



# RESEARCH JOURNAL

Vol.16 No.2 July - December 2022

## วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

ปีที่ 16 เล่มที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2565

ISSN (Online) 2651-2130

ISSN 1906-0874

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Rajamangala University of Technology Krungthep

## วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

## Rajamangala University of Technology Krungthep Research Journal

ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2565 Vol 16 No.2 July – December 2022

เจ้าของ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

## ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทน์มณี  
ศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ ชินณะราศรี  
ศาสตราจารย์สมชาย วงศ์วิเศษ  
ดร.สิริเบญญา กอวัฒนา  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพรัตน์ ภัยวิมุตติ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุตเจื้อจัน  
  
นางสาวประภาพร ร้อยพรมมา  
นางสาวรุ่งทิพา วงศ์ไพศาลฤทธิ์

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ  
กรรมการสภาวิชาการมหาวิทยาลัย  
กรรมการสภามหาวิทยาลัย  
กรรมการสภามหาวิทยาลัย  
รองอธิการบดี  
รองอธิการบดี รักษาการแทน  
ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา  
รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา  
รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

## บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ศิวารุช

รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

## ผู้ช่วยบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ จ้าวสุวรรณ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ สงวนพวง

ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา  
ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

## กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย  
ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.อจฉรา จันทน์ฉาย  
รองศาสตราจารย์ ดร.นเรศเรษฐ พัฒนเดช  
รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์  
รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ศรีวงศ์กุล  
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิต  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร สุรินทร์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุราษฎร์ พรหมจันทร์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมล จิรเสรีมรกุล  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมกริช ละวรรณวงศ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพล จิรจรี  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรนารถ ไธกุล  
ดร.ประกอบ ขาดีกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
มหาวิทยาลัยมหิดล  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

### เจ้าหน้าที่ประจำวารสาร

นางสาวเกตุวดี อุเทน

นางนาฏนภา จรรย์

นางสาวกนกวรรณ วอนเพียร

นางสาววันทนา ประณีธานธรรม

นายวีระวัฒน์ ราษฎร์สภา

นางสาวนุชนารถ สิมมาลา

นางวิไรรัตน์ ราษฎร์สภา

นางจันทนา สังข์อู่

นางสาวอัจฉรา จินดาจำนง

นายวันนิวัติ วันทนา

นางสาวพัชรินทร์ พัฒนโกครัตนา

## บทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารเป็นความคิดเห็นของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

### ความเป็นมา

วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ISSN 1906 - 0874 เป็นวารสารวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ โดยสถาบันวิจัยและพัฒนา ได้มีการจัดทำวารสารอย่างต่อเนื่องตั้งแต่พ.ศ. 2550 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งเป็นวารสารที่อยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยเผยแพร่เป็นราย 6 เดือน ซึ่งตีพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ (ฉบับละ 10-12 บทความ) และมีการดำเนินงาน จัดพิมพ์บทความประเภทต่าง ๆ ได้แก่ บทความวิจัย (Research paper) และ บทความวิชาการ (Academic paper)

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ เป็นบทความที่สร้างองค์ความรู้และมีคุณภาพในทางวิชาการสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการอ้างอิงได้ เพราะผ่านการพิจารณากรองและประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง จากหลากหลายสถาบัน 3 ท่าน ซึ่งเป็นการประเมินแบบไม่แสดงชื่อผู้แต่งและผู้ประเมิน (Double blinded) ก่อนที่จะเผยแพร่สู่สาธารณชน จึงทำให้วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ เป็นวารสารวิชาการที่มีคุณภาพ

กองบรรณาธิการ วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ จัดทำวารสารเป็นรูปเล่มฉบับสมบูรณ์และเผยแพร่ให้กับสถาบันการศึกษาต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย นอกจากนี้ยังสามารถสืบค้นเพื่ออ้างอิงหรืออ่านบทความที่เปี่ยมด้วยองค์ความรู้ได้ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk>

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research paper) และบทความวิชาการ (Academic paper) ที่มีคุณภาพของอาจารย์นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง และสาขาต่าง ๆ ที่มีการบูรณาการข้ามศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ที่ทันสมัย ได้แก่
  - 1.1. Environment Chemistry
  - 1.2. General Engineering
  - 1.3. Applied Mathematics
  - 1.4. Renewable Energy, Sustainability and the Environment
  - 1.5. Biomaterials
2. เพื่อส่งเสริมและเป็นกลไกการขับเคลื่อนงานวิจัย ทำให้เกิดผลงานวิจัยที่เข้าไปสู่การพัฒนาต่อภาคสังคม ชุมชน และนำไปประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนเพื่อต่อยอด และเกิดความเชื่อมโยงระหว่างงานวิจัยงานวิชาการ ซึ่งนำมาสู่การเกิดประโยชน์ต่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และตอบสนองต่อการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศไทย

## นโยบายการรับบทความ

กองบรรณาธิการวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ มีความยินดีที่จะรับบทความจากอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ที่เขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ซึ่งผลงานที่ส่งมาขอตีพิมพ์ต้องไม่เคยเผยแพร่ในสิ่งพิมพ์อื่นใดมาก่อน และต้องไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น

การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ส่งบทความโดยตรง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ

ข้อความที่ปรากฏอยู่ในแต่ละบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเล่มนี้ เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียนแต่ละท่าน ไม่เกี่ยวข้องกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพแต่อย่างใด ความรับผิดชอบด้านเนื้อหา และการตรวจร่างบทความแต่ละบทความเป็นของผู้เขียนแต่ละท่าน หากมีความผิดพลาดใด ๆ ผู้เขียนแต่ละท่านจะต้องรับผิดชอบต่อบทความของตนเองแต่ผู้เดียว

กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์มีให้นำเนื้อหา หรือข้อคิดเห็นใด ๆ ของบทความในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ ไปเผยแพร่ก่อนได้รับอนุญาตจากกองบรรณาธิการ อย่างเป็นลายลักษณ์อักษร ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสาร

ผู้ประสงค์จะส่งบทความกรุณาอ่านรายละเอียดการส่งบทความที่คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความ ซึ่งได้ระบุไว้ในเล่มวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ หรือ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> และสามารถส่ง Online ได้โดยกรอกรายละเอียดให้ครบถ้วนในระบบการส่งบทความ Online หากต้องการสอบถามข้อมูลเพิ่มเติม ติดต่อได้ที่

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ  
เลขที่ ๒ ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ ๑๐๑๒๐  
โทร. ๐ ๒๒๘๖ ๙๖๐๐ ต่อ ๑๑๗๗ โทรสาร ๐ ๒๒๘๗ ๙๖๘๔  
E-mail: [utk\\_research\\_journal@mail.rmutk.ac.th](mailto:utk_research_journal@mail.rmutk.ac.th)  
[www.rdi.rmutk.ac.th](http://www.rdi.rmutk.ac.th)

## กำหนดการเผยแพร่

ปีละ 2 ฉบับ (ทุก 6 เดือนต่อฉบับ)  
ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน  
ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม

## การเผยแพร่

เผยแพร่ผ่านระบบออนไลน์  
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk>

## สารบัญ

หน้า

การวิเคราะห์คุณลักษณะของมีดตัดโคนอ้อยที่นำเข้าจากต่างประเทศด้วยหลักวิศวกรรมย้อนรอย

An analysis of the traits of imported sugarcane base cutter blades by reverse engineering principle..... 1

ณภัทร อินทนนท์, ประพันธ์ ยาวระ, ฉัตรแก้ว สุริยะภา

การเปรียบเทียบอิเล็กโทรดด้วยกระบวนการกัดเซาะไฟฟ้ากับวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์  
Comparative investigation of electrodes using by Electrical discharge machining on tungsten carbide..... 14

รัตติกรณ์ เสาร์แดน, ไพบุลย์ หาญมนต์

การทดสอบการดัดแบบ 4 จุดของการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีเรซิน  
Four-Point Bending Test of Reinforced Concrete Beams Strengthening with Epoxy Resin Bonded Steel Plates..... 24

ชนัดศักดิ์ ชีระเกตุ, วิกร โตราพงศ์, ตามอง ดี, ปฏิภาณ จันทรวชิต,  
ยุทธศักดิ์ อนันตเดชศักดิ์, สัจจา บุญยฉัตร, ยศ สมพรเจริญสุข

กำลังเชิงดัดของการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดัดด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนยึดติดจากภายนอก..... 44

Flexural Strength of Singly Reinforced Concrete Beams Strengthening with Externally Bonded Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates

วิกร โตราพงศ์, ชนัดศักดิ์ ชีระเกตุ, ตามอง ดี, ปฏิภาณ จันทรวชิต,  
วิมเนศ วงศ์วานิชวัฒนา, สัจจา บุญยฉัตร, ยศ สมพรเจริญสุข

Short-term Prediction of Flow Rate and Suspended Sediment Transport in a Tidal River Using Genetic Programming..... 65

Chaiyuth Chinnarasri, Pakorn Ditthakit

|                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 33 บัสโดยการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว<br>พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูญเสีย<br>Power Distribution System 33 Bus Simulation by Connecting a Distributed<br>Photovoltaic Power Generation to Improve Power Loss.....           | 80 |
| ศาสตราจารย์ ดร. วุฒินันท์, ปพน งามประเสริฐ, นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ                                                                                                                                                                                                           |    |
| การเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 85 บัส<br>ด้วยการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์<br>Increasing Power Supply Performance in 85 Bus Distribution System<br>Model with Installation Photovoltaic Distributed Generation..... | 88 |
| มนัส บุญเพียรทอง, ณัฏพล เรืองทรัพย์, นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ                                                                                                                                                                                                                  |    |
| เครื่องคัดแยกน้ำหนักและสีมะม่วงอัตโนมัติด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์<br>Automatic mango weight and color sorting machine equipped<br>with microcontroller.....                                                                                                                      | 99 |
| สุรเทพ แป้นเกิด, นรินทร์ จีระนันตสิน, ปิติวัฒน์ จุลเกษมศักดิ์,<br>รุ่งทิพย์ โคบาล, วาสนา ดั่งเหมือน                                                                                                                                                                          |    |

## การวิเคราะห์คุณลักษณะของมีดตัดโคนอ้อยที่นำเข้าจากต่างประเทศ ด้วยหลักวิศวกรรมย้อนรอย

### An analysis of the traits of imported sugarcane base cutter blades by reverse engineering principle

ณภัทร อินทนนท์<sup>1</sup> ประพันธ์ ยาวระ<sup>1\*</sup> และ ฉัตรแก้ว สุริยะภา<sup>1</sup>

<sup>1</sup>คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น, ประเทศไทย

Faculty of Technology Education, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen campus,  
Thailand.

\*Corresponding author. E-mail :Naphatara.in@rmu.ac.th, 0866356986

#### บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะ และประสิทธิภาพมีดตัดโคนอ้อยที่นำเข้าจากต่างประเทศและเป็นที่นิยมใช้งานในประเทศไทยในฤดูกาลผลิตปี 2562/2563 และการใช้เทคนิควิศวกรรมย้อนรอยเพื่อค้นหาชนิดของวัตถุดิบและกระบวนการผลิตที่ใช้ในการผลิตมีดดังกล่าว โดยมีผู้ที่ทำการศึกษาในครั้งนี้เป็นมีดที่นำเข้าจากต่างประเทศ จำนวน 3 ยี่ห้อ ๆ ละ 12 ใบ โดยนำเข้าจากประเทศออสเตรเลีย 1 ยี่ห้อ ใช้สัญลักษณ์ “P” และนำเข้าจากไต้หวัน 2 ยี่ห้อ ใช้สัญลักษณ์ “S” และ “K” เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย กล้องจุลทรรศน์สำหรับงานวัสดุ (Metallurgical microscope) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope :SEM) เครื่องทดสอบความแข็ง (Universal Hardness Tester) เครื่องทดสอบการดูดซับแรงกระแทกแบบชาร์ปี (Charpy impact test) และการทดสอบใช้งานจริงร่วมกับรถตัดอ้อยยี่ห้อ John Deere รุ่น CH570 ในเขตพื้นที่จังหวัดชัยภูมิ ผลการศึกษพบว่า มีดตัดโคนอ้อยยี่ห้อ “S” มีประสิทธิภาพโดยรวมสูงสุด รองลงมาคือยี่ห้อ “P” และ “K” โดยมี 1 ชุด สามารถตัดอ้อยได้เฉลี่ย 750, 680 และ 650 ต้นตามลำดับ และมีทั้ง 3 ยี่ห้อ มีสมบัติเชิงกลที่ไม่แตกต่างกัน โดย มีความแข็งเฉลี่ยระหว่าง 44 – 47 HRC ค่าความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกอยู่ระหว่าง 7 – 12 J และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่า ทั้ง 3 ยี่ห้อ ผลิตมาจากเหล็กในกลุ่มเหล็กสปริง เกรดมาตรฐาน SAE9260 หรือ JIS: SUP6,SUP7 เช่นเดียวกัน ซึ่งมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญได้แก่ ซิลิกอน (Si) ร้อยละ 1.2 – 2.0 และแมงกานีส (Mn) ร้อยละ 0.9 – 1.3 และการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกสามารถสรุปได้ว่าการใช้กระบวนการทางความร้อน (Heat treatment process) ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลแตกต่างกัน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพการทำงานแตกต่างกัน

**คำสำคัญ :** มีดตัดโคนอ้อย วิศวกรรมย้อนรอย โครงสร้างผลึก เหล็กสปริง

#### Abstract

The purpose of this study was to compare the characteristics and the efficiency of sugarcane base cutter blades that are imported from abroad and are popular in Thailand in the 2019/2020 production season and the use of reverse engineering techniques to find out the types of raw materials and manufacturing processes. The cutter blades that were used in the

investigation were 3 brands, 12 of each, one imported from Australia named "P" and two imported from Taiwan named "S" and "K". The analytical instruments consist of Metallurgical Microscope, Scanning Electron Microscope (SEM), Universal Hardness Tester, and Charpy Impact Test. The cutter blades were installed in the sugarcane harvester, John Deere model CH570, and harvested the sugarcane in Chaiyaphum province to evaluate overall performance. The results showed that The "S" brand has the highest overall efficiency followed by brands "P" and "K", with 1 set of knives capable of cutting sugarcane on average 750, 680, and 650 tons respectively. All of the cutter blades had the same mechanical properties, with average hardness between 44 - 47 HRC, and toughness between 7 - 12 J. The chemical composition analysis found that all of the brands are made of spring steel, standard grade SAE9260 or JIS: SUP6, SUP7, in which the important elements are Silicon (Si) 1.2 - 2.0 %wt. and Manganese (Mn) 0.9 - 1.3 %wt. The microstructure analysis has shown that the heat treatment process was used in the manufacturing process to improve mechanical properties and it causes a difference in overall performance.

**Keywords:** Sugar cane base cutter blades, Reverse engineering, Microstructure, Spring steel

## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลยังเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญของไทย และมีความผันผวนอยู่ตลอดเวลา ทั้งนี้เพราะนอกจากสภาวะการณ์ในประเทศแล้ว สถานการณ์ต่างประเทศก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดผลกระทบต่ออุปสงค์และอุปทานของตลาดทั่วโลก ในปีการผลิต 2563/64 เกิดปัญหาฝนแล้งผลผลิตน้ำตาลมีเพียง 7.4 ล้านตัน อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมน้ำตาลของไทยเป็นอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพ สามารถแข่งขันได้เนื่องจากต้นทุนการผลิตยังอยู่ในระดับต่ำ คิดเป็นอันดับ 2 ของโลกรองจากบราซิล [1] แต่ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงทางอุตสาหกรรมเกิดขึ้นทั่วโลก ระบบการเกษตรเปลี่ยนจากการใช้แรงงานคนมาเป็นการใช้เครื่องจักร ทั้งนี้เพื่อลดปัญหาผลกระทบที่เกิดจากการขาดแคลนแรงงาน โดยเฉพาะในกระบวนการเก็บเกี่ยวอ้อย ที่ขาดแคลนแรงงานอย่างหนัก [2] เมื่อระบบการเก็บเกี่ยวมีการเปลี่ยนแปลงก็กระทบต่อต้นทุนในการดำเนินงานด้วย โดยต้นทุนการผลิตอ้อยที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ ต้นทุนของการเก็บเกี่ยวและการขนส่ง โดยต้นทุนในการตัดจะมีค่าประมาณ 190 บาทต่อตัน และต้นทุนการขนส่งประมาณ 100 บาทต่อตัน โดยหาก

เกษตรกรเลือกใช้การตัดอ้อยโดยใช้รถตัดอ้อยของโรงงานน้ำตาล ทางโรงงานจะมีรถขนส่งให้บริการด้วย โดยคิดค่าใช้จ่ายรวมเป็น 290 บาท ต่อตัน ทำให้ต้นทุนการเก็บเกี่ยวสูงถึง 2,150 บาทต่อไร่ [3] ปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งของต้นทุนการตัดอ้อยโดยใช้รถตัดอ้อยขนาดใหญ่ นั่นก็คือ ราคาของมีดตัด ซึ่งมีดตัดที่ใช้ในรถตัดอ้อยขนาดใหญ่ นั้นมี 2 ประเภทคือมีดตัดโคนอ้อย และใบมีดสับท่อน โดยใบมีดตัดโคนอ้อยนั้นจะมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่า เพราะต้องมีการสัมผัส และเสียดสีกับพื้นดิน ทรายนวมไปถึงก้อนหิน และตอไม้ที่อยู่ในไร่ด้วย มีดตัดอ้อยส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศ เพราะการผลิตในประเทศยังมีน้อย และการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในการผลิตนั้นยังมีไม่มากนัก เนื่องจากเป็นเรื่องใหม่ และมีการใช้งานเป็นฤดูกาล ปัจจุบันต้นทุนเฉลี่ยของมีดตัดโคนอ้อย จะอยู่ประมาณ 2 บาทต่อตัน ซึ่งถ้าพิจารณาผลผลิตอ้อยในปีเพาะปลูก 2564/65 มีอ้อยทั้งหมด 92,070,668.975 ตัน คิดเป็นอ้อยตัดสด 66,951,734.425 ตัน ซึ่งในจำนวนนี้ ถ้าคิดเป็นอ้อยที่ตัดโดยใช้รถตัดอ้อยร้อยละ 70 จะมีอ้อยที่ตัดโดยใช้รถตัดประมาณ 46,866,000 ตัน โดยมีต้นทุนที่เป็นส่วนของมีดตัดโคนอ้อยทั้งหมดประมาณ

93,732,000 บาท ซึ่งถือว่ามูลค่าที่สูง และมีตลาดโค่นอ้อยที่มีการใช้งานในปัจจุบันนี้ เป็นชนิดที่นำเข้าจากต่างประเทศเกือบทั้งหมด ทำให้มีเงินไหลออกไปต่างประเทศ และที่สำคัญทำให้ประเทศขาดองค์ความรู้ในการผลิตและการพัฒนา สมบัติต่าง ๆ ของชนิด ทำให้ไม่สามารถผลิตชนิดขึ้นมาใช้เองได้ และส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมต้นทุนของชนิดได้และส่งผลต่อการควบคุมต้นทุนการผลิตอ้อยและน้ำตาลต่อไป และอาจเป็นผลกระทบต่อการขีดความสามารถทางการแข่งขันของประเทศในระยะยาว

