่วนของการประเมินกำลังไฟฟ้าที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ใช้ข้อมูลการผลิตได้จริงจากอาคารต้นแบบในพื้นที่ศูนย์ฝึกอบรมของ กฟผ. แม่เมาะ ส่วนการคำนวณตัวแปรอื่น ๆ มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

### 2.1 การประเมินกำลังไฟฟ้าที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้

ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากกำลังไฟฟ้าที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้จริงจากอาคารต้นแบบที่มีการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในพื้นที่ศูนย์ฝึกอบรมของ กฟผ. แม่เมาะ ขนาด 55kW ซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณใกล้เคียงกับกลุ่มบ้านพักพนักงาน กฟผ. โดยอนุमानว่าเป็นพื้นที่เดียวกันจึงมีค่าความเข้มแสง อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และมุมตกกระทบของ



รังสีเหมือนกันดังนั้นจึงใช้ข้อมูลที่เกิดขึ้นได้จริงนี้มาประเมินสำหรับพื้นที่บ้านพักพนักงาน กฟผ. แม่เมาะ

## 2.2 หลักการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน [11, 17, 18]

การชาร์จหรือการปล่อยประจุของระบบกักเก็บพลังงานในงานวิจัยนี้ใช้ระบบกักเก็บพลังงานจากแบตเตอรี่ ดังนั้นหากจะนำไปคำนวณหาความเหมาะสมจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง และจัดให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์โดยการสร้างสมการตัวแบบของระบบกักเก็บพลังงาน สถานการณ์ชาร์จแบตเตอรี่ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

การชาร์จประจุแบตเตอรี่

$$BL_h = BL_{h-1} + \frac{(\eta_{BC} * \eta_{AD}) * eB_{in_h}}{\eta_{BD} * \eta_{DA}} \quad (1)$$

การปล่อยประจุแบตเตอรี่

$$BL_h = BL_{h-1} - \frac{(\eta_{BC} * \eta_{AD}) * eB_{out_h}}{\eta_{BD} * \eta_{DA}} \quad (2)$$

เมื่อ  $BL_h \geq SOC_{min} * capB$   
 $BL_h \leq capB$   
 $BL_{h=24} = capB$

|              |                                                              |
|--------------|--------------------------------------------------------------|
| $\eta_{BC}$  | คือ ประสิทธิภาพในการชาร์จแบตเตอรี่                           |
| $\eta_{AD}$  | คือ ประสิทธิภาพในการปล่อยประจุของแบตเตอรี่                   |
| $\eta_{BD}$  | คือ ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ |
| $\eta_{DA}$  | คือ ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง |
| $eB_{in_h}$  | คือ พลังงานที่จ่ายเข้าไปยังแบตเตอรี่ในช่วงเวลา h (kWh)       |
| $eB_{out_h}$ | คือ พลังงานที่แบตเตอรี่จ่ายออกมาในช่วงเวลา h (kWh)           |
| $SOC_{min}$  | คือ ระดับประจุน้อยที่สุดที่แบตเตอรี่สามารถคงไว้ (%)          |
| $capB$       | คือ ขนาดความจุของแบตเตอรี่ (kWh)                             |
| $BL_h$       | คือ ความจุแบตเตอรี่ ณ เวลาเริ่มต้น h                         |

$BL_{h-1}$  คือ ความจุแบตเตอรี่ ณ เวลาก่อนหน้า

$BL_{h=24}$  คือ ความจุแบตเตอรี่ ณ เวลาสิ้นสุด

ข้อจำกัดของการชาร์จและการปล่อยประจุสูงสุดของแบตเตอรี่ประกอบด้วยเงื่อนไขดังนี้

$$eB_{in_h} * (\eta_{BC} * \eta_{AD}) + \frac{eB_{out_h}}{\eta_{BD} * \eta_{AD}} \leq F_{max} * capB * \Delta h \quad (3)$$

$F_{max}$  คือ อัตราการชาร์จและการปล่อยประจุของระบบกักเก็บพลังงานสูงสุด (%)

$K_h$  คือ การไหลของพลังงานในโหมดการชาร์จแบตเตอรี่ โดยให้เป็นตัวแปรไบนารีที่มีค่าเท่ากับ 1

$\varphi_h$  คือ การไหลของพลังงานในโหมดปล่อยประจุออกจากแบตเตอรี่ โดยให้เป็นตัวแปรไบนารีที่มีค่าเท่ากับ 1

$\Delta h$  คือ ระยะเวลาในช่วงเวลาที่พิจารณา

$$eB_{in_h} < capB * K_h$$

$$eB_{out_h} \leq capB * \varphi_h$$

$$K_h + \varphi_h \leq 1$$

กำหนดให้มีพลังงานไหลเข้าแบตเตอรี่เมื่อตัวแปรไบนารี  $K_h$  และ  $\varphi_h$  มีค่าเท่ากับ 1

$$eB_{in_h} - Mbig * K_h \leq 0$$

$$eB_{in_h} - Mbig * (1 - K_h) \geq \varepsilon$$

$$eB_{out_h} - Mbig * \varphi_h \leq 0$$

$$eB_{out_h} - Mbig * (1 - \varphi_h) \geq \varepsilon$$

$Mbig$  คือ ค่าคงที่พลังงานที่อยู่ในขอบเขตที่กำหนดเพื่อควบคุมการทำงานของโหมดชาร์จหรือคายประจุในระบบแบตเตอรี่เมื่อตัวแปรไบนารีเปลี่ยนค่า

เมื่อ  $\varepsilon$  คือ ปริมาณพลังงานที่น้อยที่สุดที่ถูกจ่ายเข้าไปในแบตเตอรี่เมื่อตัวแปรไบนารีมีค่าเท่ากับ 1

การคำนวณหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานจากแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เท่ากับ 320 โวลต์ อัตราการปล่อย



ประจุของแบตเตอรี่แบบ deep-cycle ที่ 60% ของประจุรวม โดยประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์อยู่ที่ 85% ดังนี้

$$Cap = \frac{Unit \times 1000}{V \cdot Eff^b \cdot Eff^i} \quad (3)$$

โดยกำหนดให้  $V$  คือ แรงดันของแบตเตอรี่

$Eff^b$  คือ ประสิทธิภาพแบตเตอรี่

$Eff^i$  คือ ประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์

$Cap$  คือ ขนาดความจุของแบตเตอรี่ (Ah)

$Unit$  คือ ปริมาณการใช้ไฟฟ้าต่อวัน

## 2.4 การเก็บข้อมูล

### 2.4.1 การเก็บข้อมูลการใช้พลังงาน

ในงานวิจัยนี้ใช้มิเตอร์ไฟฟ้าแบบดิจิทัลในการเก็บข้อมูลพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ปีสำหรับบ้านพักพนักงาน กฟผ. แม่เมาะ มีจำนวน 11 หลัง แต่ละหลังมีความสูง 4 ชั้นจำนวนห้องหลังละ 20 ห้องดังนั้นจึงมีห้องพักทั้งสิ้น 220 ห้องเพื่อศึกษาพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าทุก 15 นาทีตัวอย่างข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 1

| 641 |                   |        |      |        |       |
|-----|-------------------|--------|------|--------|-------|
|     | Time              | Room   | I    | V      | PF    |
| 110 | 1/1/2021 00:00:00 | 641-14 | 0.21 | 227.88 | -1.0  |
| 111 | 1/1/2021 00:00:00 | 641-22 | 0.33 | 227.66 | 0.44  |
| 260 | 1/1/2021 00:00:00 | 641-24 | 4.66 | 227.65 | -0.94 |
| 261 | 1/1/2021 00:00:00 | 641-31 | 0.57 | 227.82 | -0.98 |
| 262 | 1/1/2021 00:00:00 | 641-32 | 0.23 | 226.81 | -1.0  |
| 263 | 1/1/2021 00:00:00 | 641-33 | 0.2  | 227.77 | -1.0  |
| 264 | 1/1/2021 00:00:00 | 641-34 | 0.23 | 226.72 | -1.0  |

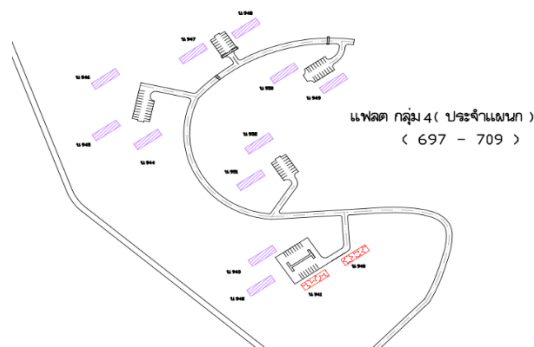
รูปที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลการใช้ไฟฟ้าที่บันทึกจากเซอร์ฟเวอร์แผนสารสนเทศ กฟผ. ของกลุ่มตัวอย่าง

จากรูปที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลข้อมูลดิบที่ได้ประกอบด้วยข้อมูลเลขอาคารต่อด้วยเลขห้องพัก ข้อมูลทางไฟฟ้าที่บันทึกได้ ได้แก่ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่าความต่างเฟส

หลังจากนั้นนำข้อมูลข้างต้นคัดกรองแบ่งกลุ่ม ให้อยู่ในรูปแบบที่ต้องการคือปริมาณการใช้ไฟฟ้าของแต่ละห้องพัก รวมเป็นการใช้งานของกลุ่มอาคาร ทุก ๆ 15 นาที

### 2.4.2 การตรวจวัดขนาดพื้นที่ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

ตรวจวัดและประเมินพื้นที่ที่สามารถติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในบ้านพักพนักงานโดยประเมินจากพื้นที่ว่างรอบกลุ่มอาคารโดยกำหนดให้พื้นที่ระบายสีเทาคือพื้นที่ติดตั้ง ดังตัวอย่างรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวอย่างการประเมินขนาดพื้นที่ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในแพลตฟอร์ม 4

## 2.5 การวิเคราะห์หาความเหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานทางด้านเศรษฐศาสตร์

Objective Function (OF) [11] คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยตามวัตถุประสงค์ในการติดตั้งที่มีความสัมพันธ์กัน คือ

- ขนาดโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์
- ขนาดระบบกักเก็บพลังงาน
- ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการติดตั้ง
- ค่าใช้จ่ายอื่นๆตลอดระยะเวลาโครงการ

โดยรูปแบบที่มาของฟังก์ชันวัตถุประสงค์สร้างขึ้นเพื่อคำนวณต้นทุนในการติดตั้งระบบ ประกอบด้วยค่าอุปกรณ์ ค่าแรงในการติดตั้ง ค่าบำรุงรักษาตลอดอายุโครงการ ค่าไฟฟ้าที่ลดได้จากการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานตลอดอายุโครงการ มูลค่าซาก ค่าไฟฟ้าที่ลดได้และค่าบำรุงรักษาตลอดอายุโครงการนำมาแปลงเป็นมูลค่าปัจจุบันของเงิน กำหนดให้โครงการมีระยะเวลาเท่ากับอายุของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์คือ 25 ปี เพื่อคำนวณต้นทุนในการบำรุงรักษาตลอดช่วงระยะเวลาของโครงการ คำนึงถึงหลักเศรษฐศาสตร์มูลค่าของเงินที่เปลี่ยนแปลงตามเงินเฟ้อในอนาคต ในงานวิจัยนี้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ มูลค่ารวมตลอดโครงการที่น้อยที่สุดที่มีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์และวิศวกรรมโดยกำหนดสมการดังนี้



$$OF = (capPV * ccPV + capPV * ccACS + capPV * ccISTL + capB * ccB + capPV * ccIVT) + ((capPV * ccMT + unitEL * e_{tariff}) * PV) - (SV * (capPV * ccPV + capPV * ccACS + capB * ccB + capPV * ccIVT)) \quad (4)$$

|                     |                                                    |
|---------------------|----------------------------------------------------|
| capPV               | คือ กำลังผลิตของโมดูลที่ต้องการติดตั้ง (kW)        |
| ccPV                | คือ ต้นทุนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (บาท/kW)            |
| ccACS               | คือ ต้นทุนค่าอุปกรณ์ติดตั้งระบบ (บาท/kW)           |
| ccISTL              | คือ ต้นทุนค่าแรงติดตั้ง (บาท/kW)                   |
| ccIVT               | คือ ต้นทุนอินเวอร์เตอร์ (บาท/kW)                   |
| capB                | คือ ขนาดของแบตเตอรี่ที่ต้องการติดตั้ง (kW)         |
| ccB                 | คือ ต้นทุนของแบตเตอรี่ (บาท/kW/ปี)                 |
| ccMT                | คือ ต้นทุนค่าบำรุงรักษา (บาท/kW/ปี)                |
| unitEL              | คือ หน่วยการใช้ไฟฟ้า (kWh/ปี)                      |
| e <sub>tariff</sub> | คือ อัตราค่าไฟฟ้าจากผู้ให้บริการขายไฟฟ้า (บาท/kWh) |
| PV                  | คือ มูลค่าปัจจุบันของโครงการ                       |
| SV                  | คือ มูลค่าซาก                                      |