การพัฒนาการผลิตชิ้นส่วนที่มีใช้อยู่แล้วในท้องตลาดให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่าเดิม มีเทคนิคที่นิยมนำมาใช้คือกระบวนการวิศวกรรมย้อนกลับ (Reverse engineering) [4] ซึ่งในกรณีการผลิตชนิดโค่นอ้อยนี้ จะเริ่มต้นตั้งแต่ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี (Chemical component) การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค (Micro Structure) ที่เป็นผลมาจากกระบวนการผลิต (Processing) และส่งผลต่อสมบัติ (Properties) และ สมรรถนะ (Performance) ตามหลักการของทางวัสดุศาสตร์ ซึ่งการศึกษาด้วยวิธีการวิศวกรรมแบบย้อนกลับนี้จะทำให้การผลิต และพัฒนาชนิดโค่นอ้อยได้อย่างรวดเร็ว ไม่เสียเวลาลองผิดลองถูกเพราะเป็นการต่อยอดจากงานเดิมที่มีอยู่แล้ว

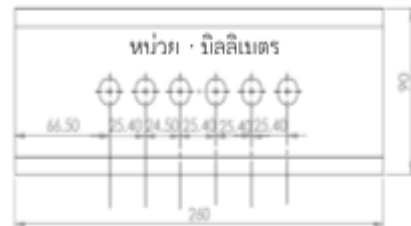
จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นผู้วิจัยจึงได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้าง สมบัติเชิงกลและอายุการใช้งานของชนิดโค่นอ้อยที่เป็นที่นิยมอยู่ใช้งานอยู่ในฤดูกาลผลิต 2563/64 เพื่อนำมาเป็นข้อมูลสำหรับการผลิตและพัฒนา สมบัติเชิงกลของชนิดโค่นอ้อยภายในประเทศ โดยเลือกยี่ห้อที่เป็นที่นิยมและมีการใช้งานในทุกพื้นที่ของการปลูกอ้อยและผลิตจากบริษัทที่มีความน่าเชื่อถือที่มีการผลิตต่อกันมานานหลายปี

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

### 2.1 วัสดุ

ชนิดโค่นอ้อยที่ใช้ในการศึกษานี้มี 3 ยี่ห้อ โดยมียี่ห้อที่นำเข้าจากออสเตรเลีย 1 ยี่ห้อ (ให้สัญลักษณ์เป็น P) นำเข้าจากไต้หวัน 2 ยี่ห้อ โดยเป็นยี่ห้อที่นำเข้าโดยผู้ผลิตเอง 1 ยี่ห้อ (ให้สัญลักษณ์เป็น K)

และนำเข้าด้วยตัวแทนจำหน่าย 1 ยี่ห้อ (ให้สัญลักษณ์เป็น S) โดยทั้งหมดเป็นชนิดที่มีจำหน่ายในฤดูกาลผลิตอ้อย 2563/64 แต่ละยี่ห้อจะใช้ยี่ห้อละ 12 ใบ รวมชนิดที่ทำการศึกษาทั้งสิ้น 36 ใบ ใบชนิดของแต่ละยี่ห้อที่นำมาศึกษานั้นมีขนาดและรูปทรงเป็นดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขนาดของชนิดโค่นอ้อย



ภาพที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของชนิดที่นำมาใช้ในการศึกษา (ก)ยี่ห้อ “P” จากออสเตรเลีย (ข) ยี่ห้อ “S” จากไต้หวัน และ (ค) ยี่ห้อ “K” จากไต้หวัน

### 2.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษานี้มีการวิเคราะห์ร้อยละของธาตุ ที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ทดสอบสมบัติเชิงกล ซึ่งในการศึกษานี้จะทำการทดสอบค่าความแข็ง (Hardness) ความทนทาน (Toughness) และความต้านการสึกหรอ (Wear resistance) และทดสอบสมรรถนะโดยนำไปตัดอ้อยในพื้นที่จังหวัดชัยภูมิ รายละเอียดของการวิเคราะห์และการทดสอบ มีดังนี้

2.2.1 การวิเคราะห์ธาตุที่องค์ประกอบทำโดยการส้อมชนิดโค่นอ้อยแต่ละยี่ห้อขึ้นมา 1 ใบ เสร็จแล้วนำไปตัดให้ได้ขนาด 10x 15 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องตัดแบบเส้นลวด ขัดผิวด้านที่จะใช้งานให้เรียบ และนำเข้ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning

electron microscope : SEM) เพื่อวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบโดยเทคนิค การวิเคราะห์องค์ประกอบ ทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตริ่งสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-Ray spectroscopy: EDS )

2.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (Micro structure) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ทางโลหะวิทยา (Metallurgical microscope) โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วยเครื่องตัดแบบเส้นลวด มาขัดผิวชิ้นงานให้เรียบ ตามขั้นตอนของการตรวจสอบโครงสร้างวัสดุเสร็จแล้วกัดเปิดผิวชิ้นงานด้วยกรด เพอร์ริกคลอไรด์ ( $Fe_3Cl$ ) เป็นเวลา 10 วินาที ตามด้วยกรดไนตริก ( $HNO_3$ ) 10 วินาที และล้างกรดด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เสร็จแล้วล้างด้วยน้ำสะอาด และขัดผิวด้วยผ้าสักหลาด ก่อนนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์



ภาพที่ 3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

### 2.2.3 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกล

#### 1) การทดสอบความแข็ง (Hardness)

มีดทุกใบจะถูกนำไปวัดค่าความแข็ง ด้วยเครื่องวัดค่าความแข็ง (Universal hardness tester) ในการศึกษาครั้งนี้วัดความแข็งแบบ Rockwell scale C (HRC)

2) ค่าความทนทาน (Toughness) ทำโดยสุ่มใบมีดขึ้นมาอีห่อละ 1 ใบ แล้วนำไปตัดตามขวางด้วยเครื่องตัดแบบเส้นลวด ให้มีความกว้าง 10 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ได้ชิ้นทดสอบขนาด  $10 \times 90 \times 4$  มิลลิเมตร โดยในการทดสอบครั้งนี้ใช้ห่อละ 4 ชิ้น หลังจากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรง

กระแทกแบบ ชาร์ปี (Charpy impact test) ยี่ห้อ Wolpert โดยใช้ตุ้มน้ำหนัก 30 กิโลกรัม (kgf.) การทดสอบในครั้งนี้ต้องการที่จะเปรียบเทียบค่าการดูดซับของชิ้นงานทดสอบเท่านั้นจึงไม่ได้มีการบอกชิ้นงานตามมาตรฐานการทดสอบแบบชาร์ปีโดยทั่วไป [5]

3) การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) โดยนำชิ้นงานที่ได้จากการตัดขนาดประมาณ  $10 \times 15$  มิลลิเมตร มาขัดผิวให้เรียบให้ได้ตามมาตรฐานของการทดสอบ [6] ทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ และนำไปขึงน้ำหนักด้วยเครื่องขึงน้ำหนักชนิด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง เสร็จแล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการสึกหรอชนิด Pin on disc โดยใช้น้ำหนักกด 1 kg. (10N) ความเร็วรอบในการทดสอบ มี 2 ระดับคือ 200 และ 300 รอบต่อนาที ระยะทางในการทดสอบเท่ากับ 10,000 เมตร ส่วนที่เป็น disc เป็นกระดาดทรายชนิด Silicon carbide ที่มีความละเอียด 800 และ 1000 (เบอร์ 800 และ 1000) การทดสอบจะใช้กระดาดทราย 1 แผ่น ต่อ 1 ครั้งของการทดสอบ เมื่อครบระยะตามที่กำหนดไว้ นำชิ้นงานออกมาทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ และขึงน้ำหนักด้วยเครื่องขึงน้ำหนัก เสร็จแล้วคำนวณหาค่าน้ำหนักที่หาย ต่อพื้นที่ของชิ้นงาน ไปของแต่ละชิ้น



ภาพที่ 4 เครื่องทดสอบการสึกหรอ ชนิด Pin-on-disc

### 2.2.4 การทดสอบสมรรถนะ

ในการศึกษาครั้งนี้ จะทำการทดสอบมีดครั้งละ 1 ยี่ห้อ โดยนำมีดอีห่อละ 10 ใบ มาขึงน้ำหนัก พร้อมเขียนหมายเลขกำกับลงบนมีดแต่ละใบ เสร็จแล้วนำไปติดตั้งในรถตัดอ้อยยี่ห้อ John Deer รุ่น CH 570

และทำการตัดอ้อยในไร่อ้อย จนกว่า มีดจะหมดอายุการใช้งาน บันทึกน้ำหนักอ้อยที่ตัดได้ และหลังจากนั้น นำมีดมาทำความสะอาดและชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง เปรียบเทียบน้ำหนักก่อนและหลังการใช้งาน

### 3. ผลการศึกษา

#### 3.1 องค์ประกอบทางเคมี

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของมีดตัดทั้ง 3 ยี่ห้อ ผลเป็นดังนี้ ยี่ห้อ P มีธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญได้แก่ เหล็ก (Fe) ซิลิกอน (Si) แมงกานีส (Mn) และคาร์บอน โดยมีสัดส่วนเท่ากับ 96.77, 1.78, 1.17 และ 0.25 %wt ตามลำดับ



ภาพที่ 5 รถตัดอ้อยที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 6 การติดตั้งใบมีดในรถตัดอ้อย

ยี่ห้อ K ธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญได้แก่ เหล็ก (Fe) ซิลิกอน (Si) แมงกานีส (Mn) และโครเมียม (Cr) โดยมีสัดส่วน เท่ากับ 96.70, 1.21, 0.97 และ 0.20 %wt ตามลำดับ มีคาร์บอน 0.33 %

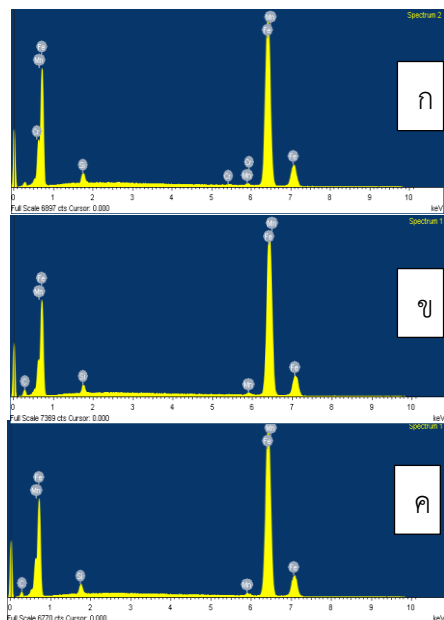
ยี่ห้อ S ธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญได้แก่ เหล็ก (Fe) ซิลิกอน (Si) และแมงกานีส (Mn) โดยมีสัดส่วน เท่ากับ 97.07, 1.36 และ 1.07 %wt ตามลำดับ มีคาร์บอน 0.4%

ตารางที่ 1 ร้อยละของธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ

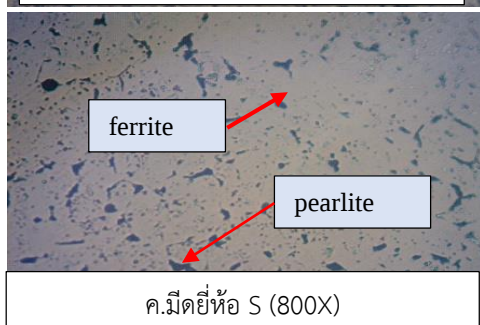
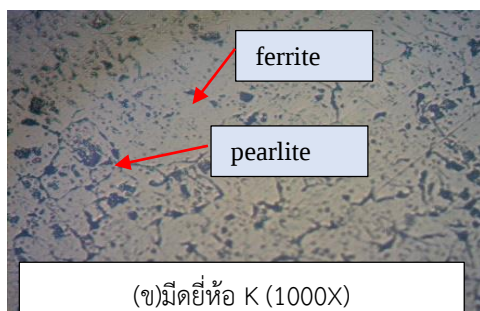
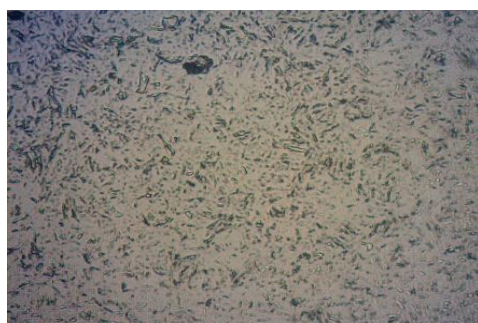
| ยี่ห้อ | สัดส่วนโดยน้ำหนักของธาตุ( %wt) |      |      |     |      |
|--------|--------------------------------|------|------|-----|------|
|        | Fe                             | Mn   | Si   | Cr  | C    |
| P      | 96.77                          | 1.17 | 1.78 |     | 0.25 |
| S      | 97.07                          | 1.07 | 1.36 |     | 0.4  |
| K      | 96.70                          | 0.97 | 1.21 | 0.2 | 0.33 |

#### 3.2 โครงสร้างจุลภาค

จากการวิเคราะห์พื้นผิวของชิ้นงานเบื้องต้นพบว่าแต่ละยี่ห้อผ่านกระบวนการทางความร้อนมาแล้ว สังเกตได้จากผิวที่เป็นสีดำและมีคราบสนิมเกิดเป็นจุดๆ ทั่วทั้งใบมีด เมื่อพิจารณาโครงสร้างผลึกพบว่า มีดยี่ห้อ “P” จะมีเกรนขนาดใหญ่ และธาตุที่เป็นองค์ประกอบอื่นกระจายอยู่ทั่วไป เป็นลักษณะทั่วไปของโครงสร้างจุลภาคเป็นแบบ bainite [7] คือ ส่วนยี่ห้อ “K” และ “S” จะมีลักษณะผิวเรียบสีจางและมีจุดดำ กระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างแบบ pearlite + ferrite [8]



ภาพที่ 7 องค์ประกอบของมีดแต่ละยี่ห้อ (ก) ยี่ห้อ “P” (ข)ยี่ห้อ “K” (ค) ยี่ห้อ “S”



ภาพที่ 8 โครงสร้างจุลภาค

### 3.3 สมบัติเชิงกล

#### 3.1 ความแข็ง (Hardness)

ในการศึกษาครั้งนี้จะวัดค่าความแข็งของใบมีดที่ทำการศึกษาทั้งหมด คือ ยี่ห้อละ 12 ใบ ๆ ละ 3 จุดเสร็จแล้วหาค่าเฉลี่ยของแต่ละใบ รายละเอียดของค่าความแข็งเป็นดังตารางที่ 2 และภาพที่ 9

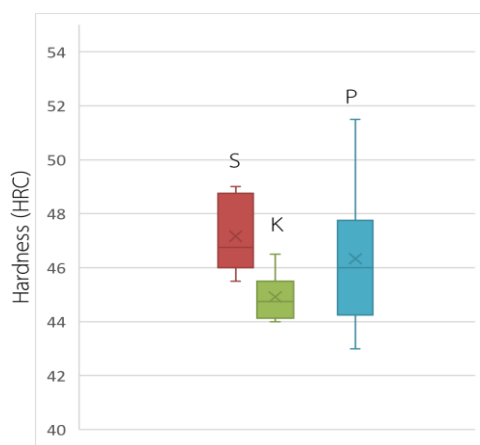
#### 3.2 ความทนทาน (Toughness)

การศึกษาค้นคว้าทดสอบความทนทานโดย การวัดค่าการดูดซับพลังงานที่ขึ้นงานแต่ละชิ้นสามารถรับได้ก่อนเกิดการแตกหัก ค่าที่สูงจะหมายถึงสามารถดูดซับพลังงานกระแทกได้ดีกว่า โอกาสที่จะแตกหักจาก

การกระแทกต่ำกว่าชิ้นงานที่มีค่าการดูดซับต่ำ รายละเอียดแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าความแข็งของใบมีด

| ใบที่  | ความแข็งของใบมีดยี่ห้อ (HRC) |       |       |
|--------|------------------------------|-------|-------|
|        | "S"                          | "K"   | "P"   |
| 1      | 46                           | 44    | 44    |
| 2      | 46                           | 45.5  | 48    |
| 3      | 49                           | 44    | 49    |
| 4      | 46.5                         | 44.5  | 46.5  |
| 5      | 46                           | 44    | 45    |
| 6      | 47.5                         | 45    | 51.5  |
| 7      | 48                           | 45.5  | 47    |
| 8      | 47                           | 46    | 46    |
| 9      | 45.5                         | 44.5  | 43    |
| 10     | 49                           | 45    | 46    |
| 11     | 49                           | 46.5  | 44    |
| 12     | 46.5                         | 44.5  | 46    |
| เฉลี่ย | 47.17                        | 44.92 | 46.33 |



ภาพที่ 9 กราฟเปรียบเทียบความแข็ง

**ตารางที่ 3** ค่าดูดซับพลังงานแรงกระแทก

| ยี่ห้อ | ค่าการดูดซับพลังงานแรงกระแทก (J) |              |              |              |        |
|--------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------|
|        | ชั้น<br>ที่1                     | ชั้น<br>ที่2 | ชั้น<br>ที่3 | ชั้น<br>ที่4 | เฉลี่ย |
| K      | 8                                | 9            | 8            | 8            | 8.25   |
| S      | 8                                | 7.6          | 7.8          | 7.6          | 7.7    |
| P      | 8                                | 7.4          | 8            | 7.6          | 7.75   |

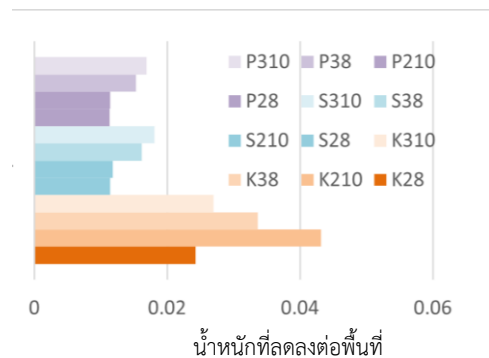
### 3.3 ความต้านทานการสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอโดยใช้เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบ Pin-on-disc จะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการยึดเหนี่ยวกันเนื้อวัสดุ เมื่อได้รับการเสียดสี ค่าที่สูงหมายถึงความสามารถในการยึดเหนี่ยวตัว อัตราการสึกหรอจะสูง รายละเอียดดังตารางที่ 4 และภาพที่ 10