ในการคำนวณมูลค่ารวมตลอดโครงการจะมีตัวแปรที่เป็นค่าใช้จ่ายทุกปีตลอดโครงการจึงต้องนำตัวแปรนี้คำนวณเป็นมูลค่าปัจจุบันของโครงการ Present Value (PV) มูลค่าปัจจุบัน [19, 20] คืออัตราส่วนจะลดมูลค่าของกระแสเงินสดในอนาคตให้อยู่ในมูลค่าปัจจุบันซึ่งช่วยให้สามารถเปรียบเทียบการลงทุนหรือกระแสเงินสดในระยะเวลต่างๆ ได้ ดังสมการที่ 5

$$PV = \frac{C}{(1+r)^t} \quad (5)$$

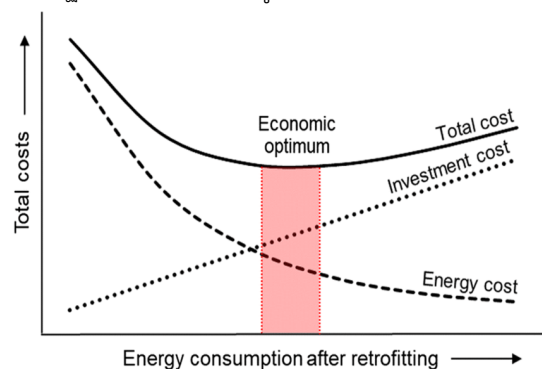
โดย PV = มูลค่าปัจจุบัน  
C = กระแสเงินสดในอนาคต  
r = อัตราส่วนลด  
t = ช่วงเวลา (ปี)

กำหนดให้มีสมมติฐานในการคำนวณดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมมติฐานการวิเคราะห์หาความเหมาะสมและต้นทุนในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงาน

| ข้อมูล                       | สมมติฐาน      | อ้างอิง |
|------------------------------|---------------|---------|
| อายุโครงการ                  | 25 ปี         | [21]    |
| ต้นทุนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์   | 30 บาท/W      | [21]    |
| อินเวอร์เตอร์                | บาท           | [21]    |
| -Huawei Inverter 5kW 3 Phase | 35650         |         |
| -Huawei Inverter 10kW3 Phase | 58150         |         |
| -Huawei Inverter 15kW3 Phase | 64420         |         |
| ต้นทุนแบตเตอรี่              | 20,000 บาท/kW | [21]    |
| อัตราค่าไฟฟ้า                | 4.3 บาท/หน่วย | [22]    |
| ค่าติดตั้ง                   | 4000 บาท/kW   | [21]    |
| ค่าซ่อมบำรุง                 | 50 บาท/แผง    | [23]    |
| ค่าอุปกรณ์ในการติดตั้ง       | 500 บาท/แผง   | [21]    |
| มูลค่าซาก                    | 1%            | [24]    |
| Discount Rate                | 6.25%         | [25,26] |
| Battery Efficiency           | 60%           | [21]    |

เมื่อแทนตัวแปรสมมติฐานทั้งหมดผลที่ได้ คือ มูลค่ารวมของโครงการโดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ต้องการให้มูลค่ารวมของโครงการต่ำที่สุดจึงจะมีความเหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภูมิแสดงการประเมินกำลังผลิตของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และขนาดระบบกักเก็บพลังงานที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำที่สุด ที่มา: Felius et al., 2020 [27]

ตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์มูลค่ารวมของโครงการคือกำลังผลิตของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ และขนาดของระบบกักเก็บพลังงานที่ติดตั้ง ในการหาค่าความเหมาะสมของสมการนี้จึงใช้วิธี GRG [2] เพื่อแทนตัว



แปรทั้ง 2 ตัวในสมการ และเปลี่ยนแปลงตัวแปรไปเรื่อย ๆ จนพบจุดที่ต่ำที่สุดของมูลค่ารวมโครงการ และจะทำให้ทราบกำลังผลิตของโมดูล และ ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานที่เหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์ จากนั้นจึงคำนวณระยะเวลาคืนทุนโดยที่ระยะเวลาคืนทุน [20] คำนวณจากสมการที่ (6)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{มูลค่าปัจจุบันของระบบ}}{\text{มูลค่าพลังงานที่ประหยัดได้รายปี}} \quad (6)$$

## 2.6 การวิเคราะห์หาความเหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้า

พลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานทางด้าน

เศรษฐศาสตร์ด้วยวิธีเกรเดียนต์ลดรูปแบบวางนัยทั่วไป GRG.

(Generalized Reduced Gradient) [2]

อัลกอริธึม GRG (Generalized Reduced Gradient)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการคำนวณหาความเหมาะสม (optimization) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันที่มีข้อจำกัดในรูปแบบที่หลากหลายทั้งที่เป็นเชิงเส้น (linear) หรือไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ซึ่งมักพบในการคำนวณทางคณิตศาสตร์และวิศวกรรม โดยเฉพาะสำหรับปัญหาที่มีฟังก์ชันและข้อจำกัดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) โดยการกำหนดปัญหาให้เป็นฟังก์ชัน ซึ่งต้องการหาค่าต่ำสุดคำนวณค่าความชันโดยใช้การประมาณค่าความชันของฟังก์ชันและข้อจำกัดโดยใช้วิธี เช่น การหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันและอเบตค่าในแต่ละรอบของตัวแปรที่เป็นไปตามข้อจำกัดที่ให้ไว้ในงานวิจัยนี้ตัวแปรคือ กำลังผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์และขนาดของระบบกักเก็บพลังงานโดยการใช้วิธีการค้นหาในทิศทางที่เหมาะสม เช่น วิธีกราดิเอนต์จะเข้าซ้ำโดยการเปลี่ยนตัวแปรที่กำหนดจนกว่าจะถึงเกณฑ์หยุด เช่น จำนวนรอบที่กำหนด หรือเมื่อการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันวัตถุมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนด โดยจะทำให้ทราบผลของตัวแปรที่ทำให้เกิดเกณฑ์หยุด และผลของตัวแปรอาจเปลี่ยนแปลงออกไปตามข้อจำกัดที่กำหนดเพิ่มเติม

GRG เป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือข้อจำกัดที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งในทางเศรษฐศาสตร์ โดยที่ ข้อได้เปรียบของ GRG เมื่อเทียบกับวิธีอื่น คือ

1.) เปรียบเทียบกับ Linear Programming (LP)

LP เหมาะสำหรับปัญหาที่ทุกสมการเป็นเชิงเส้น แต่ไม่สามารถจัดการกับปัญหาที่มีฟังก์ชันหรือข้อจำกัดที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้

2.) เปรียบเทียบกับ Newton's Method: Newton's Method ต้องการการคำนวณ Hessian Matrix ซึ่งอาจมีค่าใช้จ่ายในการคำนวณสูง โดยเฉพาะเมื่อจำนวนตัวแปรเพิ่มขึ้น GRG มีประสิทธิภาพมากกว่าในปัญหาที่มีตัวแปรจำนวนมากหรือข้อจำกัดซับซ้อน

3.) เปรียบเทียบกับ Stochastic Methods (เช่น Genetic Algorithm, Simulated Annealing) Stochastic Methods มักเหมาะสมกับปัญหาที่เป็น Non-convex หรือมีฟังก์ชันที่ไม่สามารถหา Gradient ได้ง่ายอย่างใดก็ตาม GRG จะรวดเร็วและแม่นยำกว่าสำหรับปัญหาที่ฟังก์ชันสามารถหา Gradient ได้

### 2.6.1 สร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อจำกัด

สร้างสมการวัตถุประสงค์  $f(x,y)$  ที่ต้องการหาค่าน้อยที่สุด โดยงานวิจัยนี้ถูกกำหนดไว้ในสมการที่ (4) โดยมีข้อจำกัดคือ  $g(x,y)$  คือขนาดเซลล์แสงอาทิตย์ และขนาดของระบบกักเก็บพลังงานที่ต้องการติดตั้ง โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังสมการที่ (7)

$$\begin{aligned} \text{minimize } f(\text{capPV}, \text{capB}) = & (\text{capPV} * \text{ccPV} + \text{capPV} * \text{ccACS} \\ & + \text{capPV} * \text{ccISTL} + \text{capB} * \text{ccB} \\ & + \text{capPV} * \text{ccIVT}) + ((\text{capPV} * \text{ccMT} \\ & + \text{unitEL} * \text{e}_{\text{tariff}}) * \text{PV}) - \\ & (\text{SV} * (\text{capPV} * \text{ccPV} + \text{capPV} * \text{ccACS} \\ & + \text{capB} * \text{ccB} + \text{capPV} * \text{ccIVT})) \end{aligned} \quad (7)$$

โดยมีเงื่อนไขที่กำหนดคือ  $g(x,y)$  โดยเราสามารถกำหนด capB เพื่อหา capPV หรือสลับกันได้ดังสมการ

$$\text{Subject to } g(\text{capPV}, \text{capB}) \quad (8)$$

### 2.6.2 คำนวณ Reduced Gradient

มีวัตถุประสงค์ในการใช้การประมาณค่า Gradient ของฟังก์ชันวัตถุและข้อจำกัด

$\nabla f(x)$  คือ ฟังก์ชันวัตถุ: Gradient ของ  $f(x)$

$\nabla g_i(x)$  คือ ข้อจำกัดไม่เชิงเส้น: Gradient ของ  $g(x)$



เมื่อมีการประมาณได้ค่าหนึ่งแล้วจะทำการคำนวณ Reduce Gradient เพื่อลดมิติ และหาทิศทางในการแก้ปัญหาโดยใช้ Lagrangian Function เพื่อรวมข้อจำกัดในปัญหา optimization โดยมีสมการดังนี้

$$L(x, \lambda, \mu) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x) + \sum_{j=1}^p u_j h_j(x) \quad (9)$$

โดย  $\lambda_i$  และ  $u_j$  เป็น multipliers สำหรับข้อจำกัดที่ไม่เชิงเส้นและเชิงเส้นตามลำดับ

$g_i(x)$  คือ ข้อจำกัดเชิงลบแบบไม่เท่ากัน (Inequality constraint),

$h_j(x)$  คือ ข้อจำกัดเชิงเส้นแบบเท่ากัน (Equality constraint)

$h_j(x)$  คือ ตัวคูณลากรางเซียน (Lagrange multiplier) สำหรับข้อจำกัดเชิงลบ

$u_j$  คือ ตัวคูณลากรางเซียนสำหรับข้อจำกัดเชิงเส้น

$p, m$  คือ จำนวนข้อจำกัดที่มี (ทำตาราง)

### 2.6.3 การอัปเดตค่าตัวแปร

การอัปเดตค่าตัวแปรใน GRG ใช้ gradient ที่ลดมิติ และ Lagrangian multipliers จะทำให้เปลี่ยนตัวแปรในการคำนวณให้สอดคล้องกับข้อจำกัดโดยมีสมการอัปเดตค่าตัวแปรดังนี้

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k \nabla f^R(x_k) \quad (10)$$

โดยที่  $\alpha_k$  เป็นขนาดของขั้นตอน (step size) ที่กำหนดในแต่ละรอบ

$x_k$  คือ ค่าของตัวแปร  $x$  ในรอบที่  $k$  (ค่าเริ่มต้น)

$x_{k+1}$  คือ ค่าของตัวแปร  $x$  ในรอบถัดไป

$f^R(x)$  คือ ฟังก์ชันที่ต้องการลดค่า

$\nabla f^R$  คือ เวกเตอร์เกรเดียน (Gradient vector) ของฟังก์ชัน  $f^R(x)$  ที่จุด  $x_k$

### 2.7 ประสิทธิภาพทางพลังงาน

เมื่อหาค่าที่เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์แล้วต้องมีการศึกษาปัจจัยเพิ่มเติมเพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ และประสิทธิภาพของการลดการใช้พลังงาน

PV Utilization rate [28] หมายถึง อัตราการใช้ประโยชน์จากระบบพลังงานแสงอาทิตย์โดยวัดจากพลังงานที่ได้รับจริงจากระบบเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานสูงสุดที่ระบบสามารถผลิตได้จากการคำนวณช่วยให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ โดยมีสมการดังนี้

PV Utilization rate=

$$\frac{\text{พลังงานที่ใช้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์}}{\text{พลังงานที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้}} \times 100\% \quad (11)$$

สัดส่วนพลังงานที่ลดได้ [29] การคำนวณสัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ลดได้ช่วยให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการลดการใช้พลังงาน และช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับการลงทุนในเทคโนโลยีใหม่หรือการดำเนินการเพื่อประหยัดพลังงาน โดยมีสมการดังนี้

$$\frac{\text{สัดส่วนพลังงานที่ลดได้} = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ลดได้}}{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ก่อนการลด}} \times 100\% \quad (12)$$

## 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

### 3.1 พื้นที่ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

ในการประเมินพื้นที่ติดตั้งกำหนดให้ขนาดโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์รวมระยะห่างระหว่างแผงข้างละ 0.01 เมตร คือ ขนาด 2X1 เมตร และกำหนดให้เว้นช่องว่างทางเดินเพื่อบำรุงรักษาโมดูลขนาด 1 เมตร กำหนดให้พื้นที่ว่างในการบำรุงรักษามีขนาด 20% ของพื้นที่ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดผลที่ประเมินได้ตามตารางที่ 2



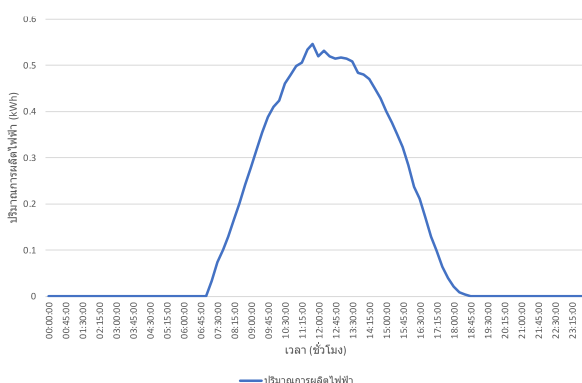
ตารางที่ 2 พื้นที่ประเมินสำหรับติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

| พื้นที่ว่างใน<br>การติดตั้ง (ตร.<br>ม.) | พื้นที่สามารถติดตั้ง<br>โมดูลเซลล์<br>แสงอาทิตย์ได้<br>(ตร.ม.) | จำนวน<br>โมดูลที่<br>สามารถ<br>ติดตั้งได้<br>(โมดูล) | พื้นที่สำหรับ<br>บำรุงรักษา<br>(ตร.ม.) |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 2487                                    | 1990                                                           | 995                                                  | 497                                    |

### 3.2 ปริมาณการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากการประเมินกำลังไฟฟ้าที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้สามารถนำข้อมูลการผลิตได้จริงจากอาคารต้นแบบที่มีการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในพื้นที่ศูนย์ฝึกอบรมของ กฟผ. แม่เมาะ ขนาด 55kW ซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณใกล้เคียงกับกลุ่มบ้านพักพนักงาน กฟผ.แม่เมาะ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำข้อมูลการผลิตไฟฟ้าทุก 15 นาทีของอาคารต้นแบบมาวิเคราะห์โดยค่าที่นำมาใช้คือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อ 1 kW ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4

จากบทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำลังผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์คืองานวิจัยที่ [8] โดยผลที่ได้มีความแตกต่างเนื่องจากการเป็นกรทำการกำลังผลิตไฟฟ้าจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องด้านอุณหภูมิ ความเข้มของรังสี มุมรังสีที่ตกกระทบโมดูลเพื่อปรับใช้งานได้ตามสถานะของแต่ละพื้นที่ แต่งานวิจัยนี้ได้นำผลการผลิตไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในพื้นที่จริงมาวิเคราะห์

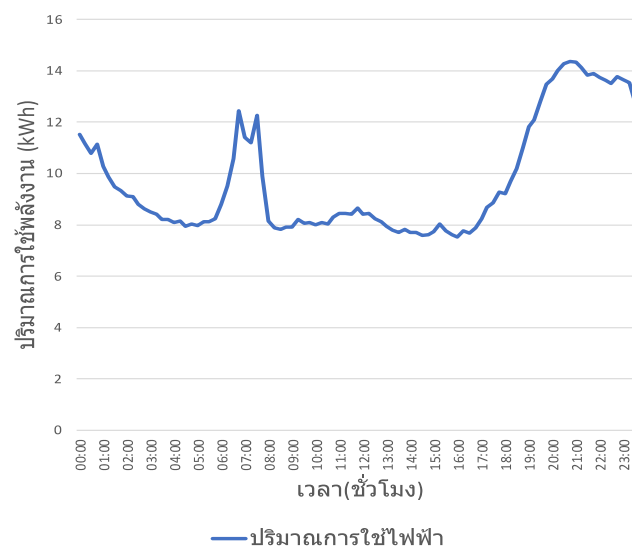


รูปที่ 4 ตัวอย่างข้อมูลการผลิตไฟฟ้าทุก 15 นาทีของอาคารต้นแบบ

### 3.3 พฤติกรรมการใช้พลังงานของกลุ่มบ้านพักพนักงาน

เมื่อนำข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้ามาวิเคราะห์พบว่า มีห้องที่ใช้ไฟฟ้าเพียง 72 ห้องจากทั้งหมด 220 ห้อง เมื่อวิเคราะห์ปริมาณ

การใช้ไฟฟ้าทุก 15 นาทีของอาคารต้นแบบมาแสดงข้อมูลในรูปแบบแผนภูมิ พบว่า มีพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าในปริมาณสูงช่วงกลางคืน และต่ำในช่วงกลางวัน มีการใช้ไฟฟ้าสูงในช่วงเวลา 20.00 น.-23.30 น. และ เวลา 6.00 น. - 7.00 น. โดยแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 พฤติกรรมการใช้ ไฟฟ้าเฉลี่ยของกลุ่มบ้านพักพนักงาน กฟผ. เป็นระยะเวลา 1 ปี

จากบทบทวนวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปัจจัยด้านพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าประกอบด้วยงานวิจัย [6] ในงานวิจัยใช้ข้อมูลจากใช้ไฟฟ้าทุก 30 นาที ส่วนงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลทุก 15 นาที เป็นเวลา 1 ปีเช่นเดียวกัน ข้อแตกต่างสำหรับพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าได้ใช้ WFS ในการคัดแยกพฤติกรรมที่มีผลต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้าแต่งงานวิจัยนี้ใช้พฤติกรรมปริมาณการใช้ไฟฟ้าตามช่วงเวลา

### 3.4 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากการสร้างโมเดลทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3) โดยใช้ข้อมูลการใช้ไฟฟ้า และปริมาณการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับสมมติฐานต้นทุนราคาที่กำหนดไว้ในตารางที่ 1 มาคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่าสามารถแบ่งการหาความเหมาะสมในการติดตั้งได้ 2 กรณี ดังนี้

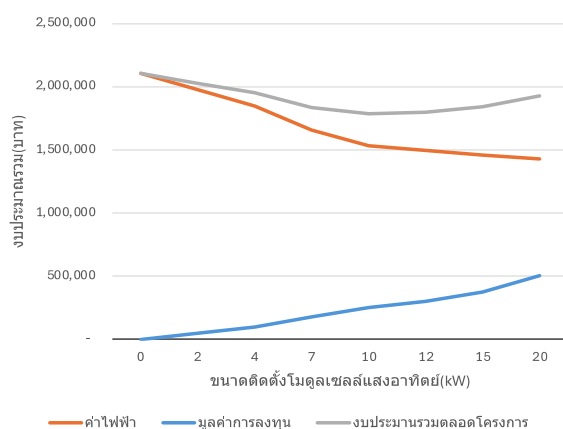
#### 3.4.1 กรณีติดตั้งเฉพาะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

ในกรณีติดตั้งเฉพาะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ GRG หามูลค่ารวมของโครงการที่ต่ำที่สุดพบว่าสามารถหาได้โดยมีค่ากำลังการผลิตของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ 9 kW ข้อมูลดังแสดงตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลการคำนวณค่าที่เหมาะสมในกรณีติดตั้ง  
เฉพาะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

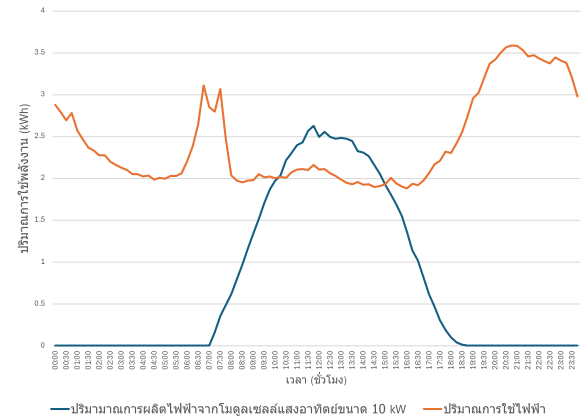
| PV (KW) | Electricity<br>Cost | Investment<br>Cost | Total Cost |
|---------|---------------------|--------------------|------------|
| 0       | 2,105,663           | -                  | 2,105,663  |
| 2       | 1,977,440           | 50,193             | 2,027,634  |
| 4       | 1,849,218           | 100,387            | 1,949,605  |
| 7       | 1,658,930           | 175,677            | 1,834,607  |
| 10      | 1,534,166           | 250,967            | 1,785,134  |
| 12      | 1,496,481           | 301,161            | 1,797,641  |
| 15      | 1,462,028           | 376,451            | 1,838,479  |
| 20      | 1,428,639           | 501,934            | 1,930,573  |

เมื่อนำตัวแปรค่าไฟฟ้า มูลค่าการลงทุน และมูลค่ารวมของ  
โครงการมาแสดงข้อมูลในรูปแบบแผนภูมิจะเห็นว่าจุดที่  
เหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์ คือ จุดที่ต่ำที่สุดของเส้น  
งบประมาณรวมโครงการเนื่องจากหากติดตั้งเพิ่มจะใช้งบ  
ลงทุนเพิ่มแต่ค่าไฟฟ้าลดลงได้น้อย ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภูมิแสดงการประเมินขนาดโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์  
ที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำที่สุด

โดยการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ 10 kW มีระยะเวลา  
คืนทุนคือ 2 ปี 9 เดือนในด้านประสิทธิภาพทางพลังงาน  
พบว่า PV Utilization Rate = 89.14% และสัดส่วน  
พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ = 27.14% เมื่อนำกำลังไฟฟ้าที่โมดูล  
เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้เทียบกับปริมาณการใช้  
พลังงานแสดงข้อมูลในรูปแบบแผนภูมิ โดยแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กำลังไฟฟ้าที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้  
เทียบกับปริมาณการใช้พลังงาน

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าแผนภูมิการผลิตไฟฟ้าของ  
โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ใต้แผนภูมิการใช้พลังงานซึ่ง  
ครอบคลุมการใช้ไฟฟ้ามากกว่า 94 % จึงทำให้การติดตั้ง  
โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์คุ้มค่าช่วยลดค่าใช้จ่ายพลังงาน  
ได้มากเมื่อรวมกับมูลค่าการลงทุนจึงทำให้มูลค่ารวมตลอด  
โครงการต่ำที่สุด

### 3.4.2 กรณีติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบ กักเก็บพลังงาน

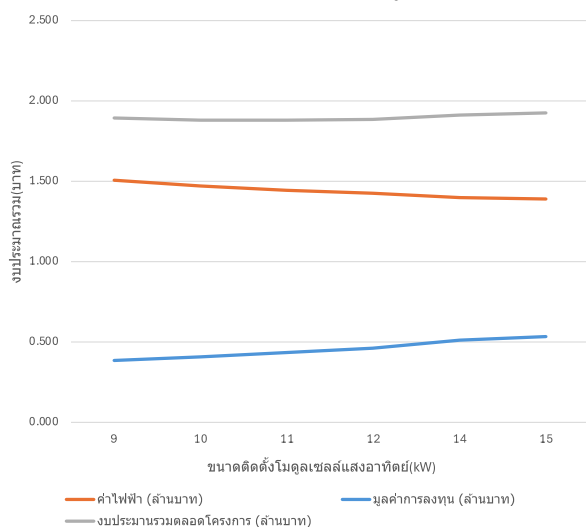
ในกรณีติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบ  
กักเก็บพลังงานโดยใช้ GRG หามูลค่ารวมของโครงการที่ต่ำ  
ที่สุดพบว่า ค่าที่เหมาะสมที่สุดคือการไม่ติดตั้งระบบกักเก็บ  
พลังงานพลังงานเนื่องจากราคาแบตเตอรี่ที่สูง ณ ปัจจุบัน  
ดังนั้นจึงใช้เกณฑ์ทางประสิทธิภาพทางพลังงานในการหา  
ขนาดระบบกักเก็บพลังงานโดยการใช้พลังงานจากโมดูล  
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตเกินความต้องการให้คุ้มค่าที่สุด  
หรือ PV Utilization 100% พบว่าต้องติดตั้งระบบกักเก็บ  
พลังงานพลังงานขนาด 8 kW.จะทำให้ได้ PV Utilization  
99% แต่ทั้งนี้เมื่อกำหนดให้ระบบกักเก็บพลังงานมีขนาด 8  
kWh.แล้ว ใช้วิธี GRG หา มูลค่ารวมของโครงการที่ต่ำที่สุด  
อีกครั้งพบว่า กำลังผลิตของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์  
เปลี่ยนไปจาก 9 kW เป็น 11 kW ทั้งนี้พบว่า PV  
Utilization ลดลงเหลือ 90% รายละเอียดข้อมูลดังแสดง  
ตามตารางที่ 4