**ตาราง 4** น้ำหนักที่ลดลงต่อหน่วยพื้นที่ ( $\text{g/cm}^2$ )

|        |   | ความเร็ว<br>200rpm |        | ความเร็ว 300<br>rpm |            |
|--------|---|--------------------|--------|---------------------|------------|
|        |   | #800               | #1000  | #800                | #1000      |
| K      | 1 | 0.0249             | 0.0461 | 0.032<br>8          | 0.027<br>5 |
|        | 2 | 0.0236             | 0.0399 | 0.033<br>6          | 0.026<br>5 |
|        | 3 | 0.0248             | 0.0425 | 0.034<br>5          | 0.026<br>8 |
|        | 4 | 0.0237             | 0.0442 | 0.033<br>8          | 0.027<br>2 |
| เฉลี่ย |   | 0.024-             | 0.0432 | 0.033               | 0.0270     |
| S      | 1 | 0.0111             | 0.0126 | 0.016<br>6          | 0.019<br>2 |
|        | 2 | 0.0106             | 0.0118 | 0.015<br>7          | 0.0168     |
|        | 3 | 0.0124             | 0.0115 | 0.015<br>6          | 0.0183     |

|        |   |             |        |            |            |
|--------|---|-------------|--------|------------|------------|
|        | 4 | 0.0113      | 0.0114 | 0.016<br>8 | 0.0179     |
| เฉลี่ย |   | 0.0114      | 0.0118 | 0.016<br>2 | 0.018<br>1 |
| P      | 1 | 0.0108      | 0.0118 | 0.015<br>7 | 0.016      |
|        | 2 | 0.0119      | 0.0114 | 0.015<br>3 | 0.0178     |
|        | 3 | 0.0113      | 0.0138 | 0.015<br>6 | 0.0165     |
|        | 4 | 0.0115      | 0.0125 | 0.014<br>6 | 0.017<br>3 |
| เฉลี่ย |   | 0.0113<br>8 | 0.0114 | 0.015<br>3 | 0.0169     |



**ภาพที่ 10** เปรียบเทียบน้ำหนักที่ลดลงในการทดสอบ

### 3.4 การทดสอบสมรรถนะการใช้งาน

การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการใช้งานของมีดแต่ละยี่ห้อ ทดสอบโดยการนำมีดแต่ละยี่ห้อไปใช้งานจริง โดยกำหนดให้สภาวะการทดสอบคือสภาพพื้นดิน ความหนาแน่นของอ้อย เท่ากันในทุกการทดสอบ ซึ่งการทดสอบครั้งนี้ทำในเขตพื้นที่ อำเภอกอนสาร จังหวัดชัยภูมิ ฤดูกาลผลิต 2563/64 รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 5 – 7

ตารางที่ 5 มิตยี่ห้อ K ตัดอ้อยได้จำนวน 751 ต้น

| No.    | น้ำหนัก (g) |       |       |          |
|--------|-------------|-------|-------|----------|
|        | ก่อน        | หลัง  | ลดลง  | ลดลง/ต้น |
| 1      | 616         | 472   | 144   | 0.1917   |
| 2      | 616         | 472   | 144   | 0.1917   |
| 3      | 616         | 459   | 157   | 0.2091   |
| 4      | 621         | 460   | 161   | 0.2144   |
| 5      | 599         | 474   | 125   | 0.1664   |
| 6      | 623         | 469   | 154   | 0.2051   |
| 7      | 614         | 447   | 167   | 0.2224   |
| 8      | 631         | 476   | 155   | 0.2064   |
| 9      | 609         | 465   | 144   | 0.1917   |
| 10     | 614         | 459   | 155   | 0.2064   |
| เฉลี่ย | 615.9       | 465.3 | 150.6 | 0.2005   |

ตารางที่ 7 มิตยี่ห้อ P ตัดอ้อยได้ 730.4 ต้น

| No.    | น้ำหนัก (g) |       |       |          |
|--------|-------------|-------|-------|----------|
|        | ก่อน        | หลัง  | ลดลง  | ลดลง/ต้น |
| 1      | 647         | 508   | 139   | 0.1903   |
| 2      | 616         | 506   | 110   | 0.1506   |
| 3      | 629         | 507   | 122   | 0.1670   |
| 4      | 624         | 478   | 146   | 0.1999   |
| 5      | 624         | 509   | 115   | 0.1574   |
| 6      | 633         | 514   | 119   | 0.1629   |
| 7      | 633         | 489   | 144   | 0.1972   |
| 8      | 632         | 503   | 129   | 0.1766   |
| 9      | 624         | 517   | 107   | 0.1465   |
| 10     | 628         | 493   | 135   | 0.1848   |
| เฉลี่ย | 629         | 502.4 | 126.6 | 0.1733   |

ตารางที่ 6 มิตยี่ห้อ S ตัดอ้อยได้ 654 ต้น

| No.    | น้ำหนัก (g) |       |       |          |
|--------|-------------|-------|-------|----------|
|        | ก่อน        | หลัง  | ลดลง  | ลดลง/ต้น |
| 1      | 694         | 590   | 104   | 0.1590   |
| 2      | 694         | 578   | 116   | 0.1774   |
| 3      | 689         | 595   | 94    | 0.1437   |
| 4      | 689         | 599   | 90    | 0.1376   |
| 5      | 695         | 595   | 100   | 0.1529   |
| 6      | 695         | 579   | 116   | 0.1774   |
| 7      | 695         | 577   | 118   | 0.1804   |
| 8      | 695         | 564   | 131   | 0.2003   |
| 9      | 685         | 565   | 120   | 0.1835   |
| 10     | 690         | 570   | 120   | 0.1835   |
| เฉลี่ย | 692.1       | 581.2 | 110.9 | 0.1696   |

#### 4.อภิปรายผล

จากผลของการศึกษาพบว่า เหล็กที่ใช้ทำมีดตัดโคนอ้อยของต่างประเทศนั้น มีองค์ประกอบของธาตุต่าง ๆ อยู่ในระดับใกล้เคียงกัน ทุกยี่ห้อจัดอยู่ในกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.2 – 0.5 % [8] ซึ่งในกลุ่มนี้เหมาะกับการใช้เป็นอะไหล่ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล หากเทียบเคียงกับเหล็กเกรดมาตรฐานทั่วไป พบว่ามีองค์ประกอบใกล้เคียงกับเหล็ก S45C (JIS G4015) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาธาตุที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญคือ Si และ Mn แล้วพบว่า Mn มีสัดส่วนใกล้เคียงกับเหล็ก S45C (0.6 – 0.9 %) แต่ Si ที่พบมีสัดส่วนที่สูงกว่า S45C ค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงพิจารณาเหล็กในกลุ่มที่มีซิลิกอน เป็นองค์ประกอบในระดับ 1.8 – 2.2 % พบว่าเหล็กเกรด SAE 9255 (JIS: SUP6, GB: 55Si2Mn) และเหล็กในกลุ่มเหล็กสปริง เช่น SAE 9260, 9262, SUP6, SUP7 หรือ DIN : 60 Si7, GB: 60Si2Mn เป็นเหล็กที่มีซิลิกอนอยู่ในช่วงดังกล่าว ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า วัสดุที่นำมาใช้ทำมีดนั้น เป็นเหล็กในกลุ่มเหล็กสปริง เกรดมาตรฐานคือ SAE926 หรือเกรด SUP6, SUP7 ที่เป็นเกรดมาตรฐานของญี่ปุ่น

เมื่อพิจารณาถึงขั้นตอนการผลิต โดยเริ่มพิจารณาจากผิวของมิตแต่ละยี่ห้อพบว่า แต่ละยี่ห้อจะมีสีด้าและมีคราบสนิมเกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่ามิตแต่ละยี่ห้อผ่านกระบวนการทางความร้อนมาแล้ว คือผ่านกระบวนการอบชุบ (Quenching) และอบคืนตัว (Tempering) มาแล้วสังเกตได้จากค่าความแข็งที่อยู่ในระดับสูง และค่าความทนทานไม่สูงมากนัก เมื่อผ่านกระบวนการอบชุบและอบคืนตัวมาแล้ว เมื่อนำไปส่องดูโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ ต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนโครงสร้างที่มาจากกระบวนการทางความร้อนด้วย จากลักษณะของโครงสร้างที่พบ ของมิตยี่ห้อ “S” และ “K” จะมีโครงสร้างแบบ Pearlite + Ferrite ส่วนยี่ห้อ “P” มีโครงสร้างเป็นแบบ Bainite แสดงให้เห็นว่า ในขั้นตอนของการอบชุบ ยี่ห้อ “S” และ “K” อัตราการเย็นตัวจะช้ากว่ายี่ห้อ “P” การเย็นตัวที่ช้ากว่าเนื่องมาจากความต้องการของผู้ผลิต หรืออาจเกิดจากขั้นตอนของการผลิตก็ได้ ตัวอย่างเช่นกระบวนการผลิตที่มีการเคลื่อนย้ายชิ้นงานก่อนที่จะจุ่มลงในสารชุบแข็ง มีระยะที่ห่างมากกว่าจะทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานลดลงอย่างช้าๆ เพราะในช่วงของการเคลื่อนย้ายชิ้นงาน การถ่ายเทความร้อนจากตัวมิตออกไปสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกโดยมีอากาศเป็นตัวกลางนั้นถือว่ามิตอัตราการเย็นตัวช้า หรือการชุบที่มีการจุ่มเฉพาะบริเวณคมของมิตแล้วยกขึ้น เพื่อปล่อยให้เกิดการถ่ายเทอุณหภูมิจากส่วนที่ยังร้อนกลับมายังคมมิต และมีไอน้ำล้อมรอบคมมิตก็ถือว่าการเย็นตัวช้าเช่นกัน [9] อย่างไรก็ตามทั้งสามยี่ห้อ ไม่มีโครงสร้างแบบ Martensitic ซึ่งเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วแสดงให้เห็นว่าการอบชุบนั้นน่าจะเป็นการชุบแบบพ่นน้ำ หรือการชุบเฉพาะคมตัด

ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งของใบมีดแต่ละยี่ห้อพบว่าค่าความแข็งของยี่ห้อ “P”, “S” และ “K” มีค่าเป็น 46.33, 47.17 และ 44.5 HRC ตามลำดับ เมื่อทดสอบค่าความแตกต่างโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA) พบว่า  $p\text{-value} = 0.007$  ซึ่งต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ (0.05) หมายความว่าค่าความแข็งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 (รายละเอียดดังตารางที่ 8)

| SOV   | SS      | df | MS      | F       | P      |
|-------|---------|----|---------|---------|--------|
| A     | 0.00340 | 2  | 0.00170 | 1627.14 | <0.001 |
| B     | 0.00005 | 1  | 0.00005 | 51.83   | <0.001 |
| C     | 0.00010 | 1  | 0.00010 | 94.33   | <0.001 |
| AB    | 0.00018 | 2  | 0.00009 | 88.42   | <0.001 |
| AC    | 0.00006 | 2  | 0.00003 | 30.48   | <0.001 |
| BC    | 0.00019 | 1  | 0.00009 | 88.79   | <0.001 |
| ABC   | 0.00047 | 2  | 0.00024 | 225.76  | <0.001 |
| Error | 0.00047 | 36 | 0.00024 | 225.76  |        |
| Total | 0.00450 | 47 |         |         |        |

ตารางที่ 8 ความแปรปรวนของค่าความแข็ง

| SOV            | SS     | df | MS    | F    | P-value |
|----------------|--------|----|-------|------|---------|
| Between Groups | 31.06  | 2  | 15.53 | 5.87 | 0.007   |
| Within Groups  | 87.25  | 33 | 2.64  |      |         |
| Total          | 118.31 | 35 |       |      |         |

ในกรณีค่าความทนทาน (Toughness) โดยทดสอบความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกนั้น ผลปรากฏว่ามิตยี่ห้อ “P”, “S” และ “K” มีค่าเฉลี่ยการดูดซับแรงกระแทกเท่ากับ 7.75, 7.7 และ 8.25J ตามลำดับ เมื่อทดสอบค่าความแตกต่างทางสถิติ โดยการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน พบว่า ค่า  $p\text{-value}$  เท่ากับ 0.214 สูงกว่าค่านัยสำคัญ (0.05) หมายความว่าค่าความทนทานเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 ความแปรปรวนของค่าความทนทาน

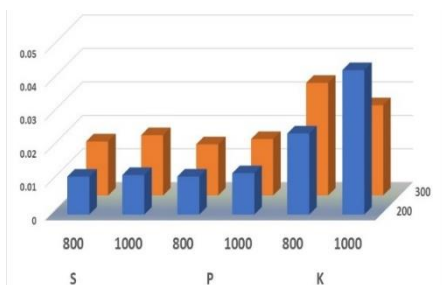
| SOV            | SS   | df | MS   | F    | P-value |
|----------------|------|----|------|------|---------|
| Between Groups | 0.67 | 2  | 0.33 | 2.66 | 0.124   |
| Within Groups  | 1.13 | 9  | 0.13 |      |         |
| Total          | 1.80 | 11 |      |      |         |

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานการสึกหรอที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าการสึกหรอแตกต่างกันทั้งในกรณีที่กระดาษทรายามีความละเอียดแตกต่างกัน และกรณีที่ใช้ความเร็วรอบแตกต่างกัน ในการทดลองครั้งนี้เป็นการออกแบบการทดลองชนิดแฟกทอเรียลทั่วไป (General factorial) มีปัจจัยการทดลอง 3 ปัจจัย ปัจจัย A คือยี่ห้อของมิต มี 3 ระดับคือ S, P, K

ปัจจัย B คือความเร็วรอบ มี 2 ระดับคือ 200 และ 300 รอบต่อนาที และปัจจัย C ได้แก่ความละเอียดของกระดาษทราย มี 2 ระดับ คือ 800 และ 1000 ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าสถิติทดสอบของยี่ห้อของมิด  $F_{2,36} = 1627.14$ ,  $p\text{-value} = <0.001$  ความเร็วรอบ  $F_{1,36} = 51.83$ ,  $p\text{-value} = <0.001$  และกระดาษทราย  $F_{1,36} = 94.33$ ,  $p\text{-value} = <0.001$  หมายถึงความหมาย ยี่ห้อของมิด ความเร็วรอบ และกระดาษทราย มีอิทธิพลต่อการสึกหรอทั้งสิ้น โดยทำให้การลดลงของน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และปัจจัยรวมก็มีอิทธิพลต่อการลดลงของน้ำหนักของชิ้นงานหรือการสึกหรอของชิ้นงานเช่นเดียว

ตารางที่ 10 ความแปรปรวนของปัจจัยต่าง

| SOV   | SS      | DF | MS      | F       | P      |
|-------|---------|----|---------|---------|--------|
| A     | 0.00340 | 2  | 0.00170 | 1627.14 | <0.001 |
| B     | 0.00005 | 1  | 0.00005 | 51.83   | <0.001 |
| C     | 0.00010 | 1  | 0.00010 | 94.33   | <0.001 |
| AB    | 0.00018 | 2  | 0.00009 | 88.42   | <0.001 |
| AC    | 0.00006 | 2  | 0.00003 | 30.48   | <0.001 |
| BC    | 0.00019 | 1  | 0.00009 | 88.79   | <0.001 |
| ABC   | 0.00047 | 2  | 0.00024 | 225.76  | <0.001 |
| Error | 0.00047 | 36 | 0.00013 |         |        |
| Total | 0.00450 | 47 |         |         |        |

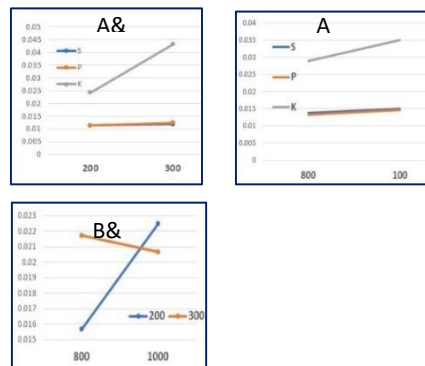


ภาพที่ 11 กราฟแสดงน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน

จากภาพที่ 11 พบว่า น้ำหนักที่หายไปของมิด ยี่ห้อ S และยี่ห้อ P มีค่าใกล้เคียงกันและต่ำกว่ายี่ห้อ K การสึกหรอจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการทดสอบเพิ่มขึ้นและค่าความละเอียดของกระดาษทรายก็ทำให้การสึกหรอแตกต่างกันในทุกชนิดของวัสดุและในทุกความเร็วรอบของการทดสอบ ซึ่งทำให้ค่าสถิติทดสอบมีความแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม AB (ยี่ห้อของมิดกับความเร็วรอบ) พบว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น น้ำหนักที่ลดลงของมิด มีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น โดยน้ำหนักที่ลดลงของมิดยี่ห้อ S และ P มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ยี่ห้อ K จะมีค่าเฉลี่ยที่แตกต่างจากยี่ห้อ S และ P ในระดับมากซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับพฤติกรรมการสึกหรอทั่วไปที่เมื่อความเร็วของการสัมผัสเพิ่มขึ้นการสึกหรอก็เพิ่มขึ้นด้วยซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการเสียดสีกัน [10]

เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม AC (ยี่ห้อของมิดกับความละเอียดของกระดาษทราย) พบว่า เมื่อกระดาษทรายมีความละเอียดเพิ่มขึ้น การสึกหรอของมิดเพิ่มขึ้นด้วยโดยยี่ห้อ K เป็นยี่ห้อที่มีการสึกหรอสูงกว่ายี่ห้ออื่น



ภาพที่ 12 แสดงอิทธิพลของปัจจัยร่วม

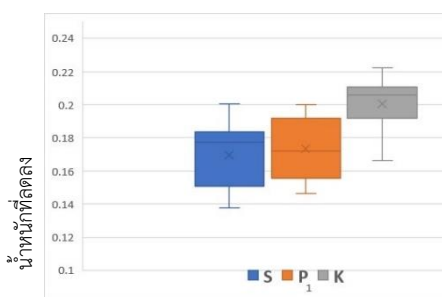
เมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม BC (ความเร็วรอบและความละเอียดของกระดาษทราย) พบว่า เมื่อใช้กระดาษทรายเบอร์ 800 ที่ระดับความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาทีมีการสึกหรอสูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มความละเอียดของกระดาษทรายเป็นเบอร์ 1000 ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีการสึกหรอสูงที่สุด แสดงถึงอิทธิพลของปัจจัยร่วม BC ที่มีต่อการทดลองในครั้งนี้ นอกจากนั้นยังพบว่า กรณีของยี่ห้อ K นั้น มีอิทธิพลร่วมของปัจจัย B (ความเร็วรอบ) และ ปัจจัย C (ความละเอียดของกระดาษทราย) โดยเมื่อเพิ่มความเร็วรอบจาก 200 รอบต่อนาที เป็น 300 รอบต่อนาที และเพิ่มความละเอียดของกระดาษทรายจากเบอร์ 800 เป็นเบอร์ 1000 จะทำให้การสึกหรอลดลง อย่างไรก็ตาม

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยร่วมกับยี่ห้ออื่นๆ แนวโน้มแล้วพบว่าไปในทิศทางเดียวกัน คือ ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น น้ำหนักที่ลดลงมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้ค่า  $p$  - value ของปัจจัยร่วมมีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญในทุกกรณี

เมื่อนำไปทดสอบใช้งานจริงในพื้นที่จังหวัดชัยภูมิ พบว่า ค่าการสึกหรอหรือน้ำหนักที่ลดลงต่อตันอ้อยของมิตแต่ละยี่ห้อมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ( $F_{2,27} = 8.35$ ,  $p$ -value = 0.001) และเมื่อพิจารณารายยี่ห้อพบว่ายี่ห้อ “S” มีค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่ลดลง หรือ การสึกหรอต่ำที่สุด รองลงมาได้แก่ยี่ห้อ “P” และ “K” ตามลำดับ (ตารางที่ 10 และภาพที่ 13)