ตารางที่ 4 แสดงผลการคำนวณค่าที่เหมาะสมในกรณีติดตั้ง  
โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน

| PV<br>(KW) | Batt<br>(KWh) | ค่าไฟฟ้า<br>(ล้านบาท) | มูลค่าการลงทุน<br>(ล้านบาท) | มูลค่ารวมตลอด<br>โครงการ (ล้านบาท) | PV Utilization |
|------------|---------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------------------|----------------|
| 9          | 8             | 1.510                 | 0.386                       | 1.896                              | 0.99           |
| 10         | 8             | 1.471                 | 0.411                       | 1.882                              | 0.95           |
| 11         | 8             | 1.445                 | 0.436                       | 1.881                              | 0.90           |
| 12         | 8             | 1.427                 | 0.461                       | 1.888                              | 0.85           |
| 14         | 8             | 1.402                 | 0.511                       | 1.913                              | 0.75           |
| 15         | 8             | 1.392                 | 0.536                       | 1.929                              | 0.71           |

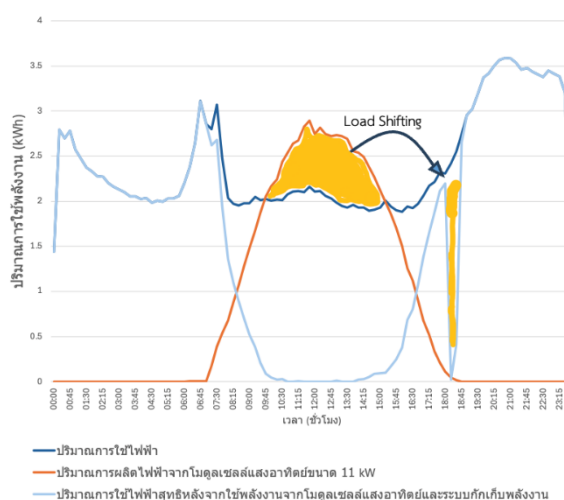
เมื่อนำตัวแปรค่าไฟฟ้า, มูลค่าการลงทุน และมูลค่ารวมของ  
โครงการมาแสดงข้อมูลในรูปแบบแผนภูมิจะเห็นว่าจุดที่  
เหมาะสมในทางเศรษฐศาสตร์ คือ จุดที่ต่ำที่สุดของเส้น  
งบประมาณรวมโครงการเนื่องจากหากติดตั้งเพิ่มจะใช้ลงทุน  
เพิ่มแต่ค่าไฟฟ้าลดลงได้น้อย ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนภูมิแสดงการประเมินขนาด โมดูลเซลล์  
แสงอาทิตย์ที่มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำที่สุด

โดยการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ 11 kW ระบบกัก  
เก็บพลังงานพลังงานขนาด 8 kW มีระยะเวลาคืนทุน คือ 4 ปี  
ในด้านประสิทธิภาพทางพลังงานพบว่า PV Utilization Rate  
= 90.00% และสัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ลดได้ = 30.50% ใน

ด้านการบริหารจัดการพลังงานด้วยระบบกักเก็บพลังงาน ใช้  
เทคนิคการบริหารจัดการพลังงานแบบ Load shifting โดยการ  
ใช้พลังงานที่เหลือจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชาร์จเข้าระบบกัก  
เก็บพลังงาน และจ่ายพลังงานถูกใช้จนหมดตั้งแต่เวลาประมาณ  
18.00 น - 18.30 น. ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงในแต่ละเดือนทำให้  
ภาพรวมการใช้พลังงานลดลง โดยแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าที่โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบ  
กักเก็บพลังงานพลังงานสามารถผลิตได้เทียบกับปริมาณ  
การใช้พลังงาน

จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าแผนภูมิการผลิตไฟฟ้าของโมดูล  
เซลล์แสงอาทิตย์อยู่ใต้แผนภูมิการใช้พลังงานซึ่งครอบคลุม  
การใช้ไฟฟ้ามากกว่า 90 % โดยพลังงานที่เหลือ 10% ได้  
กำหนดให้ชาร์จเข้าระบบกักเก็บพลังงาน และจ่ายพลังงาน  
หลังโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานไม่ได้ทำให้ใช้พลังงาน  
จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้คุ้มค่าและลดการใช้พลังงาน  
จากกริดได้เพิ่มขึ้นจากการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน

### 3.5 อภิปรายผลลัพธ์

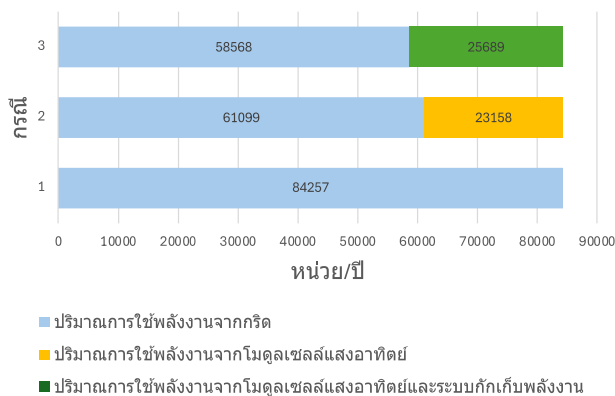
#### 1.) ด้านความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์

พบว่าการตัดสินใจไม่ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีมูลค่า  
รวมตลอดโครงการที่สูงที่สุดเนื่องจากไม่มีการผลิตไฟฟ้าจากโมดูล  
เซลล์แสงอาทิตย์ชดเชยค่าไฟฟ้าที่ต้องจ่าย หากมีการตัดสินใจ  
ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะมีระยะเวลาคืนทุน 2 ปี 9 เดือน  
และ 4 ปีในกรณีติดตั้งร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน โดยการติดตั้ง  
ระบบกักเก็บพลังงานมีการคืนทุนช้ากว่า เนื่องจากราคาระบบกัก  
เก็บพลังงานในปัจจุบันมีราคาสูงและใช้เงินในการลงทุนมากกว่า  
ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ 0.185 ล้านบาท ดังนั้นจึงควร

ตัดสินใจติดตั้งเฉพาะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เพียงกรณีเดียวก่อน ทั้งนี้หากพิจารณาระยะเวลาคืนทุนสำหรับการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำค่าใช้จ่ายไฟฟ้าที่ประหยัดได้ลงทุนติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน อีกทั้งยังเป็นการชะลอการลงทุนหากแนวโน้มระบบกักเก็บพลังงานมีราคาที่ถูกลงในอนาคต

เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสอดคล้องกับเป้าหมายของรัฐบาลเกี่ยวกับการลดการใช้พลังงานฟอสซิลจึงควรเลือกตั้งนั้นควรเลือกกรณีที่ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดคือการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน โดยสามารถลดการใช้ไฟฟ้าได้มากถึง 30.5 % หรือลดการใช้ไฟฟ้าได้ 25,689 หน่วย/ปี และช่วยลดการปล่อย CO<sub>2</sub> ได้ 30,827 กิโลกรัมต่อปี

โดยกรณีที่ 1 คือการไม่ติดตั้งและใช้ไฟฟ้าจากกริด กรณีที่ 2 คือการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีที่ 3 คือการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบสัดส่วนการใช้พลังงานรวมใน 1 ปีจะเห็นได้ว่าในกรณีที่ 2 และ 3 มีสัดส่วนการใช้พลังงานจากกริดลดลงโดยกรณีที่ 3 สามารถลดการใช้พลังงานจากกริดได้มากที่สุด ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 สัดส่วนปริมาณการใช้พลังงานจากกริดที่ลดลงเมื่อเทียบกับการไม่ติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงาน

#### 4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ต้องการหาความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ในการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบกักเก็บพลังงานโดยความเหมาะสม โดยใช้อัลกอริทึม GRG แก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมพบว่าหากต้องการให้มูลรวม

โครงการต่ำที่สุดต้องตัดสินใจติดตั้งเฉพาะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10kW โดยใช้เงินลงทุน 250,967 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 2 ปี 9 เดือนมูลค่ารวมตลอดโครงการ 1,785,134 บาท ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวจะทำให้มูลค่ารวมของโครงการต่ำที่สุด และมีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ ทั้งนี้หากต้องการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานสามารถใช้เกณฑ์ในการติดตั้งคือติดตั้งตามกำลังผลิตที่เหลือจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ หรือ PV Utilization 100% ซึ่งจะมีมูลค่ารวมตลอดโครงการที่สูงกว่าโดยใช้เงินลงทุน 436,064 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 4 ปี มูลค่ารวมตลอดโครงการ 1,881,400 บาท ทั้งนี้หากวัตถุประสงค์ของการติดตั้งมีได้จำกัดเพียงมูลค่ารวมตลอดโครงการที่ต่ำที่สุดหากแต่ยังคำนึงถึงเรื่องการอนุรักษ์พลังงาน การลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล, Carbon Neutrality ที่รัฐบาลกำลังดำเนินการ ควรตัดสินใจติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน หากพบว่าใช้งบประมาณในการติดตั้งที่สูงให้ดำเนินการติดตั้งเฉพาะโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เพียงกรณีเดียวก่อน ทั้งนี้หากพิจารณาระยะเวลาคืนทุน 2 ปี 9 เดือน สามารถนำค่าใช้จ่ายไฟฟ้าที่ประหยัดได้ลงทุนติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน อีกทั้งยังเป็นการชะลอการลงทุนหากแนวโน้มระบบกักเก็บพลังงานมีราคาที่ถูกลงในอนาคตสามารถติดตั้งเพิ่มเติมได้ในราคาที่ถูกลง

ผลการศึกษาครั้งนี้เป็นแนวทางสำหรับการลดการใช้พลังงานโดยใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบกักเก็บพลังงานโดยคำนวณความคุ้มค่าจากมูลค่ารวมตลอดโครงการ และเป็นแนวทางในการตัดสินใจลดการใช้พลังงานโดยสามารถลดการใช้พลังงานลงได้ 27.14% ในกรณีติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว 30.50% ในกรณีติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานพลังงาน งานวิจัยนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าจำเป็นต้องตัดสินใจติดตั้งโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานเพื่อลดการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลอีกทั้ง กฟผ. มีแผนขยายผลการศึกษาเรื่อง nZEB ไปยังอาคารอื่น ๆ ของ กฟผ. ซึ่งสามารถใช้งานวิจัยนี้เป็นแนวทางตัดสินใจในการลงทุนดำเนินการและส่งเสริมให้เกิดการใช้ไฟฟ้าจากกริดใกล้เคียงศูนย์ตอนสนองนโยบายรัฐบาลและกระแสโลกที่กำลังสนับสนุนลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล การปล่อยก๊าซเรือนกระจก และกำหนดเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน



## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] The secretariat of the prime minister. The 27th Session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (COP 27) and related meetings; 2022.
- [2] Energy Policy and Planning Office. Semi-annual report on carbon dioxide emissions from the energy sector: January - June; 2024.
- [3] Ministry of Energy. PDP 2018 revision; 2018.
- [4] Electricity Generating Authority of Thailand. Proposal for consideration to become a smart city, Mae Moh Smart City Project in Mae Moh District; 2019.
- [5] Minsan P. Comparing methods of optimization in Solver of Microsoft Excel 2007 and 2019: A case study of statistical models. The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok. 2021;31.
- [6] Wang F, Yu Y, Wang X, Ren H, Shafie-Khah M, Catalão JoP. Residential electricity consumption level impact factor analysis based on wrapper feature selection and multinomial logistic regression. Energies. 2018;11(5):1180.
- [7] Mouatasim AE, Darmane Y. Regression analysis of a photovoltaic (PV) system in FPO. AIP Conference Proceedings. 2018 Dec 20;2056(1).
- [8] Asanakham A, Guntiya I, Kiatsiriroat T. Performance prediction of poly-crystalline solar cell module under real practice. CMUL: Journal Articles. 2015;22(3):87-93.
- [9] Milan C, Bojesen C, Nielsen MP. A cost optimization model for 100% renewable residential energy supply systems. Energy. 2012;48(1):118-27.
- [10] Energy Research and Development Institute-Nakornping, University CM. Demonstration of near zero building EGAT Maemoh Training Center; 2021.
- [11] González-Mahecha RE, Lucena AFP, Szklo A, Ferreira P, Vaz AIF. Optimization model for evaluating on-site renewable technologies with storage in zero/nearly zero energy buildings. Energy and Buildings. 2018;172:505-16.
- [12] Harkouss F, Fardoun F, Biwolé PH. Optimal design of renewable energy solution sets for net zero energy buildings. Energy. 2019;179:1155-75.
- [13] Irshad AS, Ludin GA, Masrur H, Ahmadi M, Yona A, Mikhaylov A, et al. Optimization of grid-photovoltaic and battery hybrid system with most technically efficient PV technology after the performance analysis. Renewable Energy. 2023;207:714-30.
- [14] Chaurasia R, Gairola S, Pal Y. Technical, economic feasibility and sensitivity analysis of solar photovoltaic/battery energy storage off-grid integrated renewable energy system. Energy Storage. 2022;4(1):e283.
- [15] Shivam K, Tzou J-C, Wu S-C. A multi-objective predictive energy management strategy for residential grid-connected PV-battery hybrid systems based on machine learning technique. Energy Conversion and Management. 2021;237:114103.
- [16] Riverola A, Vossier A, Chemisana D. Fundamentals of solar cells. In: Nanomaterials for Solar Cell Applications. Elsevier; 2019. p. 3-33.