ตารางที่ 11 ความแปรปรวนของสมรรถนะของมิต

| SOV            | SS     | DF | MS     | F     | P-value |
|----------------|--------|----|--------|-------|---------|
| Between Groups | 0.0057 | 2  | 0.0029 | 8.350 | 1       |
| Within Groups  | 0.0092 | 27 | 0.0003 |       |         |
| Total          | 0.0149 | 29 |        |       |         |



ภาพที่ 13 ค่าเฉลี่ยการสึกหรอต่อการตัดอ้อย 1 ตัน

จากผลของการทดสอบใช้งานจริงนี้พบว่า มีความสอดคล้องกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ยี่ห้อ K มีอัตราการสึกหรอสูงสุด ส่วนยี่ห้อ S และ P นั้นไม่มีความแตกต่างกัน การที่ยี่ห้อ K มีการสึกหรอสูงสุคนี้อาจเป็นผลของค่าความแข็งที่ต่ำกว่ายี่ห้ออื่น ทำให้เมื่อเกิดการเสียดสี อนุภาคของชิ้นงานสามารถหลุดออกได้

เร็วกว่า [11] ทำให้การสึกหรอสูงกว่ามิตยี่ห้ออื่นที่มีความแข็งสูงกว่า และสาเหตุที่ยี่ห้อ K ไม่เพิ่มความแข็งขึ้นมากกว่านี้ เพราะหากเพิ่มความแข็งโดยการเพิ่มส่วนผสมที่เป็นแมงกานีสสูงถึง 2% จะทำให้มิตมีความเปราะสูงมาก จนไม่สามารถใช้งานได้ [12]

## 5. สรุป

จากการใช้วิศวกรรมย้อนรอยเพื่อศึกษาข้อมูลของมิตตัดโคนอ้อยที่ผลิตโดยบริษัทต่างประเทศ เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการเลือกใช้วัสดุและ กรรมวิธีการผลิตในประเทศ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีมากยิ่งขึ้นพบว่า วัสดุที่ใช้ในการผลิตนั้นสามารถเทียบได้กับเหล็กเกรดมาตรฐาน SAE 9260, 9262, (JIS :SUP6, SUP7) ซึ่งเหล็กในเกรดดังกล่าวเป็นเหล็กสปริง ที่นิยมนำมาใช้ผลิตเครื่องมือ และผลิตเป็นแท่นรถยนต์ เพราะเสียดคล้องกับการใช้งานโดยทั่วไป ที่นิยมนำเหล็กแท่นมาใช้ในการผลิตมิต ค่าความแข็งและความทนทานของเหล็กในกลุ่มเหล็กสปริงนี้ เนื่องมาจากเพราะอิทธิพลของธาตุแมงกานีสโดยเหล็กที่มีส่วนผสมแมงกานีสเพิ่มขึ้น 1 % จะทำให้ความเค้นแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น 100 นิวตัน/มม.<sup>2</sup> และองค์ประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือซิลิกอนทำให้เหล็กมีความแข็งแรงทนต่อการเสียดสี เพิ่มค่าแรงดึง (Yield strength) ให้สูงขึ้นด้วย

จากการพิจารณาการสึกหรอจากใช้งานเทียบกับโครงสร้างของมิตแต่ละยี่ห้อพบว่า มิตยี่ห้อ “S” มีอัตราการสึกหรอต่ำที่สุด มีโครงสร้างผลึกที่ผ่านเป็นแบบ Ferrite + Pearlite ซึ่งเป็นผลมาจากการเย็นตัวในขั้นตอนของการชุบเป็นไปแบบช้า ๆ เช่นการชุบเฉพาะคมตัด หรือเป็นการฉีดยาน้ำหรือสารชุบ ไม่ใช้การจุ่ม แต่ในกรณีของยี่ห้อ “P” มีโครงสร้างเป็นแบบ Bainite ซึ่งโครงสร้างแบบนี้เกิดจากอัตราการเย็นตัวที่รวดเร็ว เป็นไปได้ว่า ในขั้นตอนของการชุบจะเป็นการจุ่ม หรือการฉีดยาน้ำในปริมาณมากผลิตในประเทศ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีมากยิ่งขึ้น พบว่า วัสดุที่ใช้ในการผลิตนั้นสามารถเทียบได้กับเหล็กเกรดมาตรฐาน SAE 9260, 9262, (JIS :SUP6, SUP7) ซึ่งเหล็กใน

เกรตดังกล่าวเป็นเหล็กสปริง ที่นิยมนำมาใช้ผลิตเครื่องมือ และผลิตเป็นแหวนรถยนต์ เพราะเหล็กในกลุ่มดังกล่าว มีความทนต่อแรงกระแทก ยืดหยุ่นได้ดี และต้านทานการสึกหรอได้ดี

## 6.เอกสารอ้างอิง

- [1] ชัยวัฒน์ เชาว์เจริญสุข. แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2564-2566 :อุตสาหกรรมน้ำตาล.(ออนไลน์) เข้าถึงเมื่อ 3 กุมภาพันธ์ 2565. จาก<https://www.krungsri.com/th/research/industry/industryoutlook/Agriculture/Sugar/IO/io-sugar-21>
- [2] กรุงเทพธุรกิจ.[อินเทอร์เน็ต]. สมาคมชาวไร่ อ้อย ร้องขอรับคนต่างด้าว แก้ววิกฤตขาดแคลนแรงงาน. เข้าถึงเมื่อ 30 มกราคม 2565. จาก <https://www.bangkokbiznews.com/news/984815>.
- [3] สุภาวดี เนินคณา. อ้อยโรงงาน. กลุ่มส่งเสริมการผลิตพืชไร่อุตสาหกรรม. เข้าถึงเมื่อ 30 มกราคม 2565. จาก [Http://www.agriman.doae.go.th](http://www.agriman.doae.go.th)
- [4] วิศรุต ภัคดิพันธ์, ชัชวาล สิริเจริญชัย, วีรวัฒน์ ทวีสกุลรัตน์ และเกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย. ศึกษาความเป็นไปได้ของการให้โทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ เป็นเครื่องมือวัดพิทัก 3 มิติ. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2555 17-19 ตุลาคม 2555 ชะอำ เพชรบุรี
- [5] Meyers Marc A, Chawla Krishan Kumar. Mechanical Behaviors of Materials. Prentice Hall. New Jersey, U.S.A. (1998).
- [6] ASTM G99-95, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin- on- Disk Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- [7] S.N. Ojha. Microstructure Evolution and Origin of Surface Cracks Induced During Processing of Micro alloyed Steels. Proceedings of the 4th International Conference on Thermo- mechanical Simulation and Processing of Steels (SimPro '16), 10- 12 February 2016 : Ranchi, India.
- [8] Sylvester O. Omole , Akinlabi Oyetunji , Kenneth K. Alaneme and Peter A. Olubambi. Structural characterization and mechanical properties of pearlite – Enhanced micro- alloyed ductile irons. Journal of King Saud University – Engineering Sciences 32 (2020) 205–210.
- [9] ธาณี ทุมประเสน. การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุต่างชนิดกันที่เชื่อมด้วยวิธีเสียดทาน. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2556.
- [10] Siam Global Lubricant, Co., Ltd. ลักษณะการเย็นตัวของ เหล็กชุบแข็ง ใน ของเหลว. [online] เข้าถึงเมื่อ 12 เมษายน 2565 จาก <http://www.sgl1.com/index.php?lay=show&ac=article&id=539373950>
- [11] Odabas D. Effects of Load and Speed on Wear Rate of Abrasive Wear for 2014 Al Alloy.IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 295 (2018) 012008
- [12] Mahesh, Vishwanath Koti, Kalyan Kumar Singh, Rabesh Kumar Singh.Experimental and statistical investigation on the wear and hardness behaviour of multiwalled carbon nanotubes reinforced copper nanocomposites, Wear, Volumes 500–501,202

- [13] ฉลอง ดอกยี่สุน, วชิราวุธ หอมทรัพย์.  
มาตรฐานเหล็กในงานอุตสาหกรรม.[online]  
เข้าถึงเมื่อ 12 เมษายน 2565 จาก  
[http://www.rtc.ac.th/www\\_km/02/027/  
225602/unit01.pp](http://www.rtc.ac.th/www_km/02/027/225602/unit01.pp)

## การเปรียบเทียบอิเล็กโทรดด้วยกระบวนการกัดเซาะไฟฟ้ากับวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ Comparative investigation of electrodes using by Electrical discharge machining on tungsten carbide

รัตติกรณ์ เสาร์แดน<sup>1\*</sup>, ไพบุณย์ หาญมนต์<sup>2\*</sup>  
Rattikorn Saodaen<sup>1\*</sup>, Phiboon Harnmont<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

<sup>1</sup>Department of Mechanical and Industrial Engineering,  
Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok Thailand 10120

\*Corresponding Author: E-mail: Rattikorn.s@mail.rmutk.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบวัสดุผงเพื่อผลิตอิเล็กโทรดต่างชนิดที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปโลหะผงและใช้กระบวนการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งวัสดุอิเล็กโทรด 3 ชนิด ประกอบด้วยวัสดุอิเล็กโทรดทองแดง วัสดุอิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมไนไตรด์ (Cu-TiN) และวัสดุอิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมคาร์ไบด์ (Cu-TiCN) วัสดุอิเล็กโทรดทั้งหมดถูกนำไปผ่านกระบวนการอบเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1050 °C ผลการทดลองสปาร์คจากการปรับพารามิเตอร์โดยใช้กระแสไฟฟ้า พบว่าแต่ละกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน โดยการทดลองสปาร์คชิ้นงานวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์เริ่มต้นจากค่ากระแสไฟฟ้าที่ 9, 15 และ 25 แอมป์ ซึ่งที่กระแสไฟฟ้าที่ 9 แอมป์ ให้ค่าความเรียบของผิวเฉลี่ยดีที่สุด ซึ่งทำให้ได้ค่าอัตราการกำจัดเนื้องานมากที่สุดของวัสดุอิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมไนไตรด์ (Cu-TiN) อยู่ที่ 0.0047 g/min และส่งผลให้ค่าการสึกหรออิเล็กโทรดน้อยที่สุดอยู่ที่ 33.72% จากผลการทดลองของค่าความเรียบของผิวละเอียดสุดอยู่ที่ อยู่ที่ 9.76 µm

**คำสำคัญ:** อีดีเอ็ม ,อิเล็กโทรด, ทังสเตนคาร์ไบด์,วัสดุผง

### ABSTRACT

The aim of work is to compare powder materials for producing different types of electrodes processed by powder metallurgy and electrophoretic erosion processes. The three types of electrode materials consist of Copper (Cu) electrode materials, copper-titanium nitride (Cu-TiN) electrode material, and copper-titanium carbonitride (Cu-TiCN) electrode material were all samples into a sintering process at 1050 °C. Experiment results by adjusting the current parameters found that only the electric current affects the work efficiency and surface quality of the samples. This experiment spark with tungsten carbide was started with a current of 9, 15 and 25 Amp. Using 9 Amp gave the lowest average surface roughness resulting in a maximum removal rate of 0.0047 g/min of copper-titanium nitride (Cu-TiN) electrode material, and highest

Received 25-10-2022

Revised 19-12-2022

Accepted 21-12-2022

the electrode wear rate. The lowest surface roughness was 33.72%, as well as the results of the surface roughness experiment to obtain the lowest mean surface roughness of 9.76  $\mu\text{m}$ .

**Keyword:** EDM, electrode, tungsten carbide, powder materials.

## 1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตงานแม่พิมพ์ระดับสูง จำเป็นต้องอาศัยสมบัติของวัสดุแม่พิมพ์ที่มีความแข็งแรงสูง อีกทั้งมีความสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีในสภาวะการทำงานแบบซ้ำๆ ภายใต้อุณหภูมิสูง แต่อย่างไรก็ตามแบบของแม่พิมพ์ในแต่ละแบบ แต่ละประเภท เช่น แม่พิมพ์พลาสติกและแม่พิมพ์โลหะ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการแปรรูปวัสดุขึ้นงานให้ได้ขนาดรูปร่างขึ้นงานตามแบบที่กำหนด ทั้งในการแปรรูปขึ้นส่วนแม่พิมพ์ที่มีสมบัติค่าความแข็งแรงสูง ไม่สามารถแปรรูปได้ด้วยกรรมวิธีทางกล ดังนั้นจึงต้องอาศัยกรรมวิธีพิเศษที่เรียกว่า EDM : Electrical discharge machine [1-2] ถูกนำมาใช้ช่วยในกระบวนการแปรรูปวัสดุขึ้นงานที่มีความแข็งแรงสูง สามารถแก้ไขหรือผลิตรูปทรงที่ยุ้งยากซับซ้อนต่อการขึ้นรูปด้วยกระบวนการแปรรูปโดยอาศัยหลักการทำงานของกระบวนการทางความร้อนที่เกิดจากการใช้ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าส่งผ่านวัสดุตัวนำที่เรียกว่า “Tool Electrode” ทำให้เกิดการหลอมละลายของเนื้อโลหะออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กภายใต้ของเหลวที่เรียกว่าสาร “Dielectric Fluid” ลักษณะการหลอมละลายของเนื้อโลหะจะเกิดขึ้นในบริเวณที่เล็กมากๆ ทำให้สามารถควบคุมลักษณะผิวขึ้นงานและรูปทรงของขึ้นงานที่ถูกขจัดออกมีลักษณะเหมือนกับรูปทรงอิเล็กโทรด (Electrode) [3-4] ซึ่งผลการแปรรูปด้วยกรรมวิธีดังกล่าวสามารถประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการ Electrical discharge machining ได้โดยรูปแบบของการประเมินจากอัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด และความหยาบผิวงานของขึ้นงานที่ได้ ทั้งนี้ผลลัพธ์ของประสิทธิภาพที่ได้ขึ้นอยู่กับการปรับค่าพารามิเตอร์การแปรรูปที่เหมาะสมและสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่ง คือ คุณภาพของวัสดุอิเล็กโทรดมีความสำคัญมากเพราะจัดเป็น

เครื่องมือตัดพิเศษที่จะช่วยการแปรรูปให้เกิดประสิทธิภาพ โดยทั่วไปวัสดุอิเล็กโทรดจะต้องนำไฟฟ้า โดยการยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ดี ส่วนมากจะผลิตจากวัสดุทองแดงหรือกราไฟต์ อย่างไรก็ตามในการแปรรูปวัสดุผสมทั้งสแตนคาร์ไบด์ส่วนใหญ่มีความแข็งแรงและมีจุดหลอมละลายสูง นิยมนำมาผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปร้อน ซึ่งด้วยสมบัติพิเศษส่งผลทำให้ขึ้นรูปได้ยาก จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาวิจัยเปรียบเทียบการเลือกใช้วัสดุอิเล็กโทรดเพื่อหาประสิทธิภาพการแปรรูป/ขึ้นรูป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยวัสดุอิเล็กโทรดที่มีสมบัติใกล้เคียงกันและสามารถนำไฟฟ้าได้ดีอีกด้วย ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการแปรรูปของวัสดุดังกล่าว ผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญถึงปัจจัยการศึกษาประสิทธิภาพอิเล็กโทรดต่างชนิดเพื่อนำมาเปรียบเทียบให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีต่อกระบวนการแปรรูปเพื่อนำไปผลิตแม่พิมพ์ที่ดีและมีคุณภาพ โดยในการศึกษาวิจัยบทความฉบับนี้ได้พิจารณาวัสดุอิเล็กโทรด 3 ชนิด เช่น วัสดุอิเล็กโทรดทองแดง (Cu) วัสดุอิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมไนไตรด์ (Cu-TiN) และวัสดุอิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (Cu-TiCN) ที่ผ่านกระบวนการอัดผงทางโลหะวิทยาและเผาอบจนเกิดมาดำเนินการใช้ในทดลองครั้งนี้เพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัสดุอิเล็กโทรดที่เหมาะสมต่อไป

## 2. วัสดุขึ้นงานและวิธีการทดลอง

### 2.1 วัสดุขึ้นงาน

วัสดุขึ้นงานทดลองเป็นทั้งสแตนคาร์ไบด์เกรด WC-Co (90/10) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร โดยวัสดุขึ้นงานดังกล่าวนิยมใช้ผลิตแม่พิมพ์งานร้อน ดังแสดงสมบัติตารางที่ 1 ทั้งนี้วัสดุขึ้นงานทดลองจะถูกจัดเตรียมด้วยเครื่อง

ตัดด้วยลวดไฟฟ้า (WEDM : wire electrical discharge machining) ยี่ห้อ Aristech Model 3D CNC430 ของประเทศไต้หวัน และวัสดุอิเล็กโทรดที่นำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการแปรรูปคือ วัสดุอิเล็กโทรดทองแดงอัดผง (Cu (100%) วัสดุอิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมอัดผง (Cu –TiN) ที่อัดผงขึ้นรูปที่สัดส่วนผสม (Cu 80%, Ni 3%, TiN 17%) และวัสดุอิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมคาร์โบไนไตรด์ (Cu –TiCN) ที่อัดผงขึ้นรูปที่สัดส่วนผสม (Cu 90%, Ni 3%, TiN 7%) ให้มีขนาดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ขนาด 20x20x50 มิลลิเมตร และผ่านกระบวนการกรรมวิธีการอัดผงโลหะวิทยาภายใต้แรงอัดขึ้นรูปแบบกรีนค

อมแพค (Green compact) ที่แรงกดอัด 200 MPa และทำการอบเผาผนึก (Sintering process) ด้วยอุณหภูมิ 1,050°C และปล่อยให้เย็นตัวภายในเตาตามลำดับ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการ sintering นำมาผ่านกระบวนการ Machining เพื่อกลึงชิ้นงานให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร ความยาว 48 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องกลึง CNC Lathe ยี่ห้อ EMCO model PC TURN50 จากประเทศ Austria โดยใช้อากาศเป็นสารหล่อลื่น เพื่อให้ได้ขนาดวัสดุอิเล็กโทรดเป็นไปตามแบบเงื่อนไขการทดลองที่กำหนดดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 วัสดุชิ้นงานและวัสดุอิเล็กโทรด

## 2.2 การดำเนินการทดลอง

สำหรับตัวแปรพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าด้วยวัสดุอิเล็กโทรดต่างชนิดกันจะประกอบไปด้วย ค่าพารามิเตอร์ของเวลาเปิด (On time) เวลาปิด (Off time) กระแสไฟฟ้า (Current) และขั้วอิเล็กโทรด (Polarity) โดยสามารถประเมินจากการแปรรูปการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าได้ประกอบด้วยอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR: Material Removal Rate) อัตราการสึกหรออิเล็กโทรด (EWR: Electrode Wear Ratio) และลักษณะผิวชิ้นงาน (Quality Surface) ในรูปแบบของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra: Roughness Average) ตามลำดับ แต่สำหรับการทดลองการกัดเซาะด้วยไฟฟ้าบนวัสดุชิ้นงานเป็นหลุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร ในแต่ละ

เงื่อนไขการทดลอง ภายใต้สารฟลูอิดไดอิเล็กตริก (Dielectric fluid Shell Fluid 2 A) เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงจรในขณะที่ทำการตัดเฉือนของชิ้นงาน ทำโดยใช้อัตราการของกระแสไหลวนภายในอ่างที่แรงดัน 1 kg/cm<sup>2</sup> และอัตราการไหล (flow rate) 15 l/min โดยในการทดลองนี้จะกำหนดพารามิเตอร์ของการทดลองค่าระดับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ใน 3 ระดับ คือ กระแสไฟฟ้าที่ 9, 15 and 25 Amp และการกำหนดปัจจัยประสิทธิภาพ Duty factor 50 % (On-Time 12  $\mu$ s Off-time 12  $\mu$ s) เป็นค่าคงที่ ซึ่งการทดลองปรับค่ากระแสไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความเรียบผิวเฉลี่ยในแต่ละระดับกระแสไฟฟ้าที่กำหนดไว้ จากการนำผลที่ได้จากการทดลองพารามิเตอร์การปรับค่ากระแสไฟฟ้าขั้นต้นที่

เหมาะสมของการทดลองจะถูกนำไปใช้การทดสอบ  
ขั้นตอนต่อไป ซึ่งรายละเอียดการทดลองขั้นต้นใน  
ระดับที่เหมาะสม คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ 9 Amp โดย  
นำไปศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทดลองของ  
วัสดุอิเล็กโทรดทองแดงที่มีส่วนผสมของวัสดุต่างชนิด  
กันไป ดังแสดงรายละเอียดเงื่อนไขการทดลองใน  
ตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2

**ตารางที่ 1** สมบัติกายภาพของวัสดุชิ้นงานทั้งสแตน  
คาร์ไบด์ (WC90-10)

| Properties                    | Tungsten<br>carbide<br>(WC90-10) |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Melting point(°C)             | 2,800                            |
| Density (g.cm <sup>-3</sup> ) | 15.7                             |
| Hardness (HRA)                | 874                              |
| Thermal<br>expansion (°C)     | 5x10 <sup>-6</sup>               |
| Elastic modulus<br>(GPa)      | 648                              |

**ตารางที่ 2** เงื่อนไขการทดลอง

| Parameters                   | Description                                  |
|------------------------------|----------------------------------------------|
| Polarity<br>electrode (+, -) | Negative                                     |
| Voltage(V)                   | 250                                          |
| Current(A)                   | 9, 15, 25                                    |
| Gap(mm)                      | 10                                           |
| Dielectric fluid             | Oil (Shell Fluid 2 A)                        |
| Work piece                   | WC90-10                                      |
| Flushing<br>pressure         | 1 kg/cm <sup>2</sup> , Flow rate<br>15 L/min |

ภายหลังการทดลองผลการแปรรูปการกัดเซาะด้วย  
ไฟฟ้า (EDM) เพื่อหาอัตราการการขจัดเนื้องาน  
(Material Removal Rate) ซึ่งได้จากการประเมินผล  
จากปริมาตรที่สึกหรอต่อหน่วยเวลาที่ใช้ในการแปรรูป  
จะทำการเก็บค่าของข้อมูลได้จากขนาดเส้นผ่าน  
ศูนย์กลางอิเล็กโทรดและค่าความยาวอิเล็กโทรด  
(Diameter and length electrode) และค่าความ  
ลึกที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานด้วยเครื่องมือวัด  
ไมโครมิเตอร์ที่ระดับค่าความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร  
(ค่าความลึกที่เกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานเท่ากับความหนา  
ของชิ้นงานก่อนสปาร์กกลับด้วยความหนาชิ้นงาน  
ภายหลังการสปาร์ก) พร้อมทั้งบันทึกเวลาในการตัด  
เฉือน (Machining time) จากหน้าจอแสดงผลของ  
เครื่องดังแสดงในภาพที่ 2

- ในการประเมินค่าของอัตราการสึกหรออิเล็กโทรด  
(Electrode wear ratio) เป็นการวัดค่าการสึกหรอ  
ของอิเล็กโทรดต่อความลึกของเนื้อชิ้นงานที่ถูกขจัด  
ออกในกระบวนการแปรรูปกัดเซาะด้วยไฟฟ้าของแต่ละ  
ชนิดวัสดุอิเล็กโทรด และการประเมินลักษณะ  
คุณภาพผิวชิ้นงาน (Quality surface) ในรูปของค่า  
ความเรียบของผิวเฉลี่ย (Ra: Roughness average)  
ภายหลังการสปาร์คแล้วจะนำชิ้นงานมาวัดค่าความ  
เรียบผิวเฉลี่ยของงาน โดยทำให้ชิ้นงานสะอาดด้วย  
สารอะซิโตนแล้วจึงทำการวัดค่าความเรียบของผิว  
เฉลี่ย โดยทำการวัดจำนวน 3 ครั้ง ด้วยเครื่องวัด  
ความหยาบผิวแบบเลเซอร์ 3D ยี่ห้อ Olympus รุ่น  
OLS5000 จากประเทศญี่ปุ่น ที่กำลังขยายที่ 5 เท่า  
ในการวัดด้วยลำแสงเลเซอร์สแกนที่ช่วงความยาว  
2500 μm จากสมการที่ 1

$$MRR = \frac{\pi (\text{รัศมีลวด})^2 \times \text{ค่าความลึกชิ้นงาน (mm}^3/\text{min)}}{\text{เวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงาน (min)}} \quad (1)$$



ภาพที่ 2 การทดลองด้วยเครื่อง Aristech Model 3D-CNC

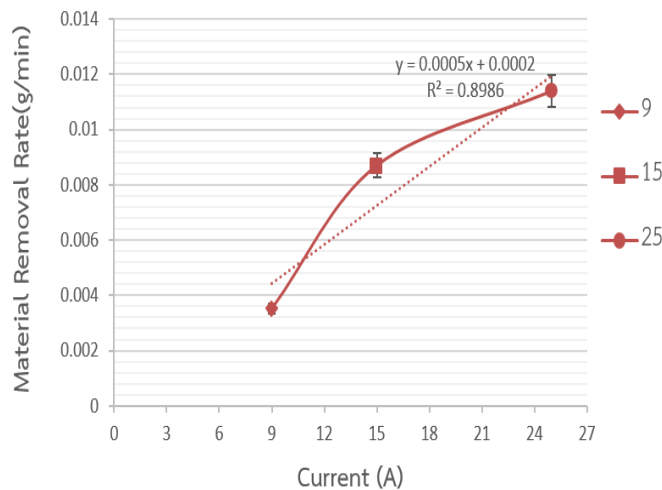
### 3. ผลการวิจัย

ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพอิเล็กโทรดต่างชนิดซึ่งจะประกอบด้วยวัสดุอิเล็กโทรดทองแดง (Cu) ทองแดงไทเทเนียมไนไตรด์ (Cu-TiN) และทองแดงไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (Cu-TiCN) ที่ผ่านกรรมวิธีการขึ้นรูปด้วยวิธีโลหะผง สำหรับกระบวนการกัดเซาะด้วยไฟฟ้า โดยมีค่าพารามิเตอร์ของการปรับค่ากระแสไฟฟ้าเพื่อศึกษาผลกระทบต่อ การแปรรูปวัสดุทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์ (Wc) จากผลกระทบของกระแสที่ใช้จะเป็นต้นกำเนิดของพลังงานความร้อนส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแปรรูปและคุณภาพผิวงานชิ้นงานโดยตรง ซึ่งแสดงผลอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ตลอดจนค่าความเรียบของผิวเฉลี่ยได้ดังนี้

#### 3.1 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยการปรับกระแสไฟฟ้า

1) อัตราการขจัดเนื้องาน (Material removal rate) ผลจากการทดลองปรับค่าระดับกระแสไฟฟ้าสำหรับ

การทดลองจากการพิจารณาเลือกใช้วัสดุอิเล็กโทรดทองแดง ผลทดลองเพื่อหาค่ากระแสที่เหมาะสมโดยปรับระดับกระแสที่ระดับ 9, 15 และ 25 Amp แรงดันไฟฟ้า 250 โวลต์ ปัจจัยประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซนต์ เวลาเปิด 12  $\mu$ s, เวลาปิด 12  $\mu$ s โดยผลการทดลองปรับค่ากระแสไฟฟ้า พบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ความร้อนที่เกิดเพิ่มสูงขึ้นและเกิดกลไกการระเหิดอนุภาคผิวชิ้นงานให้หลุดออกมาอยู่ในรูปของเศษ debris เป็นเหตุผลทำให้เกิดการขจัดเนื้องานเกิดเป็นหลุมลึกที่มีความกว้างเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของอิเล็กโทรด [5-7] โดยการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าต่ออัตราการขจัดเนื้องานมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแปรผันตรงกับค่ากระแสที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังแสดงผลการทดลองดังในภาพที่ 3

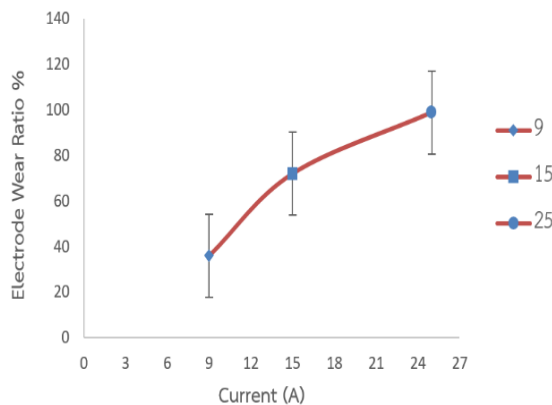


ภาพที่ 3 การทดลองเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่มีผลต่ออัตราการกัดเนื้องานของอิเล็กโทรดทองแดง

## 2) ผลอัตราการสึกหรอแท่งอิเล็กโทรด

ผลการทดลองปรับระดับกระแสไฟฟ้าพบว่า อัตราการสึกหรออิเล็กโทรด (Electrode wear ratio) จะมีเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากอัตรากระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดที่มากขึ้นส่งผลทำให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนที่ก่อกวนทั้งชิ้นงานและวัสดุอิเล็กโทรดเป็นเหตุให้อิเล็กโทรดเกิดการสึกหรอที่รุนแรงตามค่ากระแสไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราการสึกหรอ

อิเล็กโทรดสูงมากขึ้นตามลำดับโดยส่งผลให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดสูงสุด คือ 97.83 เปอร์เซ็นต์ของกระแสไฟฟ้า 25 Amp และกระแสไฟฟ้าที่ 15 Amp ให้อัตราการสึกหรอ 72.03 เปอร์เซ็นต์ โดยวัสดุอิเล็กโทรดชนิดทองแดง ให้ค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลดีที่สุดคือ กระแส 9 Amp ซึ่งให้ผลที่เหมาะสมที่อัตราการสึกหรอที่เหมาะสมที่ระดับการสึกหรอค่าต่ำสุดที่ 35.72 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงผลการทดลองดังภาพที่ 4

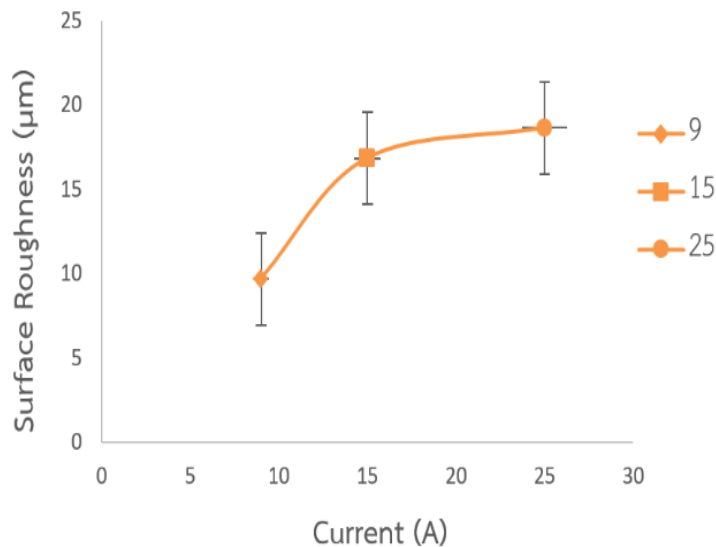


ภาพที่ 4 ผลการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าต่ออัตราการสึกหรออิเล็กโทรดทองแดง

### 3) ผลค่าความเรียบของผิวเฉลี่ยขึ้นงาน

ผลการทดลองปรับค่ากระแสไฟฟ้า พบว่าค่าความเรียบของผิวเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อกระแสที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากปริมาณกระแสที่เพิ่มขึ้นนั้นหมายถึงค่าพลังงานที่เป็นต้นกำเนิดของความร้อนมีมากขึ้นส่งผลทำให้การขจัดเนื้องานเกิดเป็นหลุมที่มีความลึกมากขึ้นตามลำดับ โดยที่อิเล็กโทรดทองแดงให้ค่าความเรียบของผิวเฉลี่ยต่ำสุดที่  $9.68 \mu\text{m}$  ที่ระดับค่ากระแสไฟฟ้าที่ 9 Amp ต่อมาค่าความเรียบของผิวเฉลี่ยรองลงมาที่ระดับค่ากระแส 15 Amp และค่าความเรียบของผิวเฉลี่ยสูงสุดที่  $18.64 \mu\text{m}$  ของระดับกระแสไฟฟ้าที่ 25 Amp

ตามลำดับ โดยค่าความเรียบของผิวเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นเป็นผลเกิดจากการสภาวะการสะสมความร้อนที่สูงขึ้นตามค่าระดับความรุนแรงของกระแสไฟฟ้าที่กระทำการสปาร์กที่สูงขึ้นตาม [8-10] โดยค่ากระแสเป็นต้นกำเนิดของความร้อนในการสปาร์ก ส่งผลให้เกิดร่องรอยของการสปาร์กที่มีความรุนแรงจนเป็นเหตุให้เกิดค่าสูงต่ำของพื้นผิวชิ้นงานไม่สม่ำเสมอที่เรียกว่าความหยาบผิวเฉลี่ยซึ่งจะให้ค่าสูงขึ้นตามลำดับของกระแสที่เพิ่มมากขึ้นดังแสดงผลการทดลองดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลลักษณะคุณภาพผิวชิ้นงานในการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า

### 3.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพวัสดุอิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมไนไตรด์ (Cu-TiN) และอิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมคาร์โบไนไตรด์ (Cu-TiCN)

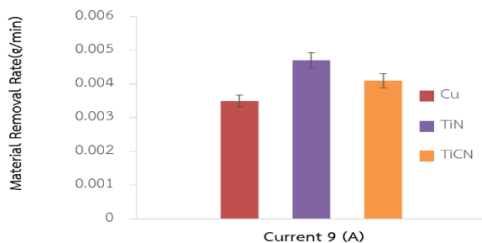
วัสดุอิเล็กโทรดไทเทเนียมไนไตรด์ (Cu-TiN) และอิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมคาร์โบไนไตรด์ (Cu-TiCN) จะส่งผลกระทบที่เกิดจากการแปรรูปด้วยการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าโดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาประกอบด้วยปัจจัยประสิทธิภาพ Duty factor) 50 เปอร์เซ็นต์ ประกอบด้วยเวลาเปิด (On time)  $12 \mu\text{s}$ , เวลาปิด (Off time)  $12 \mu\text{s}$  และค่า

ระดับกระแสไฟฟ้าที่ 9 Amp แรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltage) 250 โวลต์ ประสิทธิภาพการแปรรูปสามารถประเมินผลอยู่ในรูปของอัตราการขจัดเนื้องาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ค่าความเรียบของผิวเฉลี่ยผิวงาน ตลอดจนการวิเคราะห์ลักษณะรอยแตกร้าวขนาดเล็กบนผิวงาน ซึ่งไม่สามารถมองได้ด้วยตาเปล่าจึงต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดช่วยวิเคราะห์ทางกายภาพชิ้นงานภายหลังการแปรรูปด้วยกรรมวิธีการกัดเซาะด้วย

ไฟฟ้า มาทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอิเล็กโทรด ดังนี้

### 1) การเปรียบเทียบผลอัตราการกัดเนื้องาน

ในการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านอัตราการกัดเนื้องานของวัสดุอิเล็กโทรดต่างชนิด จากผลการทดลอง พบว่า อัตราการกัดเนื้องานสูงสุดที่วัสดุอิเล็กโทรดชนิดทองแดงผสมไทเทเนียมไนไตรด์ (Cu-TiN) ให้ผลอัตราการกัดเนื้องานสูงสุดที่ 0.0047 (g/min) รองลงมาเป็นวัสดุอิเล็กโทรด (Cu-TiCN) ให้ค่าอัตราการกัดเนื้องาน 0.0041 (g/min) และวัสดุอิเล็กโทรดชนิดทองแดง (Cu) ให้ผลค่าอัตราการกัดเนื้องานต่ำสุดที่ 0.0035 (g/min) ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นมาจากการกัดเนื้องานที่ให้การกัดเนื้องานที่สูงกว่าเป็นผลมาจากส่วนผสมไทเทเนียมกับทองแดงที่เหมาะสมกว่าส่งผลให้เกิดการสปาร์กกัดเนื้องานได้ดีกว่าดังแสดงในภาพที่ 6

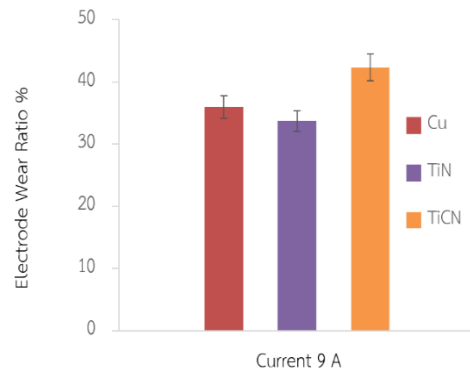


ภาพที่ 6 ผลการเปรียบเทียบการกัดชิ้นงานในการใช้วัสดุอิเล็กโทรดต่างชนิด

### 2) การเปรียบเทียบผลอัตราการสึกหรออิเล็กโทรด

จากผลการทดลองประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุอิเล็กโทรดชนิดทองแดงไทเทเนียมไนไตรด์ (Cu-TiN) และ วัสดุอิเล็กโทรดชนิดทองแดงไทเทเนียมคาร์โบไนไตรด์ (Cu-TiCN) เป็นการทดลองเพื่อศึกษาเปรียบเทียบอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดกับวัสดุอิเล็กโทรดทองแดง (Cu) พบว่าให้ผลค่าการสึกหรออิเล็กโทรด 35.97 เปอร์เซ็นต์ ส่วนวัสดุอิเล็กโทรดชนิดทองแดงไทเทเนียมไนไตรด์ ให้ผลค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดต่ำสุด โดยมีค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดอยู่ที่ 33.72 เปอร์เซ็นต์ และวัสดุอิเล็กโทรดชนิดทองแดง

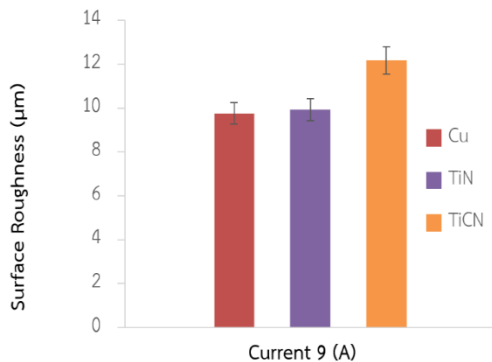
ไทเทเนียมคาร์โบไนไตรด์ (Cu-TiCN) ให้ผลอัตราการสึกหรออิเล็กโทรดสูงสุดที่อยู่ระดับ 42.35 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ผลการเปรียบเทียบผลการสึกหรอต่างชนิด