- [17] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Electricity production from solar energy; 2018.
- [18] Malheiro A, Castro PM, Lima RM, Estanqueiro A. Integrated sizing and scheduling of wind/PV/diesel/battery isolated systems. *Renewable Energy*. 2015;83:646-57.
- [19] Ashouri A, Fux SS, Benz MJ, Guzzella L. Optimal design and operation of building services using mixed-integer linear programming techniques. *Energy*. 2013;59:365-76.
- [20] Wang B, Xia X, Zhang J. A multi-objective optimization model for the life-cycle cost analysis and retrofitting planning of buildings. *Energy and Buildings*. 2014;77:227-35.
- [21] PV Price List Available from: <https://www.greensmarttech.com/product/hua-wei10k-3p> [Accessed 19th August 2024].
- [22] Electricity tariffs: Available from: <https://www.pea.co.th/electricity-tariffs/> [Accessed 19th August 2024].
- [23] Service Fee Available from: <https://www.ecoenergythailand.com/> [Accessed 19th August 2024].
- [24] Chuchat R. Financial Cost Analysis of Solar Power Generation System in Rubberwood Processing Plants with Investment Promotion Policy Support. National Conference Walailak; 2019
- [25] Wasinsombat W, Chantuk T. Analysis of costs and financial returns of the prestressed concrete products business Kamphaeng Saen District Nakhon Pathom Province Veridian E-Journal, Silpakorn University. 2016;9:669-84.
- [26] Bank of Thailand. Daily Interest Rates of Commercial Banks. Available from: <https://www.bot.or.th/th/statistics/interest-rate.html/> [Accessed 19th August 2024].
- [27] Felius LC, Dessen F, Hrynyszyn BD. Retrofitting towards energy-efficient homes in European cold climates: a review. *Energy Efficiency*. 2020;13(1):101-25.
- [28] Vrettos E, Witzig A, Kurmann R, Koch S, Andersson G. Maximizing local PV utilization using small-scale batteries and flexible thermal loads. *EU PVSEC*;2013.
- [29] Hu J-L, Kao C-H. Efficient energy-saving targets for APEC economies. *Energy policy*. 2007;35(1):373-82.





## การวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐานของลุ่มน้ำป่าสัก

### Baseflow Analysis of the Pasak River Basin

วิชัยพงศ์ ปรางงาม<sup>1,2\*</sup> เกศวรา สิริโชค<sup>1</sup> และไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

1 หมู่ 6 ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

<sup>2</sup> ฝ่ายตรวจสอบและวิเคราะห์ด้านวิศวกรรม ส่วนวิศวกรรม สำนักงานชลประทานที่ 1 เชียงใหม่ กรมชลประทาน

27 สำนักงานชลประทานที่ 1 ถนนทุ่งโฮเต็ล ตำบลวัดเกต อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50000

Witchayaphong Prangngam<sup>1,2\*</sup>, Ketvara Sittichok<sup>1</sup> and Chaiyapong Theprasit<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University

Kamphaengsaen Campus

1 Moo 6, Kamphaengsaen, Kamphaengsaen, Nakhonpathom, 73140

<sup>2</sup> Engineering Inspection and Analysis Division, Engineering Management Division, Regional Irrigation Office 1,

Chiangmai, Royal Irrigation Department

27 Regional Irrigation Office 1 Chiangmai, TungHutan Street, Watkat, Muang, Chiang Mai, 50000

\*ผู้รับผิดชอบบทความ: sakonrat.pr@ku.th เบอร์โทรศัพท์ 09-4478-3952

Received: 1 February 2024, Revised: 12 March 2025, Accepted: 24 March 2025

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐานของลุ่มน้ำป่าสัก และหาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการแยกการไหลพื้นฐาน โดยเลือกสถานีตรวจวัด S.33 และ S.4B ที่อยู่ทางตอนบนของลุ่มน้ำป่าสักมาทำการวิเคราะห์ การศึกษานี้จะใช้ผลลัพธ์ของแบบจำลอง BFI+ เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและประเมินความแม่นยำของวิธีการที่คัดเลือกมาทั้ง 5 วิธี ได้แก่ วิธีตัวกรองดิจิทัลแบบทำซ้ำ 4 วิธี (Lynie & Hollick, Chapman, EWMA, Boughton two-parameter) และวิธีการฟิสิกส์ดิจิทัล 1 วิธี (Local Minimum) ภายใต้อัตราการสุ่มตัวอย่างรายวัน ผลการศึกษาพบว่า วิธีการทั้ง 5 วิธี สามารถแยกการไหลพื้นฐานของสถานีตรวจวัดทั้ง 2 แห่งในลุ่มน้ำป่าสักได้ดี โดยเฉพาะวิธี Lynie & Hollick ที่แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำสูงกว่าวิธีอื่น ๆ อีก 4 วิธี นอกจากนี้ ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของทั้ง 2 สถานีตรวจวัดยังมีค่าใกล้เคียงกัน งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกวิธีการแยกการไหลพื้นฐานที่เหมาะสมและการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์อย่างถูกต้อง เพื่อให้การวิเคราะห์การไหลพื้นฐานของน้ำในลุ่มน้ำป่าสักเป็นไปอย่างแม่นยำและเชื่อถือได้

**คำสำคัญ** การไหลพื้นฐาน ตัวกรองดิจิทัล กราฟฟิสิกส์ดิจิทัล

#### Abstract

This research aims to determine the appropriate parameter values for baseflow analysis of the Pasak River Basin and to identify suitable methods for baseflow separation. The study focuses on monitoring stations S.33 and S.4B, located in the upper part of the Pasak River Basin. The BFI+ model was used to obtain suitable parameter values and to evaluate the accuracy of five selected methods. These methods include four iterative digital filter methods (Lynie & Hollick, Chapman, EWMA, and Boughton two-parameter) and one graphical digital



method (Local Minimum), based on daily hydrological data. The results indicate that all five methods effectively separate the baseflow at both monitoring stations in the Pasak River Basin. Among them, the Lynie & Hollick method demonstrated higher accuracy compared to the other four methods. Additionally, the optimal parameter values for both monitoring stations were found to be similar. This research highlights the importance of selecting appropriate baseflow separation methods and accurately calibrating parameters to ensure precise and reliable baseflow analysis in the Pasak River Basin.

**Keywords:** Baseflow, Digital Filter, Digital Graphic

## 1. บทนำ

ข้อมูลปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) มีความสำคัญในการบริหารจัดการน้ำเนื่องจากเป็นแหล่งให้น้ำที่มีการไหลตลอดเวลาถึงแม้จะไม่มีฝนตกในพื้นที่ก็ตาม ซึ่งเห็นได้จากในฤดูแล้ง ปริมาณน้ำส่วนนี้ยังคงมีไหลอยู่ จะเห็นได้ว่าปริมาณการไหลพื้นฐานนั้นมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์และระบบนิเวศตามธรรมชาติ นี่คือความจริงโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับแหล่งต้นน้ำที่ต้องพึ่งพาอาศัยกัน (Jung, Shin et al. 2016) ได้พัฒนาระบบ BFlow บนเว็บเพื่อแยกการไหลพื้นฐานออกจากน้ำท่า โดยใช้ข้อมูลน้ำท่าเป็นรายวันของแหล่งน้ำที่มีความสำคัญทั้ง 4 สายในประเทศเกาหลีใต้ ผลการศึกษาพบว่าสถานีที่มีค่าดัชนีพื้นฐานสูงนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลต่ำ (Lim, Engel et al. 2005) ได้พัฒนาระบบ WHAT ขึ้นมาโดยใช้โมดูลการแยกของตัวกรองดิจิทัล 2 อย่างคือ BFlow และ Eckhardt โดยการศึกษาใช้ข้อมูลน้ำท่ารายวันของสถานีตรวจวัด 50 แห่ง ในรัฐอินเดียน่า ผลการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ Nash-Sutcliffe-Efficiency ของทั้ง 2 วิธีมีค่ามากกว่า 0.91 ทั้ง 50 สถานี แต่วิธี Eckhardt มีความถูกต้องใกล้เคียงกับการไหลพื้นฐานที่วัดได้มากกว่า (Indarto, Novita et al. 2016) การศึกษาใช้ Hydro Office เพื่อแยกการไหลพื้นฐานออกจากน้ำท่า โดยใช้ข้อมูลน้ำท่ารายวันจากแหล่งต้นน้ำ 8 แห่ง ในเขตการปกครองของ UPT PSDA Bondowoso ในชาวตะวันออก ผลการศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดจากการสอบเทียบลุ่มน้ำสามารถนำมาใช้เพื่อแยกการไหลพื้นฐานในลุ่มน้ำอื่น ๆ ได้ และพบว่า 3 วิธีที่ทำได้ดีกว่าวิธีอื่นๆ อีก 6 วิธี ได้แก่ วิธี EWMA, Lynie & Hollick และ Local Minimum

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายที่จะประเมินปริมาณน้ำในช่วงฤดูแล้ง และหาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการแยกการไหลพื้นฐานของลุ่มน้ำในประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐานของลุ่มน้ำป่าสัก และหาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการแยกการไหลพื้นฐาน พื้นที่ศึกษาอยู่ในเขตลุ่มน้ำป่าสัก โดยวิเคราะห์พื้นที่จากการเลือกสถานีตรวจวัดของลุ่มน้ำป่าสัก และให้ความสำคัญไปที่ตอนบนของลุ่มน้ำ ซึ่งอยู่เหนือเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ขึ้นไป หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการเลือกสถานีตรวจวัด ต้องมีข้อมูลต่อเนื่องมากกว่า 10 ปี ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา และด้านเหนือของสถานีวัดตรวจวัดจะต้องไม่มีโครงการพัฒนาแหล่งน้ำ เช่น อ่างเก็บน้ำ ประตุน้ำ และฝาย เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการบริหารจัดการน้ำ (Unregulated Flow)

การไหลในลำน้ำจะมีค่าสูงในฤดูฝน ปริมาณการไหลเกิดจากฝนโดยตรงหรือปริมาณน้ำท่าผิวดิน (Direct Runoff) ส่วนการไหลในฤดูแล้งเป็นการไหลพื้นฐาน (Baseflow) ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่มาจากน้ำใต้ดิน การไหลพื้นฐานนั้นเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของกราฟน้ำท่า ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลในลำน้ำเทียบกับเวลา กราฟน้ำท้านับเป็นเครื่องมือที่สำคัญที่แสดงให้เห็นถึงลักษณะสภาพการไหลและการให้น้ำของลุ่มน้ำ อันจะเป็นแนวทางที่มีความสำคัญต่อการบริหารจัดการน้ำทั้งในช่วงน้ำน้อยในฤดูแล้งและน้ำหลากในช่วงฤดูฝนได้ และงานวิจัยนี้สามารถแยกการไหลพื้นฐานออกจากน้ำท่ารายวันที่มีข้อมูลครบถ้วนต่อเนื่องกันหลาย ๆ ปีได้ โดยใช้แบบจำลอง BFI+ ช่วยในการคำนวณ และนำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลของพื้นที่ที่ทำการศึกษาต่อไป



## 2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การแยกการไหลพื้นฐานจากกราฟน้ำท่ามีวิธีการที่หลากหลาย แต่การวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐาน โดยวิธีตัวกรองดิจิทัลแบบทำซ้ำ และวิธีการฟกติดิจิตอล เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง และง่ายต่อการนำไปใช้งานสำหรับแหล่งน้ำต่าง ๆ ทั่วโลก (Gregor, 2010, 2012)