### 3) การเปรียบเทียบผลค่าความเรียบของผิว

ผลการทดลองเปรียบเทียบผลด้านค่าความเรียบของผิวเฉลี่ยจากการใช้วัสดุอิเล็กโทรดทองแดง (Cu) อิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมไนไตรด์ (Cu-TiN) และ อิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมคาร์โบไนไตรด์ (Cu-TiCN) ผลจากการทดลองพบว่ามีค่าความเรียบของผิวเฉลี่ยของอิเล็กโทรดแต่ละชนิดให้ผลไม่แตกต่างกันมาก โดยผลวัสดุอิเล็กโทรดทองแดง (Cu) 9.76  $\mu\text{m}$  ให้ค่าความเรียบของผิวดีที่สุดซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุด คือ 9.76  $\mu\text{m}$  ส่วนวัสดุอิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมไนไตรด์ (Cu-TiN) มีค่าความเรียบของผิวเฉลี่ยอยู่ที่ 9.93  $\mu\text{m}$  รองลงมา และนอกจากนี้วัสดุอิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมคาร์โบไนไตรด์ (Cu-TiCN) ให้ผลค่ามีความหยาบผิวเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 12.18  $\mu\text{m}$  ทั้งนี้โดยสรุปโดยรวมแล้ววัสดุอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิดให้ผลค่าความเรียบของผิวเฉลี่ยแตกต่างกันน้อยมากดังแสดงผลในภาพที่ 8 ตามลำดับ



ภาพที่ 8 ผลความหยาบผิวในการใช้วัสดุอิเล็กโทรดทองแดงต่างชนิด Cu, Cu-TiN และ TiCN

#### 4. สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพด้วยการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าด้วยวัสดุอิเล็กโทรดต่างชนิด คือ อิเล็กโทรดทองแดง (Cu) อิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมไนไตรด์ (Cu-TiN) และ อิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (Cu-TiCN) การผลทดลองจากพารามิเตอร์การทดลอง การสปาร์กที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูปด้าน อัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) และอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (EWR) รวมทั้งผลกระทบของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพผิวเฉลี่ย (Ra) สามารถสรุปของการวิจัยได้ดังนี้

4.1 การทดลองปรับพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้าพบว่าเมื่อค่ากระแสที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด โดยจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ส่วนค่าความเรียบของผิวเฉลี่ยมีค่าแปรผกผันสำหรับความหยาบผิวเฉลี่ยเรียบสุดที่ระดับค่ากระแสต่ำสุด คือ 9 Amp และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการควบคุมความเสถียรของการทดลอง คือ ปัจจัยกระแสไฟฟ้าที่ 9 Amp

4.2 จากการทดลองประเมินผลค่าอัตราการขจัดเนื้องานของอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิดพบว่าวัสดุอิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมไนไตรด์ (Cu-TiN) จะ

ให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานสูงสุดอยู่ที่ 0.0047 g/min รองลงมาเป็นวัสดุอิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (Cu-TiCN) และวัสดุอิเล็กโทรดชนิดทองแดง ให้ค่าอัตราการขจัดเนื้องานต่ำสุดที่ 0.0035 g/min ตามลำดับ

4.3 ผลจากการทดลองค่าอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดทั้ง 3 ชนิด พบว่า มีค่าอัตราการสึกหรอที่ค่อนข้างแตกต่างกัน โดยวัสดุอิเล็กโทรดชนิดทองแดงไทเทเนียมไนไตรด์ (Cu-TiN) ให้ค่าอัตราการสึกหรอที่ต่ำสุดอยู่ที่ 33.72% ถัดลงมาเป็นวัสดุอิเล็กโทรดชนิดทองแดง (Cu) ส่วนวัสดุอิเล็กโทรดทองแดงไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (Cu-TiCN) ให้ค่าอัตราการสึกหรอสูงสุดที่ 227.36% ตามลำดับ

4.4 การเปรียบเทียบค่าความเรียบของผิวเฉลี่ยต่ำสุดของอิเล็กโทรดแต่ละชนิดพบว่าวัสดุอิเล็กโทรดชนิดทองแดงไทเทเนียมไนไตรด์ (Cu-TiN) ให้ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยที่ต่ำสุดอยู่ที่ 9.76 µm ถัดลงมาเป็นวัสดุอิเล็กโทรดชนิดทองแดง (Cu) ส่วนวัสดุอิเล็กโทรดชนิดทองแดงไทเทเนียมคาร์ไบด์ไนไตรด์ (Cu-TiCN) ให้ค่าความเรียบของผิวสูงที่สุด คือ 12.18 µm

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ นอกจากนี้ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรมที่อนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อใช้ในการวิจัยนี้จนสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Manjaiah M, Narendranath S, and Basavarajappa S. Wire electro discharge machining performance of TiNiCu shape memory alloy. Silicon Journal. 2016;467-475.
- [2] Kao JY, Tsao CC, Wang SS, and Hsui CY. Optimization of the EDM

- parameters on machining Ti-6Al-4V with multiple quality characteristics. Inter. J. Adv. Manufact. Technol. 2010;47: 395-412.
- [3] Amorim FL, and Weingaertner WL. The influence of generator actuation mode and process parameters on the performance of finish EDM of tool steel, Journal of Material Processing Technology. 2005;66:411-416.
- [4] Muthuramalingam T, and Mohan B. A review on influence of electrical process parameters in EDM process, Achieves of civil and mechanical engineering. 2015;15: 87-94.
- [5] Chitaranjan DasV. Response surface methodology and desirability approach to optimize EDM parameters. Inter. J hybrid informat. Technol. 2016;8(4): 393-406.
- [6] Shabgad MR, Seyedzavva M, and Nadimi Babil OS. Influence of input parameters on characteristics of EDM process. Journal of mechanical engineering. 2018;12:1-8.
- [7] Kaldeep O, Garg RK, and Singh KK. MRR implement in sinking electrical discharge machining: A review, Journal of mineral and material characterization and engineering. 2010;9(8):709-739.
- [8] Janmanee P, and Muttamara A. Performance of different electrode electrical discharge machining of tungsten carbide, Energy research journal. 2010;1(2):87-90.
- [9] Janmanee P, Jamkamom K, Kanchanasaengtong T, and Muttamara A. A study of surface hardness affecting in electrical discharge machining on AISI P20 plastic mold steel, Advanced Material Research. 2012;557- 559: 1791-1796.
- [10] Murray J, Zdebski D, and Clare AT. Workpiece debris deposition on tool electrodes and secondary discharge phenomena in micro-EDM. Journal of Material Processing Technology. 2012;212:1537-1547.

# การทดสอบการดัดแบบ 4 จุดของการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีเรซิน

## Four-Point Bending Test of Reinforced Concrete Beams Strengthening with Epoxy Resin Bonded Steel Plates

ธันตศักดิ์ ธีระเกตุ<sup>1</sup>, วิกร โตวราพงศ์<sup>1</sup>, ดามอง ดี<sup>2</sup>, ปฏิภาณ จันทรวชิต<sup>3\*</sup>,  
ยุทธศักดิ์ อนันตเดชศักดิ์<sup>1</sup>, สัจจา บุญยฉัตร<sup>4</sup>, ยศ สมพรเจริญสุข<sup>1#</sup>  
Thanutsak Theeraket<sup>1</sup>, Vigone Tovarapong<sup>1</sup>, Damang Dy<sup>2</sup>, Patiphan Chantarawichit<sup>3\*</sup>,  
Yuthasak Ananthadejsak<sup>1</sup>, Sutja Boonyachut<sup>4</sup>, Yos Sompornjaroensuk<sup>1#</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ

<sup>2</sup>กรมตรวจคนเข้าเมืองทั่วไป กระทรวงการภายใน พนมเปญ กัมพูชา

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพฯ

<sup>4</sup>กรรมการสภา สมาคมวิชาการแห่งอาเซียนทางวิศวกรรมและเทคโนโลยี กัวลาลัมเปอร์ มาเลเซีย

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, School of Engineering and Industrial Technology  
Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand

<sup>2</sup>General Department of Immigration, Ministry of Interior, Phnom Penh, Cambodia

<sup>3</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering  
Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok, Thailand

<sup>4</sup>Council Member, ASEAN Academy of Engineering and Technology, Kuala Lumpur, Malaysia

\*Major Corresponding Author. E-mail: patiphan.c@mail.rmutk.ac.th

#Minor Corresponding Author. E-mail: syosyos@mut.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ตั้งเป้าหมายสู่การศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมเชิงโครงสร้างด้านความสามารถทางกำลังและการเสียรูปของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่เสริมกำลังดัดโดยการยึดติดแผ่นเหล็กจากภายนอกด้วยอีพ็อกซีบริเวณผิวหน้าด้านรับแรงดึงของคานภายใต้การทดสอบการดัดแบบ 4 จุด ในแผนดำเนินการทดลองได้ทำการออกแบบตัวอย่างคานที่มีฐานรองรับอย่างง่ายจำนวนทั้งสิ้น 12 ตัวอย่าง ที่ประกอบไปด้วยคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป 4 ตัวอย่างโดยกำหนดให้เป็นคานควบคุมและตัวอย่างที่เหลือเป็นคานเสริมกำลังจากภายนอกด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กจำนวน 8 ตัวอย่าง โดยคานตัวอย่างทั้งหมดได้ทำการทดสอบในโรงประลองภายใต้การให้แรงกระทำที่เพิ่มขึ้นทางเดียวแบบสมมาตร พารามิเตอร์ที่สนใจศึกษาเกี่ยวข้องกับกำลังอัดของคอนกรีต ความหนาของแผ่นเหล็กและประเภทของการเสริมเหล็กบนหน้าตัดคานซึ่งอาจเป็นการเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวหรือเป็นการเสริมเหล็กรับแรงดึงและเสริมเหล็กรับแรงอัดโดยได้ทำการพิจารณาและศึกษาควบคู่กันไป ผลลัพธ์ที่ได้มาแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว คำนวณการบรรทุกทุกแตร้าวเริ่มแรก คำนวณการบรรทุกครากและคำนวณการบรรทุกทุกประลัย รูปแบบการวิบัติและพฤติกรรมการแตกร้าของคานตัวอย่างทดสอบได้มีการนำเสนอและวิจารณ์ในรายละเอียด ผลการทดสอบบ่งชี้ได้ว่าการวิบัติแบบล่วงหน้า

ก่อนกำหนดอันเนื่องมาจากการลอกออกที่ปลายแผ่นเหล็กเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ลดความมีประสิทธิภาพและสมรรถนะของการเสริมกำลังดัดของคาน

**คำสำคัญ :** การยึดติดแผ่นเหล็กจากภายนอกด้วยอีพ็อกซี่ การเสริมกำลังดัด การลอกออกที่ปลายแผ่น การวิบัติแบบล่วงหน้าก่อนกำหนด คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

## ABSTRACT

This research work is aimed to experimentally study the structural behavior on strength capacity and deformation of under-reinforced concrete beams strengthened in flexure with externally epoxy bonded steel plates to the tension face of the beams under four-point bending test. In the experimental program, a total of twelve simply supported beam specimens that consist of four ordinary reinforced concrete beams as control beams and the remaining eight reinforced concrete beams externally reinforced with bonded steel plates, have been designed and all tested in laboratory under monotonically increasing symmetrical loads. The interested parameters involving the concrete compressive strength, the steel plate thickness, and the type of reinforcing steel bars on the beam sections which may be singly or doubly reinforcements are simultaneously considered and investigated. The obtained results are dealt with for the load-deflection relationships, initial cracking load, yielding load, and ultimate load. The failure mode and cracking behavior of tested beams are presented and discussed in details. The tests indicate that the premature failure due to plate-end peeling is one of the major factors to decrease the efficiency and performance of flexural strengthening reinforced concrete beams.

**Keyword:** Externally Epoxy Bonded Steel Plate: Flexural Strengthening: Plate-End Peeling: Premature Failure: Reinforced Concrete Beam

## 1. บทนำ

คอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างโครงสร้างอาคารทั่วไปและโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ อาทิเช่น โครงสร้างสะพาน ถนน และอาคารสาธารณูปโภคทั้งในประเทศและต่างประเทศ เนื่องจากมีความสะดวกในการก่อสร้าง การใช้งาน ความคงทนและมีประสิทธิภาพสูง [1-3] กลไกสำคัญที่ทำให้ห้องค้ออาคารของโครงสร้าง คสล มีกำลังต้านทานต่อภาระจากภายนอกคือ คอนกรีตทำหน้าที่ในการรับแรงอัดส่วนของเหล็กเสริมจะทำหน้าที่ในการรับแรงดึง ดังนั้นเมื่อนำข้อดีของวัสดุทั้งสองมารวมกันทำหน้าที่ในการรับแรงกระทำจากภายนอกในบริเวณหรือตำแหน่งที่เหมาะสมจะทำให้ได้โครงสร้าง

ที่มีความปลอดภัยและประหยัด โดยที่อายุการใช้งานของโครงสร้าง คสล ที่ได้รับการออกแบบมาอย่างถูกต้องและเป็นไปตามหลักการทางด้านวิศวกรรม รวมทั้งหากได้มีการบำรุงดูแลรักษาอย่างสม่ำเสมอและมีการใช้งานที่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ พบว่าโครงสร้าง คสล สามารถมีช่วงอายุการใช้งานได้ยาวนานมากกว่า 50 ถึง 100 ปี สำหรับในช่วงอายุการใช้งานของโครงสร้างนั้นอาจมีความจำเป็นในการบำรุงดูแลและซ่อมแซมชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้างที่อาจเกิดขึ้นมาจากหลายสาเหตุที่ตามมาภายหลังจึงทำให้มีความต้องการในการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างที่มีอยู่เดิมหากพบว่า เสถียรภาพหรือความเหมาะสมในการใช้งานไม่เป็นไปตามสภาพและเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ [4-6]

การเสริมกำลังให้กับโครงสร้าง คสล เป็นหนึ่งในวิธีการทางเลือกที่เหมาะสมและประหยัดในเชิงเศรษฐศาสตร์ อีกทั้งมีความรวดเร็วในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงหรือซ่อมแซมโครงสร้างให้กลับมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกรณีของการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นเหล็กยึดติดจากภายนอก พบว่าได้เริ่มมีการใช้งานมาตั้งแต่ต้นปี ค.ศ. 1960 ในประเทศอัฟริกาใต้และประเทศฝรั่งเศส [7,8] ด้วยการติดแผ่นเหล็กที่ผิวด้านรับแรงดึงของคาน คสล โดยใช้อีพ็อกซีเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัด และในเวลาต่อมา ได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเสริมกำลังให้กับคาน คสล อย่างต่อเนื่องดังต่อไปนี้

Jones, Swamy และ Ang [7] ทำการทดสอบและศึกษาพฤติกรรมเชิงดัดทางด้านกำลังและการเสียรูปของคาน คสล ที่มีปริมาณการเสริมเหล็กน้อย (under RC beam) และเสริมเหล็กมาก (over RC beam) เมื่อเสริมกำลังโดยยึดติดแผ่นเหล็กจากภายนอกด้วยกาว (วัสดุประสาน) ที่ผิวคอนกรีต จากการศึกษาพบว่า การเสริมกำลังด้วยการติดแผ่นเหล็กที่ผิวนอกคานทำให้ค่ากำลังประลัยมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกกรณีของคานทดสอบ อีกทั้งรอยร้าวแรกที่สามารถสังเกตเห็นได้ (the first visible crack) ปรากฏช้าลงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับคาน คสล ในเวลาต่อมา Eberline, Klaiber และ Dunker [8] ทำการทบทวนงานวิจัยและการประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการเสริมกำลังคาน คสล พบว่าคานสะพาน คสล ที่ได้ติดแผ่นเหล็กด้วยวัสดุประสานอีพ็อกซี (epoxy) สามารถเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกจรได้ นอกจากนี้ได้ให้ข้อเสนอแนะว่า ควรออกแบบให้คานเสริมกำลังเกิดการวิบัติแบบเหนียว (ductile failure) และแนะนำให้อัตราส่วนความกว้างต่อความหนา (b/t ratio) ของแผ่นเหล็กที่ใช้มีค่าไม่น้อยกว่า 50

Oehlers [9] ได้ทำการศึกษาผลของการลอก (peeling) เนื่องจากแรงเฉือนและปฏิสัมพันธ์ระหว่างการลอกเฉือน (shear peeling) และการลอกดัด (flexural peeling) ในคาน คสล ที่เสริมกำลังโดยติด

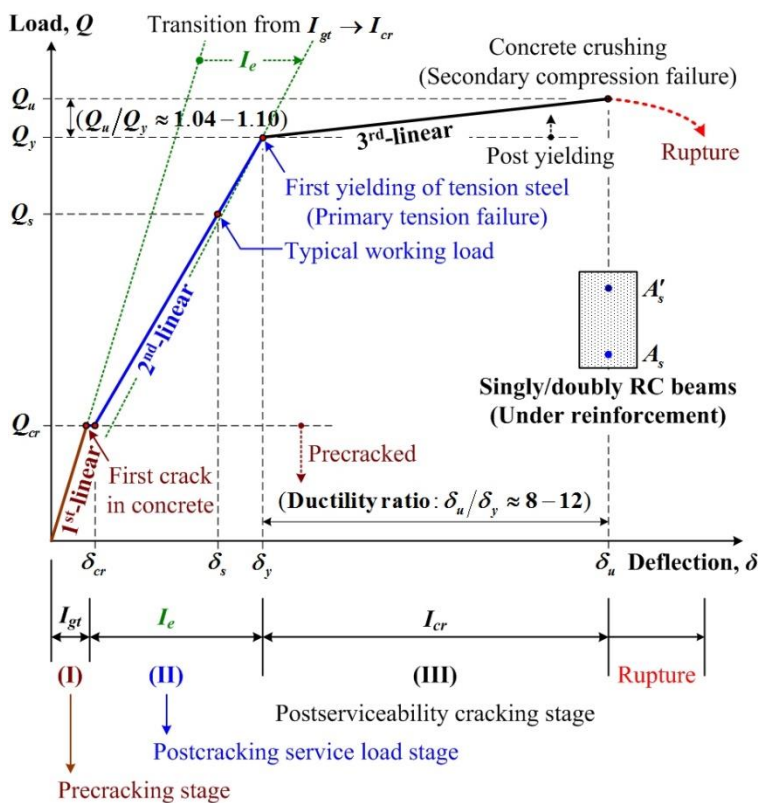
แผ่นเหล็กที่ผิวด้านรับแรงดึง ผลการศึกษาพบว่า การหลุดล่อน (debonding) ที่ปลายแผ่นเหล็กเนื่องจากแรงเฉือนไม่ได้มีอิทธิพลมาจากการมีอยู่ของเหล็กปลอกแต่ขึ้นอยู่กับการเกิดขึ้นของรอยร้าวเฉือนในแนวทแยง (diagonal shear crack formation) ที่ได้จากการกำลังเฉือนในคาน คสล ที่ไม่มีเหล็กปลอก (RC beam without stirrups) ลำดับถัดมา Ziraba และ Baluch [10] ได้ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอเลเมนต์แบบไร้เชิงเส้น (nonlinear finite element model) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองต่อการดัดรวมกับการเฉือน (flexure-shear responses) ของคาน คสล ที่เสริมกำลังจากภายนอกโดยการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซี พบว่า การเสริมกำลังคาน คสล ที่มีเหล็กเสริมปริมาณน้อยมีการวิบัติในลักษณะทำนองเดียวกันกับคาน คสล ที่ไม่เสริมกำลัง