#### 2.1.1 วิธีตัวกรองดิจิทัลแบบทำซ้ำ (Recursive digital filter)

กลไกการทำงานของวิธีตัวกรองดิจิทัลแบบทำซ้ำ [1-10] คล้ายกับวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์และประมวลผลสัญญาณ เพื่อแยกสัญญาณความถี่สูงออกมาจากสัญญาณความถี่ต่ำ ในการวิเคราะห์กราฟน้ำท่าได้นำวิธีนี้มาใช้เพื่อแยกการไหลพื้นฐานด้วย เนื่องจากคลื่นความถี่สูงสามารถเชื่อมโยงกับการไหลบ่าโดยตรง และคลื่นความถี่ต่ำสามารถเชื่อมโยงกับการไหลพื้นฐาน กระบวนการนี้ทำซ้ำตลอดช่วงเวลาของการบันทึกข้อมูล และในการศึกษานี้ได้คัดเลือกมา 4 วิธี เพื่อใช้งานวิจัย ดังนี้

1. Lynie & Hollick (Lynie & Hollick, 1979 ; Nathan & McMahon, 1990) สมการที่ (1)

$$q_{f(i)} = \alpha q_{f(i-1)} + (q_{(i)} - q_{(i-1)}) \frac{1+\alpha}{2} \quad (1)$$

โดยที่  $q_{(i)}$  = อัตราการไหลทั้งหมด  
ณ ช่วงเวลาที่  $i$  (ลบ.ม./วินาที)

$q_{(i-1)}$  = อัตราการไหลทั้งหมด  
ณ ช่วงเวลาที่  $i-1$  (ลบ.ม./วินาที)

$q_{f(i)}$  = อัตราการไหลโดยตรง  
ณ ช่วงเวลาที่  $i$  (ลบ.ม./วินาที)

$q_{f(i-1)}$  = อัตราการไหลโดยตรง  
ณ ช่วงเวลาที่  $i-1$  (ลบ.ม./วินาที)

$\alpha$  = พารามิเตอร์ตัวกรอง

และ  $(i)$  ในที่นี้ หมายถึง ข้อมูลของน้ำท่ารายวัน

2. Chapman (Chapman, 1991; Mau & Winter, 1997) สมการที่ (2)

$$q_{f(i)} = \frac{3\alpha - 1}{3 - \alpha} q_{f(i-1)} + \frac{2}{3 - \alpha} (q_{(i)} - \alpha q_{(i-1)}) \quad (2)$$

โดยที่  $q_{(i)}$  = อัตราการไหลทั้งหมด  
ณ ช่วงเวลาที่  $i$  (ลบ.ม./วินาที)

$q_{(i-1)}$  = อัตราการไหลทั้งหมด  
ณ ช่วงเวลาที่  $i-1$  (ลบ.ม./วินาที)

$q_{f(i)}$  = อัตราการไหลโดยตรง  
ณ ช่วงเวลาที่  $i$  (ลบ.ม./วินาที)

$q_{f(i-1)}$  = อัตราการไหลโดยตรง  
ณ ช่วงเวลาที่  $i-1$  (ลบ.ม./วินาที)

$\alpha$  = พารามิเตอร์ตัวกรอง

และ  $(i)$  ในที่นี้ หมายถึง ข้อมูลของน้ำท่ารายวัน

3. EWMA (Tularam & Ilahie, 2008) สมการที่ (3)

$$q_{b(i)} = \alpha q_{(i)} + (1 - \alpha) q_{b(i-1)} \quad (3)$$

โดยที่  $q_{(i)}$  = อัตราการไหลทั้งหมด  
ณ ช่วงเวลาที่  $i$  (ลบ.ม./วินาที)

$q_{b(i)}$  = อัตราการไหลพื้นฐาน  
ณ ช่วงเวลาที่  $i$  (ลบ.ม./วินาที)

$q_{b(i-1)}$  = อัตราการไหลพื้นฐาน  
ณ ช่วงเวลาที่  $i-1$  (ลบ.ม./วินาที)

$\alpha$  = พารามิเตอร์ตัวกรอง

และ  $(i)$  ในที่นี้ หมายถึง ข้อมูลของน้ำท่ารายวัน

4. Boughton two-parameter (Boughton, 1993 ; Chapman & Maxwell, 1996) สมการที่ (4)

$$q_{b(i)} = \frac{k}{1 + C} q_{b(i-1)} + \frac{C}{1 + C} q_{(i)} \quad (4)$$

โดยที่  $q_{(i)}$  = อัตราการไหลทั้งหมด  
ณ ช่วงเวลาที่  $i$  (ลบ.ม./วินาที)

$q_{b(i)}$  = อัตราการไหลพื้นฐาน  
ณ ช่วงเวลาที่  $i$  (ลบ.ม./วินาที)

$q_{b(i-1)}$  = อัตราการไหลพื้นฐาน  
ณ ช่วงเวลาที่  $i-1$  (ลบ.ม./วินาที)

$k$  = พารามิเตอร์ตัวกรอง

$C$  = พารามิเตอร์ตัวกรอง

และ  $(i)$  ในที่นี้ หมายถึง ข้อมูลของน้ำท่ารายวัน

#### 2.1.2 วิธีกราฟฟกติดิจิตอล (Digital Graphical Method)

กลไกการทำงานของวิธีกราฟฟกติดิจิตอล [3], [7-9] จะเป็นการค้นหาอัตราค่าอัตราการไหลต่ำสุดของแต่ละช่วงเวลา และช่วงเวลาของแต่ละวิธีจะมีหลักการคิดที่ต่างกันออกไปในการศึกษานี้ได้คัดเลือกมา 1 วิธี เพื่อใช้งานวิจัย ได้แก่ วิธี Local Minimum ดังนี้



วิธี Local Minimum สมการที่ (5)

$$[0.5 (2N^* - 1) \text{ day}] \quad (5)$$

โดยที่  $N = A^{0.2}$

และ  $A =$  พื้นที่ของกลุ่มน้ำ (ตารางไมล์)

## 2.2 วิธีการศึกษา

### 2.2.1 พื้นที่ศึกษาและข้อมูลที่ใช้

ลุ่มน้ำป่าสัก [11] มีที่ตั้งอยู่ในเขตภาคกลางของประเทศไทย เป็นส่วนใหญ่ ขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำ 15,603.33 ตารางกิโลเมตร พื้นที่บางส่วนตอนบนของกลุ่มน้ำอยู่ในเขตภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ในเขต 4 จังหวัด คือ เพชรบูรณ์ ลพบุรี สระบุรี และพระนครศรีอยุธยา ลักษณะลุ่มน้ำวางตัวตามแนวเหนือ-ใต้ บริเวณตอนบนของกลุ่มน้ำมีเทือกเขาเพชรบูรณ์ล้อมรอบ ลักษณะสภาพภูมิประเทศของกลุ่มน้ำมีลักษณะเป็นเนินเขาและมีที่ราบเพียงเล็กน้อย ส่วนตอนกลางในเขตจังหวัดลพบุรีและสระบุรีเป็นที่ราบสลับกับเนินเขา ตอนล่างของกลุ่มน้ำบริเวณจุดบรรจบกับแม่น้ำเจ้าพระยาที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยาเป็นที่ราบลุ่ม ลักษณะโดยรวมทั้งลุ่มน้ำจะถูกล้อมรอบด้วยภูเขาทั้ง 2 ด้าน และมีแม่น้ำป่าสักไหลอยู่ตรงกลางจากทิศเหนือลงทิศใต้ โดยมีต้นกำเนิดมาจากเทือกเขาเพชรบูรณ์ในเขตอำเภอด่านซ้ายซึ่งอยู่ทางตอนใต้ของจังหวัดเลย จากนั้นไหลผ่านจังหวัดเพชรบูรณ์ ลพบุรี และสระบุรี จนมาบรรจบกับแม่น้ำเจ้าพระยาที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ความยาวรวมทั้งสิ้น 746 กิโลเมตร ลุ่มน้ำป่าสักมีอาณาเขตติดต่อ ดังนี้

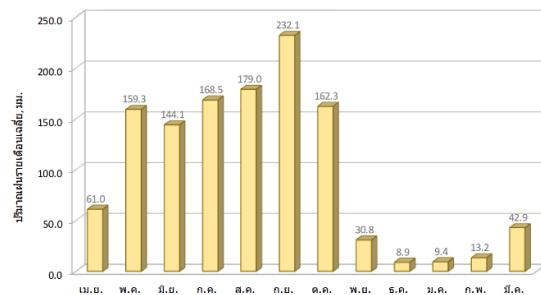
ทิศเหนือ ติดกับ ลุ่มน้ำโขงตะวันออกเฉียงเหนือ

ทิศใต้ ติดกับ ลุ่มน้ำเจ้าพระยา

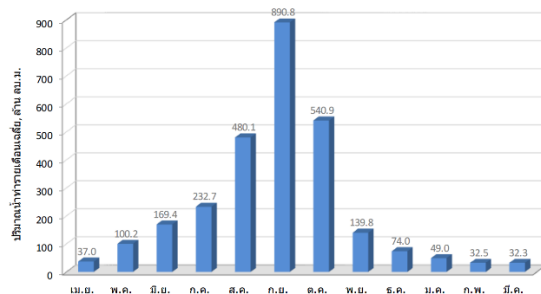
ทิศตะวันออก ติดกับ ลุ่มน้ำมูล และลุ่มน้ำชี

ทิศตะวันตก ติดกับ ลุ่มน้ำน่าน และลุ่มน้ำเจ้าพระยา

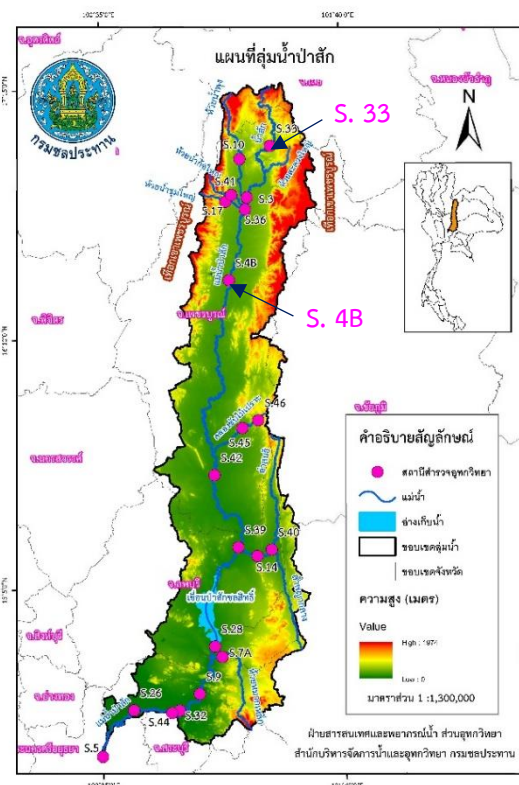
การศึกษานี้ได้วิเคราะห์ข้อมูลปริมาณฝนและปริมาณน้ำท่า [11] แสดงดังรูปที่ 1 - 2 และได้รวบรวมข้อมูลอุทกนิยมนิยามวิทยารายวัน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 ถึงปี พ.ศ. 2561 โดยขอวิเคราะห์ข้อมูลจากศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคเหนือตอนล่าง ประกอบด้วยข้อมูลปริมาณน้ำฝนและน้ำท่า โดยให้ความสำคัญไปที่สถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำป่าสักตอนบน และได้เลือกสถานีตรวจวัด S.33 และ S.4B มาทำการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 การกระจายปริมาณฝนรายเดือนเฉลี่ยลุ่มน้ำป่าสัก



รูปที่ 2 การกระจายปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ยลุ่มน้ำป่าสัก



รูปที่ 3 สภาพภูมิประเทศและตำแหน่งของสถานีตรวจวัด S.33 และ S.4B ในแผนที่ลุ่มน้ำป่าสัก

### 2.2.2 แบบจำลอง BFI+

Hydro office [3-4] เป็นซอฟต์แวร์สำหรับอุทกวิทยาอุทกนิยมนิเทศ ธรณีศาสตร์และข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ โดย Milos Gregor เป็นผู้พัฒนาขึ้นมา และแบบจำลอง BFI+ ก็เป็นหนึ่งในซอฟต์แวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแยกการไหลพื้นฐานออกมาจากกราฟน้ำท่า โดยตัวแบบจำลองมีวิธีการคำนวณเพื่อแยกการไหลพื้นฐานให้เลือกใช้ 11 วิธีด้วยกัน ประกอบไปด้วยวิธีตัวกรองดิจิทัลแบบทำซ้ำ 8 วิธี ได้แก่ Lynie & Hollick, Chapman, EWMA, Boughton two-parameter, One-parameter, IHACRES three-parameter, Eckhardt Filter, Furey & Gupta และวิธีการฟลักซ์ดิจิทัล 3 วิธี ได้แก่ Local Minimum, Fixed Interval, Sliding Interval