Li, Assih และ Delmas [11] มุ่งสนใจศึกษาอิทธิพลของความหนาของวัสดุประสาน (adhesive thickness) และความหนาของแผ่นเหล็กที่ใช้ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมการเสริมกำลังคานคอนกรีตล้วน (strengthened plain concrete beams) ด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กจากภายนอก จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า กำลังดัดประลัยไม่มีการเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความหนาของวัสดุประสาน Teng และ Yao [12] นำเสนอแบบจำลองเชิงทำนายอย่างง่าย (simple predictive model) เพื่อใช้วิเคราะห์การวิบัติหลุดล่อนบริเวณปลายแผ่นของคาน คสล ที่มีการติดแผ่นเหล็กหรือแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP plate) Jumaat และ Alam [13] ศึกษาเชิงทดลองและเชิงวิเคราะห์ โดยใช้วิธีการไฟไนต์เอเลเมนต์ของคาน คสล เสริมกำลังดัดด้วยการติดแผ่นเหล็กและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) จากภายนอกโดยออกแบบให้คานทั้ง 2 ประเภทมีกำลังที่เท่ากัน จากผลการศึกษาพบว่า คานเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ให้ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกวิบัติ (failure load) สูงกว่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคานเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก Chang, Yan และ Tang [14] ได้สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของรอยร้าวรูปแบบผสม

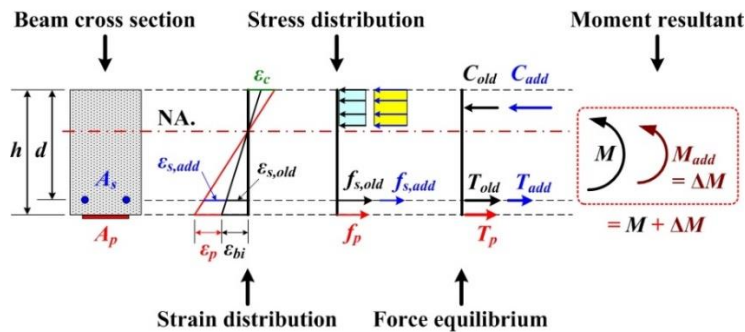
(mixed-mode crack) ที่เกิดจากการวิบัติของคาน  
คอนกรีตล้วนที่ทำการเสริมกำลังโดยยึดติดแผ่นเหล็ก  
จากภายนอกพบว่า มีการเกิดรอยร้าวในคอนกรีตและ  
รอยร้าวจากการสูญเสียการยึดเกาะระหว่างคอนกรีต  
และแผ่นเหล็ก

Ozbek, Bocek และ Aykac [15] ศึกษากำลัง  
ประลัยและความเหนียวของคาน คสล ที่ทำการเสริม  
กำลังดัดด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กและมีการจับยึดที่  
ปลายแผ่นด้วยการติดแผ่นเหล็กประกบด้านข้างยึด  
ด้วยสลักเกลียวพบว่า ความเหนียว (ductility) ของ  
คานมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคานไม่เสริมกำลังแต่ค่า  
โมดูลัสของความแกร่ง (modulus of toughness) มี  
ค่าเพิ่มขึ้น Yannian, Jun และ Liu [16] ทดสอบคาน  
คสล ที่มีหน้าตัดรูปตัวที (RC T-beam) และทำการ  
เสริมกำลังดัดด้วยการติดแผ่นเหล็กได้ห้อยคานและมี  
การโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กรูปตัวยู (U-wrap) ที่

ปลายและภายในของแผ่นเหล็กเสริมกำลัง ผลของการศึกษาพบว่า อิทธิพลของการติดแผ่นเหล็กรูปตัวยูสามารถป้องกันการวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กได้ และทำให้การวิบัติของคานอยู่ในรูปแบบของการคด (flexural failure) เมื่อไม่นานมานี้ Abtan [17] ได้ศึกษาผลของความยาวและพื้นที่ประสิทธิผล (effective length and area) ของแผ่นเหล็กที่ใช้เสริมกำลังตัดจากภายนอกด้วยการยึดติดกับผิวคานคอนกรีตรับแรงดึงโดยการใช้อูเชื่อมต่อสลักเกลียวรับแรงเฉือน (bolted shear connectors) พบว่า การใช้จุดต่อรับแรงเฉือนสามารถพัฒนาพฤติกรรมคอมโพสิตของคานเสริมกำลังจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติได้ และ Wojtczak, Rucka และ Knak [18] สนใจศึกษาการหลุดล่อนในวัสดุประสานของคานคอนกรีตล้วน (plain concrete beam) ที่เสริมกำลังด้วยการติดแผ่นเหล็กภายนอก



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 2 หลักการคำนวณความต้านทานโมเมนต์ดัดบนหน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง

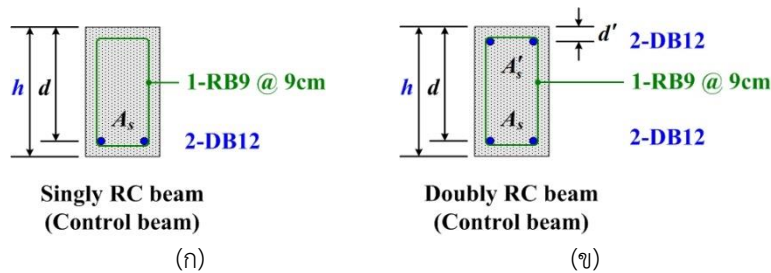
ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างคานทดสอบ

| คาน       | ประเภทคาน     | กำลังอัดคอนกรีต (ksc) | การเสริมเหล็ก | ความหนาแผ่นเหล็ก (mm) |
|-----------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| CB-1S     | คานควบคุม     | 240                   | singly RC     | -                     |
| SB-1S-3mm | คานเสริมกำลัง | 240                   | singly RC     | 3                     |
| SB-1S-4mm | คานเสริมกำลัง | 240                   | singly RC     | 4                     |
| CB-1D     | คานควบคุม     | 240                   | doubly RC     | -                     |
| SB-1D-3mm | คานเสริมกำลัง | 240                   | doubly RC     | 3                     |
| SB-1D-4mm | คานเสริมกำลัง | 240                   | doubly RC     | 4                     |
| CB-2S     | คานควบคุม     | 280                   | singly RC     | -                     |
| SB-2S-3mm | คานเสริมกำลัง | 280                   | singly RC     | 3                     |
| SB-2S-4mm | คานเสริมกำลัง | 280                   | singly RC     | 4                     |
| CB-2D     | คานควบคุม     | 280                   | doubly RC     | -                     |
| SB-2D-3mm | คานเสริมกำลัง | 280                   | doubly RC     | 3                     |
| SB-2D-4mm | คานเสริมกำลัง | 280                   | doubly RC     | 4                     |

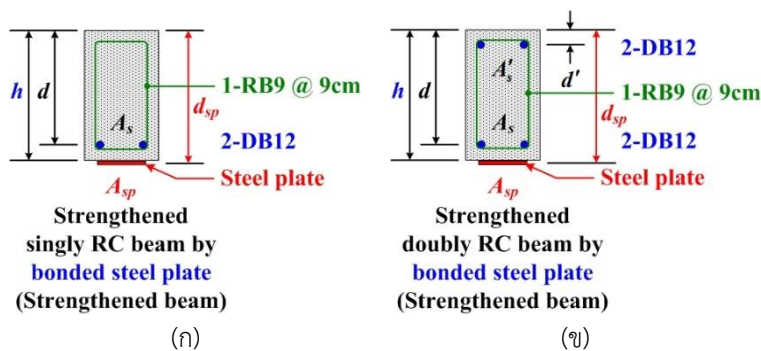
พฤติกรรมของคาน คสล ที่มีปริมาณของการเสริมเหล็กน้อย (under reinforcement) อยู่ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำจากภายนอกสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ ( $Q$ ) และการแอ่นตัว ( $\delta$ ) แบบ 3 เส้นตรง (tri-linear relationships) [2] ดังภาพที่ 1 ซึ่งแบ่งช่วงพฤติกรรมออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้คือ (1) ขั้นตอนก่อนเกิดการแตกร้าว (2) ขั้นตอนหลังการแตกร้าวภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานและ (3) ขั้นตอนภายหลังความสามารถในการใช้งานได้ สำหรับกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคาน คสล ที่เสริมกำลังด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กสามารถคำนวณหาได้จาก

หลักการสมดุลของแรงกระทำบนหน้าตัดคานแล้วนำแรงที่กระทำมาหาค่าโมเมนต์ดัดรอบแกนใดแกนหนึ่ง ดังภาพที่ 2 โดยที่  $M$  คือ ค่าโมเมนต์ดัดเดิมของคาน คสล และ  $\Delta M$  คือ ค่าโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมกำลังของแผ่นเหล็ก

สำหรับการศึกษาวิจัยที่นำเสนอในบทความนี้สนใจศึกษาพฤติกรรมด้านความสามารถทางกำลังและการตอบสนองของคาน คสล ที่เสริมกำลังโดยการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยวัสดุประสานอีพ็อกซีและรูปแบบของการวิบัติภายใต้การทดสอบการดัดแบบ 4 จุด และทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างคาน คสล ควบคุมและคานเสริมกำลัง



ภาพที่ 3 คานควบคุม (ก) คานเสริมเหล็กรับแรงดึงและ (ข) คานเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด



ภาพที่ 4 คานเสริมกำลัง (ก) คานเสริมเหล็กรับแรงดึงและ (ข) คานเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้

| วัสดุ                      | ค่าระบุออกแบบ | ค่าจากการทดสอบวัสดุ |
|----------------------------|---------------|---------------------|
| กำลังครากเหล็ก DB12        | 4000 ksc      | 5484 ksc            |
| กำลังครากเหล็ก RB9         | 2400 ksc      | 3952 ksc            |
| กำลังครากแผ่นเหล็กหนา 3 mm | 2450 ksc      | 3015 ksc            |
| กำลังครากแผ่นเหล็กหนา 4 mm | 2450 ksc      | 3273 ksc            |
| คอนกรีตกำลังอัด 240 ksc    | 240 ksc       | 259.58 ksc          |
| คอนกรีตกำลังอัด 280 ksc    | 280 ksc       | 279.39 ksc          |

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

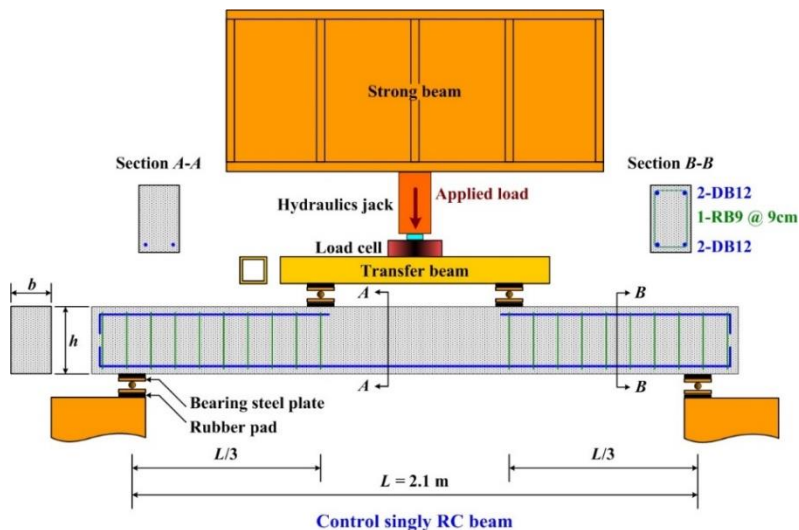
ตัวอย่างคานที่ใช้มีจำนวน 12 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักตามค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (compressive strengths) คือ 240 ksc และ 280 ksc ซึ่งในแต่ละกลุ่มมีประเภทการเสริมเหล็กที่แตกต่างกันคือ (1) เสริมเหล็กรับแรงดึง (singly RC beams) และ (2) เสริมเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด (doubly RC beams) โดยคานทุกตัวมีหน้าตัดกว้าง ( $b$ ) 15 cm ลึก ( $h$ ) 25 cm

และยาว 2.4 m และมีความยาวช่วงพาดที่อยู่ระหว่างฐานรองรับ ( $L$ ) คือ 2.1 m ส่วนเหล็กเสริมภายในคือ DB12 ชั้นคุณภาพ SD40 เหล็กปลอก RB9 ชั้นคุณภาพ SR24 สำหรับแผ่นเหล็กที่ซีมี 2 ความหนา ( $t$ ) คือ 3 mm และ 4 mm มีความกว้าง ( $b_{sp}$ ) 9 cm และชั้นคุณภาพ Fe24

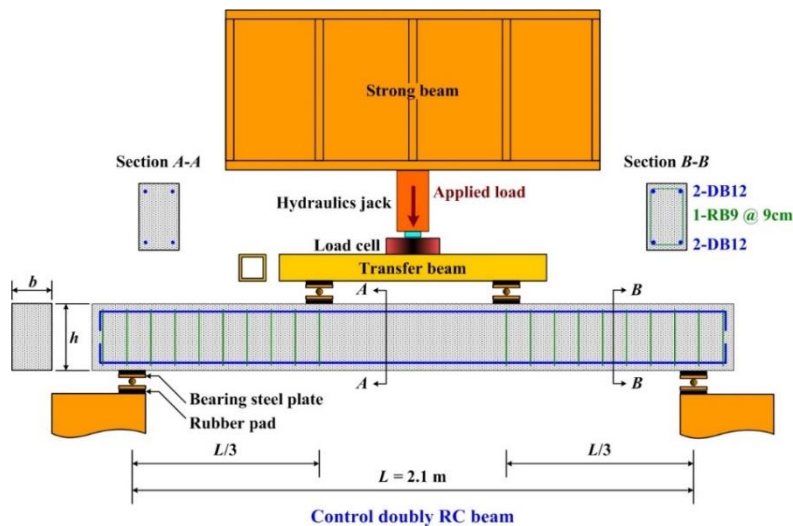
รายละเอียดของการเรียกชื่อสำหรับตัวอย่างคานทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และรูปของหน้าตัดคานดังภาพที่ 3 และภาพที่ 4 สำหรับคานควบคุมและคานเสริมกำลัง ตามลำดับ ส่วนตารางที่ 2 แสดง

คุณสมบัติของวัสดุที่กำหนดค่าระบุในการคำนวณ ออกแบบและค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุ รูปแบบของการทดสอบตัวอย่างคานเป็นการให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำเป็นแบบจุดของการทดสอบการดัดแบบ 4 จุด โดยการใช้แม่แรงไฮดรอลิกสขนาด 30 ตัน กระทำลงบนคานถ่ายแรง (transfer beam) และส่งผ่านน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำลงบนคานทดสอบเป็น

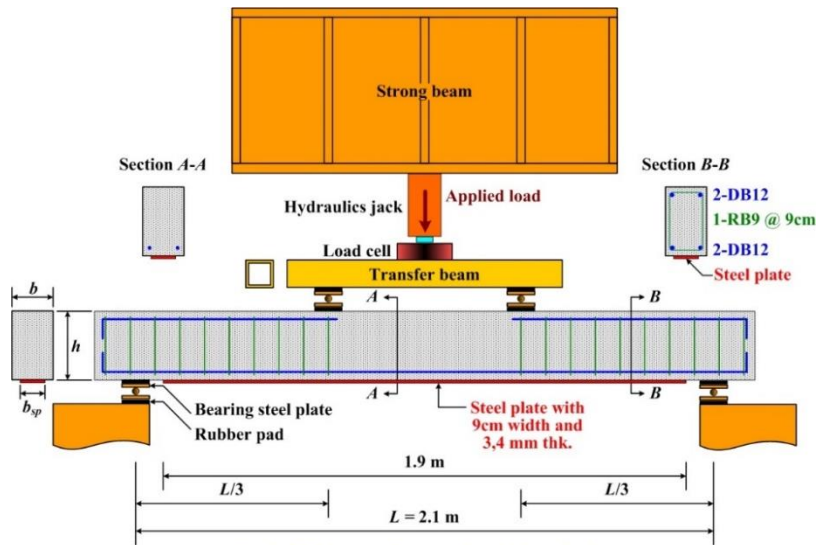
แบบ 2 จุด ดังภาพที่ 5 ถึง ภาพที่ 8 ส่วนภาพที่ 9 แสดงตำแหน่งของการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวของคานด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่แปรเปลี่ยนแบบเชิงเส้น (LVDTs) ใน 3 หน้าตัด โดยแต่ละหน้าตัดคานมีการตรวจวัดอยู่ 2 ตำแหน่งคือ ด้านหน้า (หน้า A) และด้านหลัง (หน้า B)



ภาพที่ 5 รูปแบบการให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานควบคุมเสริมเหล็กกับแรงดึง

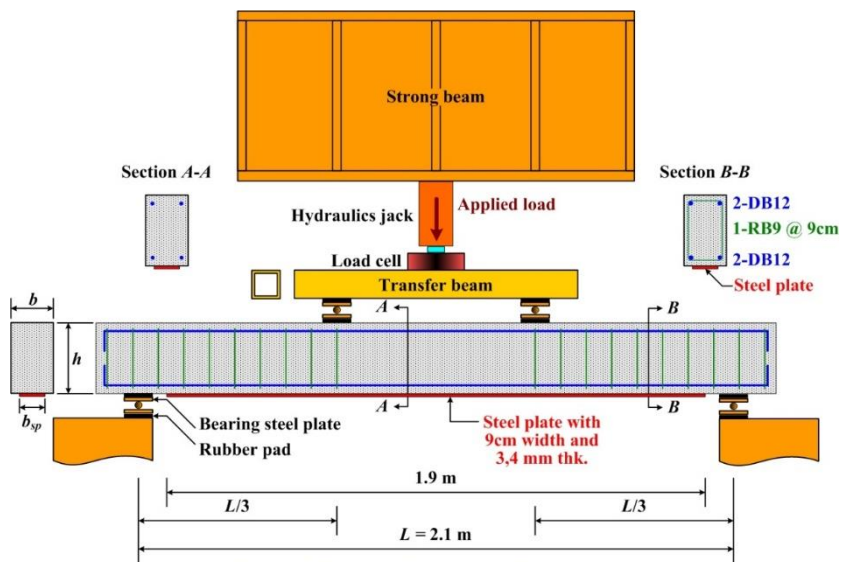


ภาพที่ 6 รูปแบบการให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานควบคุมเสริมเหล็กกับแรงดึงและแรงอัด



**Singly RC beam with epoxy bonded steel plate**

ภาพที่ 7 รูปแบบการให้น้ำหนักบรรทุกกระทำบนคานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กกับแรงดึง