### 2.2.3 การประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง

กระบวนการในการประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง [3,4,6,7,9,12] จะทำโดยการพิจารณาความสอดคล้องกัน (Closeness หรือ Goodness of Fit) ของค่าจากการจำลอง (Simulated Result) และค่าสังเกตที่ได้มีการบันทึกไว้หรือค่าที่เกิดขึ้นจริง (Observations) ซึ่งมักจะทำการตรวจสอบกราฟที่พล็อตเปรียบเทียบค่าทั้งสองด้วยสายตา (Visual Inspection) และการคำนวณค่าความผิดพลาด (Error) ระหว่างค่าจากแบบจำลองและค่าสังเกตที่เกิดขึ้นจริง โดยใช้เกณฑ์การประเมินเชิงประสิทธิภาพ (Efficiency Criteria) ซึ่งในการศึกษานี้ได้คัดเลือกมา 3 วิธีเพื่อใช้ในการวิจัย ดังนี้

1. Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970)

คือ ตรรกะที่นิยมใช้ในการบอกค่าความแม่นยำของแบบจำลอง (Model Accuracy) หรือประสิทธิภาพประสิทธิผลของแบบจำลอง (Model Performance) ในการคาดคะเนค่าที่ต้องการ สูตรการคำนวณหา NSE แสดงอยู่ในสมการที่ (6)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{mean})^2} \quad (6)$$

โดยที่  $Q_{obs}$  = ค่าสังเกต (Observed Value) ที่  $i$  เมื่อ  $i$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง  $n$

$Q_{sim}$  = ค่าคาดคะเนจากแบบจำลองของค่า  $Q_{obs}$

$$Q_{mean} = \text{ค่าเฉลี่ยของ } Q_{obs}$$

### 2. Root Mean Square Error (RMSE)

คือ ค่าเบี่ยงเบนกำลังสองเฉลี่ยรากหรือค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยราก เป็นหนึ่งในสองการวัดความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดและใช้บ่อยของการวัดความแตกต่างระหว่างค่าจริงหรือค่าที่ทำนายไว้ในมือข้างหนึ่งกับค่าที่สังเกตได้หรือตัวประมาณค่าในอีกด้านหนึ่ง สูตรการคำนวณหา RMSE แสดงอยู่ในสมการที่ (7)

$$RMSE = 1 - \frac{\sqrt{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}}{n} \quad (7)$$

โดยที่  $Q_{obs}$  = ค่าสังเกต (Observed Value) ที่  $i$  เมื่อ  $i$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง  $n$

$Q_{sim}$  = ค่าคาดคะเนจากแบบจำลองของค่า  $Q_{obs}$

### 3. Coefficient of Determination ( $R^2$ )

คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ หมายถึงสัดส่วนที่ตัวแปรอิสระ ( $X$ ) สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม ( $Y$ ) ได้ โดย  $R^2$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ถ้าค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 แสดงว่า  $X$  สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ  $Y$  ได้มาก ถ้าค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 0 แสดงว่า  $X$  สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ  $Y$  ได้น้อย สูตรการคำนวณหา  $R^2$  แสดงอยู่ในสมการที่ (8)

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (8)$$

โดยที่  $SSE = \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2$

$$SST = \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{mean})^2$$

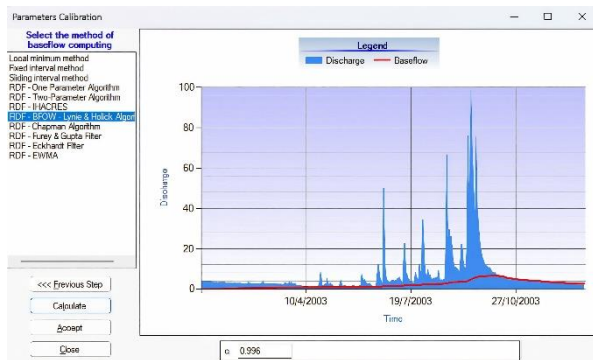
### 2.2.4 วิธีการ

1. รวบรวมข้อมูลสถานีตรวจวัดน้ำท่าทั้งหมดในกลุ่มน้ำป่าสักและคัดเลือกสถานีตรวจวัดน้ำท่ามาทำการวิเคราะห์

2. ทำการแบ่งข้อมูลจำนวนปีต่อเนื่องในแต่ละสถานีออกเป็นสองส่วน [3-4] โดยส่วนแรกใช้สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด (Calibration) ซึ่งคิดเป็น 70% ของจำนวนปีทั้งหมด และส่วนที่สองใช้สำหรับการตรวจพิสูจน์ค่าพารามิเตอร์ (Validation) ซึ่งคิดเป็น 30% ของจำนวนปีทั้งหมด



3. นำข้อมูลน้ำท่ารายวันของสถานีตรวจวัดที่ต้องการในส่วน Calibration ที่จัดเตรียมไว้มาคำนวณหาค่า Baseflow ในแบบจำลอง BFI+ โดยเลือกใช้วิธีการคำนวณ 5 วิธี ได้แก่ Lynie & Hollick, Chapman, EWMA, Boughton two-parameter และ Local Minimum หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละวิธี แสดงดังรูปที่ 4 – 5



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์โดยแบบจำลอง BFI+

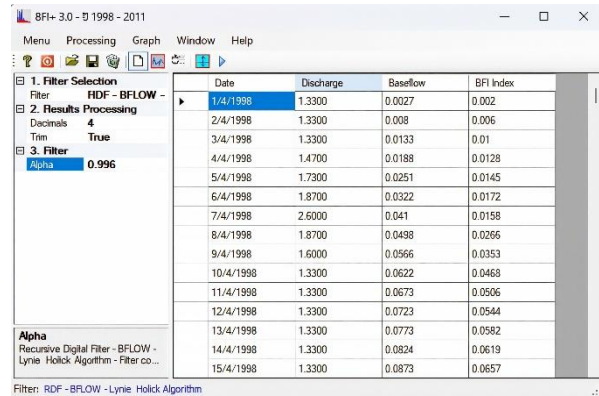
กระบวนการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ [3] นี้ได้เลือกข้อมูลช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคมในแต่ละปีมาใช้วิเคราะห์เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ฝนตกน้อยหรือไม่มีฝนตกเลยดังแสดง ปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ย รายปีเฉลี่ย และช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคมซึ่งเป็นตัวแทนของปริมาณการไหลพื้นฐาน ได้ดังตารางที่ 1

ในขั้นตอนนี้จะทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ของแต่ละวิธีโดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 2 [3] เป็นแนวทางในการทดลองปรับค่า (Trial and Error) และจะหยุดลงเมื่อเส้นโค้งของปริมาณการไหลพื้นฐานที่คำนวณได้ (เส้นสีแดง) ใกล้เคียงกันกับเส้นโค้งของปริมาณการไหลทั้งหมด (เส้นสีน้ำเงิน)

ตารางที่ 1 สัดส่วนปริมาณ Baseflow เทียบกับน้ำท่า

| สถานีตรวจวัด | ปีที่ศึกษา  | ปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ย (CMS) |        |        |        |          |          |          |        |        |       |       |       | ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ย (CMS) | ปริมาณการไหลพื้นฐาน (พ.ย. ถึง มี.ค.) (CMS) | สัดส่วนปริมาณ Baseflow เทียบกับน้ำท่า (%) |
|--------------|-------------|----------------------------------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|--------|--------|-------|-------|-------|-------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|
|              |             | เม.ย.                            | พ.ค.   | มิ.ย.  | ก.ค.   | ส.ค.     | ก.ย.     | ต.ค.     | พ.ย.   | ธ.ค.   | ม.ค.  | ก.พ.  | มี.ค. |                               |                                            |                                           |
| S.33         | 2541 - 2560 | 43.92                            | 97.52  | 177.83 | 305.27 | 571.90   | 840.23   | 382.56   | 137.92 | 96.08  | 74.53 | 55.78 | 48.91 | 2,832.45                      | 413.22                                     | 14.59                                     |
| S.4B         | 2546 - 2561 | 38.17                            | 226.55 | 260.51 | 645.88 | 1,171.87 | 2,488.35 | 1,524.50 | 271.26 | 114.41 | 38.24 | 32.61 | 23.23 | 6,835.58                      | 479.75                                     | 7.02                                      |

ตารางที่ 1 แสดงสัดส่วนปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ยช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคมเทียบกับน้ำท่ารายปีเฉลี่ยสำหรับสถานีตรวจวัด S.33 และ S.4B เนื่องจากการศึกษานี้ได้ทำการเลือกข้อมูลช่วงเวลาดังกล่าวมาใช้วิเคราะห์ เพื่อเป็นตัวแทนของช่วงที่เกิดปริมาณการไหลพื้นฐาน จะเห็นว่าปริมาณ Baseflow ของทั้ง 2 สถานีตรวจวัด มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 10 % ของปริมาณน้ำท่ารวมทั้งปี



รูปที่ 5 การแยกปริมาณการไหลพื้นฐานโดยแบบจำลอง BFI+ ด้วยวิธี Lynie & Hollick

4. ทำการวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) และประเมินค่าความแม่นยำของข้อมูล โดยใช้ปริมาณน้ำท่าของสถานีตรวจวัดในช่วงฤดูแล้ง (ในกรณีพื้นที่ลุ่มน้ำป่าสักกำหนดให้เป็นเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคม) เปรียบเทียบกับปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) ในช่วงเวลาเดียวกัน ด้วยวิธี Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Root Mean Square Error (RMSE) และ Coefficient of Determination ( $R^2$ )

5. นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ทดสอบข้อมูลในส่วน Validation ที่เตรียมไว้ โดยการนำเข้าแบบจำลอง BFI+ และใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละวิธี จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow) และประเมินค่าความแม่นยำของข้อมูลอีกครั้ง

6. ทำการเปรียบเทียบค่าความแม่นยำของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดทั้ง 5 วิธี ของสถานีตรวจวัดน้ำท่าแล้วนำไปวิเคราะห์สรุปผลการศึกษา



ตารางที่ 2 ช่วงค่าของพารามิเตอร์

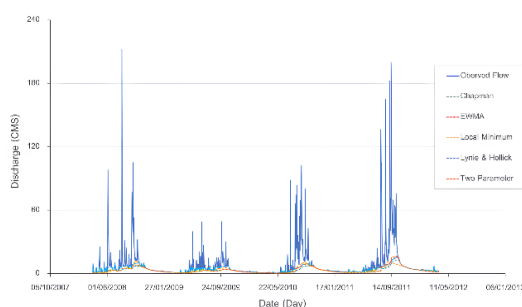
| Filter names     | Range of parameter values explored for each watershed |               |               |            |             |
|------------------|-------------------------------------------------------|---------------|---------------|------------|-------------|
|                  | k                                                     | C             | $\alpha$      | N          | f           |
| Lynlie & Hollick |                                                       |               | 0.961 - 0.985 |            |             |
| Chapman          |                                                       |               | 0.988 - 0.993 |            |             |
| EWMA             |                                                       |               | 0.011 - 0.015 |            |             |
| Two Parameter    | 0.961 - 0.989                                         | 0.017 - 0.022 |               |            |             |
| Local Minimum    |                                                       |               |               | 4.0 - 14.0 | 0.90 - 0.95 |

### 3. ผลการวิจัยและอภิปราย

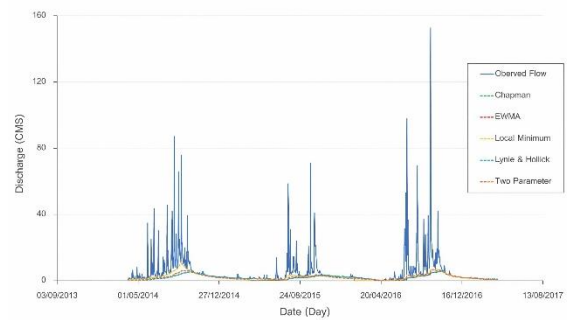
การศึกษานี้ได้ดำเนินการเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของทั้ง 5 วิธี โดยใช้ข้อมูลน้ำท่ารายวันในช่วงฤดูแล้ง (เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคม) ในแต่ละปี ค่าพารามิเตอร์ถูกคำนวณจากกระบวนการทดลองปรับค่า (Trial and Error) และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบในแต่ละปี (Calibration) ถูกใช้เป็นพารามิเตอร์สำหรับการตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) ต่อไป