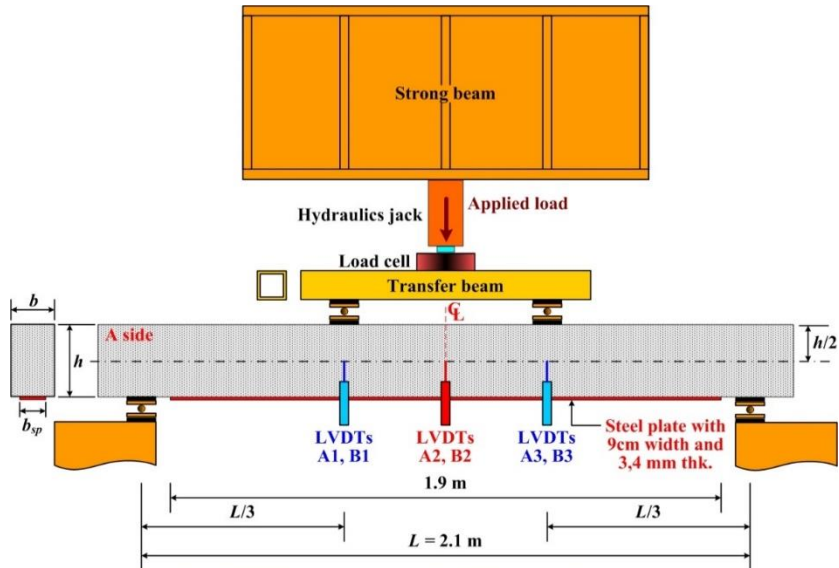


**Doubly RC beam with epoxy bonded steel plate**

ภาพที่ 8 รูปแบบการให้น้ำหนักบรรทุกกระทำบนคานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กกับแรงดึงและแรงอัด

ภาพที่ 10 และภาพที่ 11 นั้นเป็นการแสดงตัวอย่างภาพถ่ายกรณีของคานควบคุม CB-1S ทั้งก่อนให้และหยุดให้น้ำหนักบรรทุกกระทำบนคาน ตัวอย่างทดสอบ ตามลำดับ ซึ่งเป็นคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงเพียงอย่างเดียวเท่านั้นและมีกำลังอัดระบุของคอนกรีตที่ใช้ 240 ksc ส่วนภาพที่ 12

และภาพที่ 13 เป็นตัวอย่างภาพถ่ายของคานเสริมกำลัง SB-1S-4mm ทั้งก่อนให้และหยุดให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ ตามลำดับ ที่มีการเสริมเหล็กกับแรงดึงเพียงอย่างเดียวและมีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 240 ksc โดยคานมีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กความหนา 4 mm



Position of LVDTs measurement for RC beams with bonded steel plate

ภาพที่ 9 ตำแหน่งการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวของคานด้านหน้า (หน้า A) ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด LVDTs



ภาพที่ 10 คาน CB-1S ก่อนให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ



ภาพที่ 11 คาน CB-1S เมื่อหยุดให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ



ภาพที่ 12 คาน SB-1S-4mm ก่อนให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ



ภาพที่ 13 คาน SB-1S-4mm เมื่อหยุดให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ

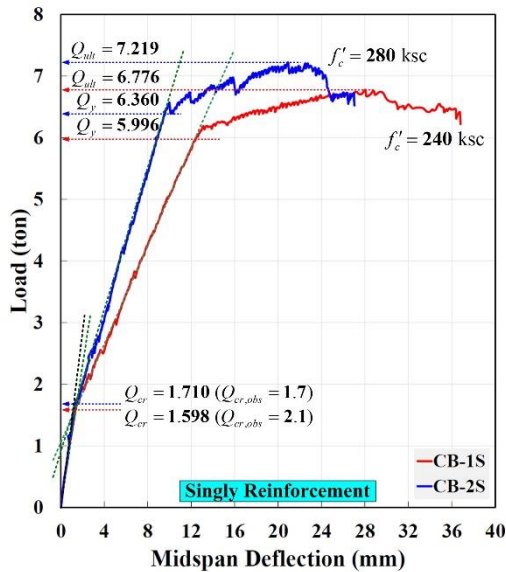
### 3. ผลการทดสอบ

จากการทดสอบตัวอย่างคานทั้ง 12 ตัวอย่าง จนกระทั่งคานเกิดการวิบัติสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำจากแม่แรงไฮดรอลิกส์ ( $Q$ ) และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงพาด ( $\delta$ ) ของคานทดสอบที่ได้มาจากชุดอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (data acquisition) ของมาตรวัดแรง (load cell) และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าการเคลื่อนที่ LVDTs

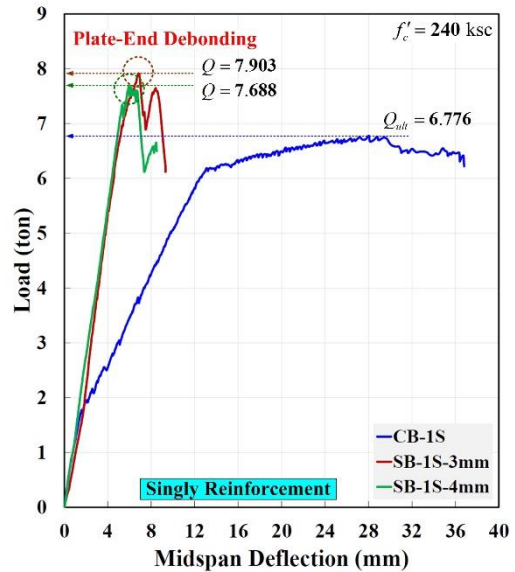
โดยค่าของการแอ่นตัวที่ได้เป็นการหามาจากค่าเฉลี่ยของการแอ่นตัวของตัวอย่างคานทดสอบที่ด้าน A และด้าน B ของคาน ดังแสดงในภาพที่ 14 และภาพที่ 15 สำหรับกรณีของคานควบคุมที่มีการเสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดียวและของคานควบคุมที่มีการเสริมเหล็กกับแรงดึงร่วมกับเหล็กกับแรงอัดตามลำดับ โดยในแต่ละภาพนั้นมีผลของคานที่มีค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีตที่ใช้คือ 240 ksc และ 280 ksc และได้มีการแสดงค่าของน้ำหนักบรรทุกทุกตัวแรกเริ่มแรก ค่าน้ำหนักบรรทุกครากและค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ได้จากการพิจารณาผลของการ

ทดสอบตัวอย่างของคานจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำและค่าการแอ่นตัวในแบบ 3 เส้นตรง ดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 1 ก่อนหน้านี้

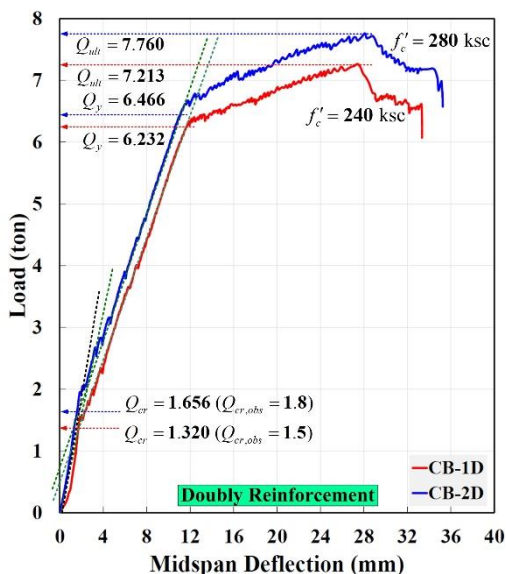
สำหรับภาพที่ 16 ถึงภาพที่ 19 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำและค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงพาดของตัวอย่างคานทดสอบต่างๆ ที่ได้จากคานควบคุมและคานเสริมกำลัง สังเกตได้ว่าค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนระหว่างแผ่นเหล็กและผิวของคอนกรีตที่ชั้นของวัสดุประสานในคานเสริมกำลังที่ยึดติดด้วยแผ่นเหล็กจากภายนอกซึ่งสามารถทำการพิจารณาหาได้ โดยที่เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกกระทำสูงสุดค่าหนึ่งและแผ่นเหล็กเกิดการหลุดล่อนทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากคานสูญเสียพฤติกรรมคอมโพสิตที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ภาพที่ 19 แสดงพฤติกรรมภายหลังการเกิดการหลุดล่อนของแผ่นเหล็ก เมื่อทำการให้น้ำหนักบรรทุกต่อไปอีก พบว่าคานเสริมกำลังที่ติดแผ่นเหล็กหนา 3 mm และ 4 mm มีพฤติกรรมคล้ายกับคาน คสล ที่ไม่เสริมกำลัง



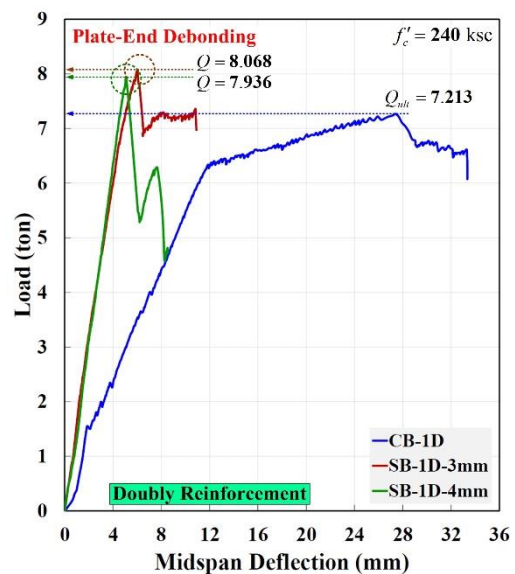
ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุม CB-1S และ CB-2S



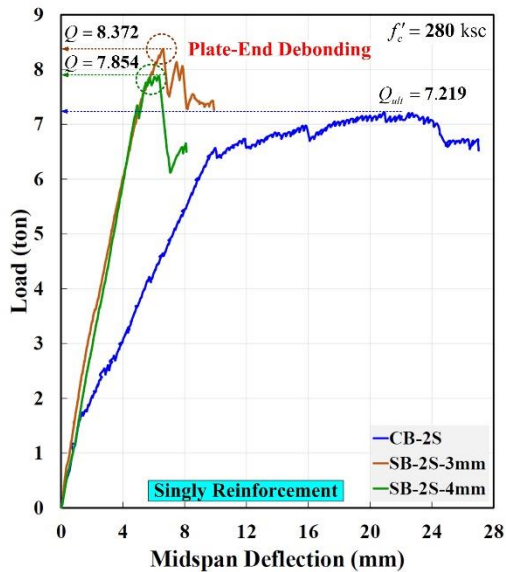
ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุม CB-1S และคานเสริมกำลัง SB-1S-3mm และ SB-1S-4mm



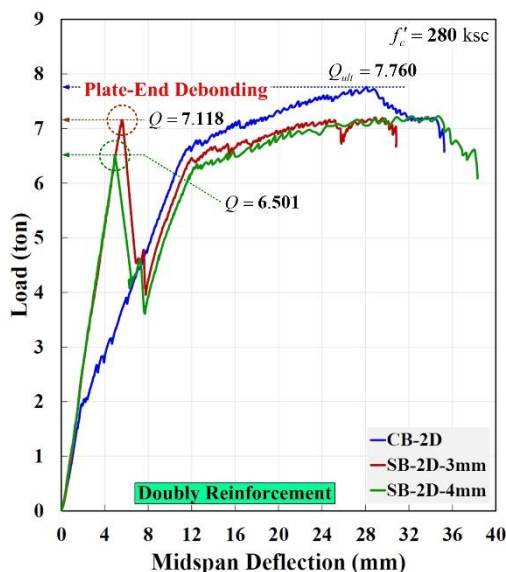
ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุม CB-1D และ CB-2D



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุม CB-1D และคานเสริมกำลัง SB-1D-3mm และ SB-1D-4mm



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุม CB-2S และคานเสริมกำลัง SB-2S-3mm และ SB-2S-4mm



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุม CB-2D และคานเสริมกำลัง SB-2D-3mm และ SB-2D-4mm

นอกจากนี้ยังสามารถทำการสังเกตเพิ่มเติมได้อีกว่า ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานเสริมกำลังภายหลังจากเกิดการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กดังในภาพที่ 19 มีค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดไม่มากไปกว่าค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยสูงสุดของคานคอนกรีตควบคุม (CB-2D) ที่ไม่ได้เสริมกำลัง โดยที่คานเสริมกำลังยังปรากฏให้เห็นพฤติกรรมของคานเป็นแบบเหนียวจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติจากการบดอัดแตกของคอนกรีตบริเวณหลังคานที่กึ่งกลางความยาวช่วงพาด

อย่างไรก็ดี เนื่องจากไม่ได้ทำการทดสอบโดยการให้น้ำหนักบรรทุกต่อไปอีกภายหลังจากที่คานเสริมกำลังมีการวิบัติจากการหลุดล่อนเกิดขึ้นดังในกรณีของคานเสริมกำลังตัวอย่างอื่นๆ ในภาพที่ 16 ถึงภาพที่ 18 ดังนั้น จึงไม่อาจทำการสรุปพฤติกรรมได้อย่างชัดเจนว่า ค่าน้ำหนักบรรทุกของคานเสริมกำลังเมื่อเกิดการวิบัติจากการบดอัดแตกของคอนกรีตที่หลังคานจะมีค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดไม่มากไปกว่าค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยสูงสุดของคานควบคุม แต่สามารถกล่าวได้ว่า คานเสริมกำลังจะมีแนวโน้มของการปรากฏพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวให้เห็นหากยังคงให้น้ำหนักบรรทุกกระทำต่อไปอีกจนคานเสริมกำลังเกิดการวิบัติแบบบดอัดแตกของคอนกรีต ซึ่งค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้และประเภทของการเสริมเหล็ก (singly RC และ doubly RC) ในคานมีผลต่อพฤติกรรมภายหลังจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็ก

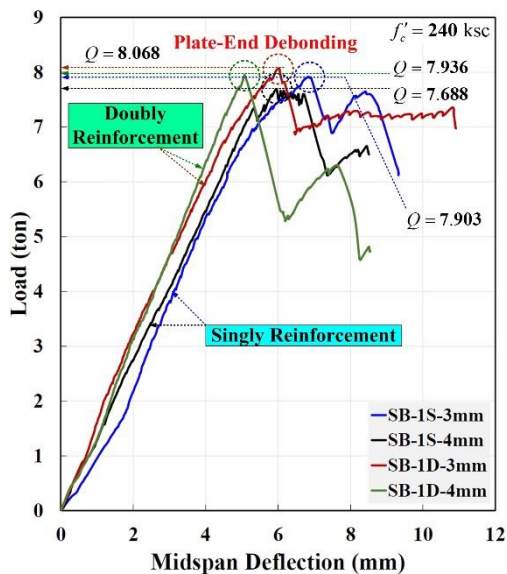
สำหรับภาพที่ 20 และภาพที่ 21 เป็นการแสดงภาพถ่ายตัวอย่างของการหลุดล่อนที่ปลายของแผ่นเหล็กในคานเสริมกำลัง SB-13-3mm และ SB-15-4mm ซึ่งคานเสริมกำลังในทุกตัวอย่างพบว่า มีการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กที่ปลายเพียงด้านใดด้านหนึ่งเท่านั้น โดยการหลุดล่อนเริ่มต้นเกิดขึ้นที่บริเวณปลายของแผ่นเหล็กตรงผิวสัมผัสระหว่างแผ่นเหล็กและผิวคอนกรีตและมีการแผ่ขยายในทิศทางพุ่งเข้าสู่กึ่งกลางความยาวคาน



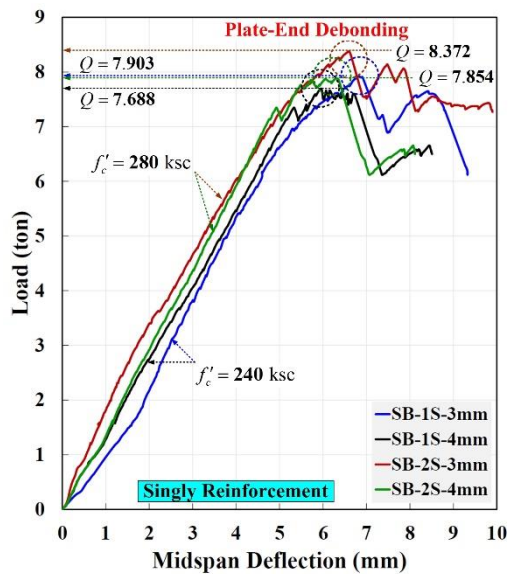
ภาพที่ 20 การหลุดล่อนที่ปลายแผ่นเหล็กของคานเสริมกำลัง SB-1S-3mm



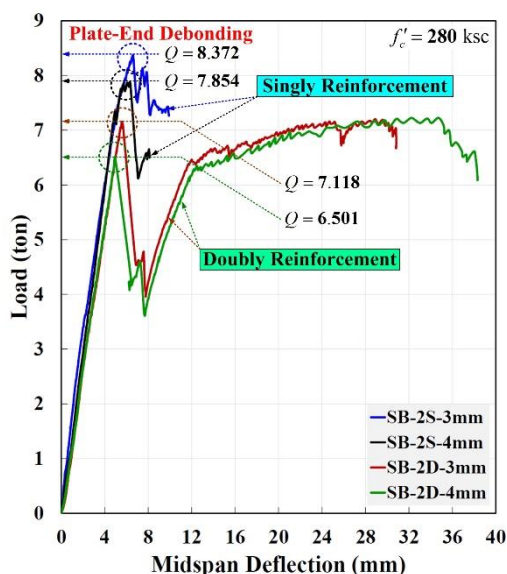
ภาพที่ 21 การหลุดล่อนที่ปลายแผ่นเหล็กของคานเสริมกำลัง SB-1S-4mm



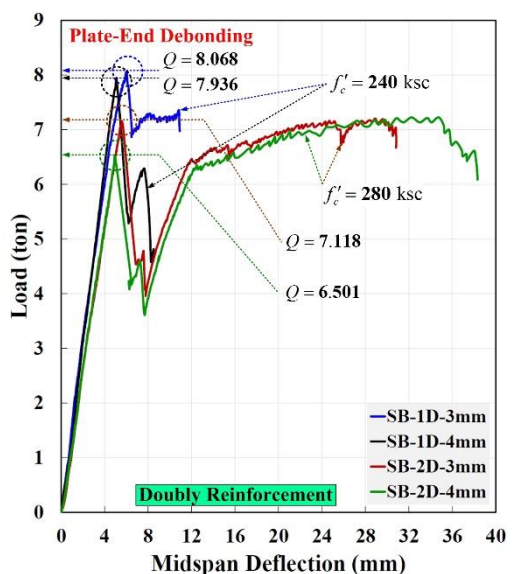
ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำได้และการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานเสริมกำลัง SB-1S-3mm, SB-1S-4mm, SB-1D-3mm และ SB-1D-4mm



ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำได้และการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานเสริมกำลัง SB-1S-3mm, SB-1S-4mm, SB-2D-3mm และ SB-2D-4mm



ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำได้และการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานเสริมกำลัง SB-2S-3mm, SB-2S-4mm, SB-2D-3mm และ SB-2D-4mm



ภาพที่ 25 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำได้และการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานเสริมกำลัง SB-1D-3mm, SB-1D-4mm, SB-2D-3mm