สำหรับลุ่มน้ำป่าสัก พบว่าทั้งสถานีตรวจวัด S.33 และ S.4B แต่ละวิธีของการวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐาน มีค่าพารามิเตอร์ตัวกรองหลายชุดและแตกต่างกัน โดยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดจะแสดงไว้ในตารางที่ 3 ผลการศึกษากการวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐานของสถานีตรวจวัด S.33 และ S.4B ซึ่งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำป่าสักตอนบน โดยใช้แบบจำลอง BFI+ ช่วยในการคำนวณ ผลลัพธ์ของทั้ง 5 วิธี ได้แก่ Lynlie & Hollick, Chapman, EWMA, Boughton two-parameter และ Local Minimum จะแสดงในรูปของกราฟน้ำท่า ดังนี้

รูปที่ 6 - 7 แสดงให้เห็นถึงการแยกปริมาณการไหลพื้นฐานทั้ง 5 วิธี ของสถานีตรวจวัด S.33 สำหรับช่วงเวลาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2554 (Calibration) และ พ.ศ. 2557 ถึง พ.ศ. 2559 (Validation)

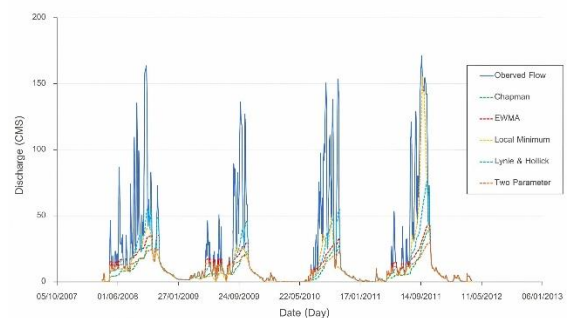


รูปที่ 6 ผลการศึกษากการแยกปริมาณการไหลพื้นฐานทั้ง 5 วิธี ของสถานีตรวจวัด S.33 (Calibration)

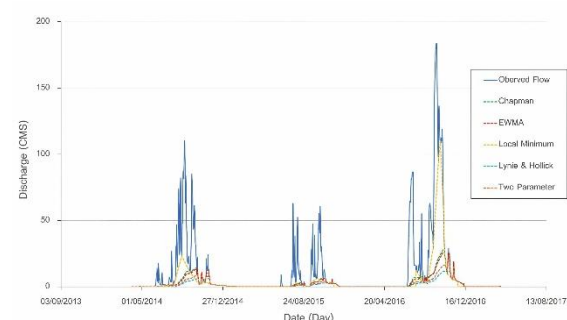


รูปที่ 7 ผลการศึกษากการแยกปริมาณการไหลพื้นฐานทั้ง 5 วิธี ของสถานีตรวจวัด S.33 (Validation)

รูปที่ 8 - 9 แสดงให้เห็นถึงการแยกปริมาณการไหลพื้นฐานทั้ง 5 วิธี ของสถานีตรวจวัด S.4B สำหรับช่วงเวลาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2554 (Calibration) และ พ.ศ. 2557 ถึง พ.ศ. 2559 (Validation)



รูปที่ 8 ผลการศึกษากการแยกปริมาณการไหลพื้นฐานทั้ง 5 วิธี ของสถานีตรวจวัด S.4B (Calibration)



รูปที่ 9 ผลการศึกษากการแยกปริมาณการไหลพื้นฐานทั้ง 5 วิธี ของสถานีตรวจวัด S.4B (Validation)



ตารางที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสถานีตรวจวัด S.33 และ S.4B ของแต่ละวิธีการจะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ของทั้ง 2 สถานีตรวจวัดมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

| สถานี   | Lynlie & Hollick | Chapman  | EWMA     | Boughton two parameter | Local Minimum |   |      |
|---------|------------------|----------|----------|------------------------|---------------|---|------|
| ตรวจวัด | $\alpha$         | $\alpha$ | $\alpha$ | k                      | C             | N | f    |
| S.33    | 0.996            | 0.995    | 0.004    | 0.985                  | 0.01          | 6 | 0.94 |
| S.4B    | 0.986            | 0.993    | 0.005    | 0.999                  | 0.003         | 5 | 0.81 |

ตารางที่ 4 - 5 แสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Root Mean Square Error (RMSE) และ Coefficient of Determination ( $R^2$ ) สำหรับสถานีตรวจวัด S.33 เพื่อใช้ตรวจสอบความแม่นยำของแต่ละวิธีการทั้ง Calibration และ Validation

ตารางที่ 4 ค่า NSE, RMSE และ  $R^2$  ของสถานีตรวจวัด S.33 (Calibration)

| Metode | Lynlie & Hollick | Chapman | EWMA   | Boughton two-parameter | Local Minimum |
|--------|------------------|---------|--------|------------------------|---------------|
| NSE    | 0.9974           | 0.9649  | 0.9975 | 0.7288                 | 0.8546        |
| RMSE   | 0.0264           | 0.1719  | 0.0264 | 0.5732                 | 0.4166        |
| $R^2$  | 0.9978           | 0.9681  | 0.9978 | 0.9056                 | 0.8965        |

ตารางที่ 5 ค่า NSE, RMSE และ  $R^2$  ของสถานีตรวจวัด S.33 (Validation)

| Metode | Lynlie & Hollick | Chapman | EWMA   | Boughton two-parameter | Local Minimum |
|--------|------------------|---------|--------|------------------------|---------------|
| NSE    | 0.9922           | 0.9437  | 0.9922 | 0.6630                 | 0.4780        |
| RMSE   | 0.1279           | 0.2796  | 0.1277 | 0.5855                 | 0.9166        |
| $R^2$  | 0.9941           | 0.9684  | 0.9941 | 0.9152                 | 0.7505        |

ตารางที่ 6 - 7 แสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Root Mean Square Error (RMSE) และ Coefficient of Determination ( $R^2$ ) สำหรับสถานีตรวจวัด S.4B เพื่อใช้ตรวจสอบความแม่นยำของแต่ละวิธีการทั้ง Calibration และ Validation

ตารางที่ 6 ค่า NSE, RMSE และ  $R^2$  ของสถานีตรวจวัด S.4B (Calibration)

| Metode | Lynlie & Hollick | Chapman | EWMA   | Boughton two-parameter | Local Minimum |
|--------|------------------|---------|--------|------------------------|---------------|
| NSE    | 0.9960           | 0.9518  | 0.9848 | 0.9613                 | 0.7831        |
| RMSE   | 0.2507           | 0.9212  | 0.4758 | 0.8095                 | 1.9687        |
| $R^2$  | 0.9974           | 0.9726  | 0.9930 | 0.9816                 | 0.8529        |

ตารางที่ 7 ค่า NSE, RMSE และ  $R^2$  ของสถานีตรวจวัด S.4B (Validation)

| Metode | Lynlie & Hollick | Chapman | EWMA   | Boughton two-parameter | Local Minimum |
|--------|------------------|---------|--------|------------------------|---------------|
| NSE    | 0.9986           | 0.9628  | 0.9784 | 0.9329                 | 0.6475        |
| RMSE   | 0.0659           | 0.3427  | 0.2552 | 0.5493                 | 1.5873        |
| $R^2$  | 0.9989           | 0.9801  | 0.9863 | 0.9628                 | 0.7436        |

จากผลการทดลองจะเห็นว่าเส้นกราฟของปริมาณการไหลพื้นฐานในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนมีนาคมมีค่าใกล้เคียงกับกราฟน้ำท่ารายวันที่นำมาใช้วิเคราะห์ แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำท่าในช่วงเวลานี้น่าจะเป็นปริมาณการไหลพื้นฐานทั้งหมด และจากตารางผลการวิเคราะห์ทางสถิติวิธี Lynlie & Hollick กับ วิธี EWMA มีความแม่นยำใกล้เคียงกันในสถานีตรวจวัดที่ S.33 ทั้ง Calibration และ Validation แต่ วิธี Lynlie & Hollick มีความแม่นยำมากกว่า วิธี EWMA ในสถานีตรวจวัดที่ S.4B ทั้ง Calibration และ Validation

#### 4. บทสรุป

จากผลการศึกษาข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า วิธีการทั้งหมด 5 วิธี ทั้งวิธีตัวกรองดิจิทัลแบบทำซ้ำและวิธีการฟิสิกส์ดิจิทัล สามารถแยกการไหลพื้นฐานออกมาจากน้ำท่ารายวันได้ และวิธี Lynlie & Hollick สามารถแยกการไหลพื้นฐานได้ดีกว่าวิธีอื่นๆ อีก 4 วิธี ทั้ง 2 สถานีตรวจวัดเนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จากการตรวจสอบความแม่นยำของแต่ละวิธีให้ค่าออกมาดีที่สุดที่สถานีตรวจวัด S.33 และ S.4B ตามลำดับ ดังนี้ ค่า Nash-Sutcliffe Efficiency เท่ากับ 0.9922, 0.9986 ค่า Root Mean Square Error เท่ากับ 0.1279, 0.0659 และ ค่า Correlation Coefficient เท่ากับ 0.9941, 0.9989

จากงานวิจัยนี้ การที่สามารถวิเคราะห์ปริมาณการไหลพื้นฐานได้นั้น ทำให้ทราบถึงปริมาณน้ำท่าของกลุ่มน้ำป่าสักรบริเวณสถานีตรวจวัดที่เลือกมาทำการวิเคราะห์ ว่าในฤดูแล้งหรือช่วงที่มีฝนตกอยู่น้อยมาก มีปริมาณน้ำท่าอยู่เท่าไร สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในเรื่องของการบริหารจัดการน้ำช่วงฤดูแล้งในเขตพื้นที่ได้ โดยการวางแผนการจัดสรรน้ำและกักเก็บน้ำไว้ใช้เพื่อการเกษตรและกิจการอื่นๆ นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อมูลน้ำท่าที่ได้มาใช้ประโยชน์ในเรื่องของการวางแผนควบคุมการไหลของ



ปริมาณน้ำเพื่อรักษาระบบนิเวศได้อีกด้วย สุดท้ายนี้ คาดหวังว่าจะสามารถนำข้อมูลที่ได้จากลุ่มน้ำป่าสักไปใช้กับลุ่มน้ำอื่นในประเทศไทยได้

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคเหนือตอนล่าง กรมชลประทาน ที่ให้การช่วยเหลือด้านการอนุเคราะห์ข้อมูลอุทกวิทยางานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jung Y, Shin Y, Won N-I, Lim K. Web-Based BFlow System for the Assessment of Streamflow Characteristics at National Level. *Water*. 2016;8(9):384.
- [2] Lim KJ, Engel BA, Tang Z, Choi J, Kim K-S, Muthukrishnan S, et al. AUTOMATED WEB GIS BASED HYDROGRAPH ANALYSIS TOOL, WHAT. *Journal of the American Water Resources Association*. 2005:1407-16.
- [3] Indarto, Novita E, Wahyuningsih S. Preliminary Study on Baseflow Separation at Watersheds in East Java Regions. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2016;9:538-50.
- [4] Indarto I, Novita E, Wahyuningsih S, Herlinda ND, Hidayah E. Application of recursive digital filter (RDF) methods for baseflow separation: study at Brantas watershed. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*. 2019;9(3):626-40.
- [5] Kang T, Lee S, Lee N, Jin Y. Baseflow Separation Using the Digital Filter Method: Review and Sensitivity Analysis. *Water*. 2022;14(3).
- [6] He S, Yu K, Tang Z, Yan Y, Zhang F. Impacts of parameter uncertainty on baseflow separation by a two - parameter recursive digital filter. *Hydrological Processes*. 2022;36(3).
- [7] Cheng S, Tong X, Illman WA. Evaluation of baseflow separation methods with real and synthetic streamflow data from a watershed. *Journal of Hydrology*. 2022;613.
- [8] Xie J, Liu X, Wang K, Yang T, Liang K, Liu C. Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States. *Journal of Hydrology*. 2020;583.
- [9] Mao B, Wang X, Jia S, Liu Z. Multi-methods to investigate the baseflow: Insight from watershed scale spatiotemporal variety perspective. *Ecological Indicators*. 2024;158.
- [10] Li L, Maier HR, Partington D, Lambert MF, Simmons CT. Performance assessment and improvement of recursive digital baseflow filters for catchments with different physical characteristics and hydrological inputs. *Environmental Modelling & Software*. 2014;54:39-52.
- [11] Office of the National Water Resources. Basic database development project for 22 river basins: Summary report on the basic information of the Pasak River Basin. Bangkok: Office of the National Water Resources; 2020.Thai.
- [12] Vudhivanich V, Chuchat W. Analysis of model accuracy using Nash-Sutcliffe Efficiency and  $R^2$  [Internet]. 2010. p. 77-87. Available from: <https://online.anyflip.com/awhu/ialr/mobile/>. Thai



# RMUTL Engineering Journal

Faculty of Engineering  
Rajamangala University of Technology Lanna



**วารสารวิศวกรรมศาสตร์**  
**มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา**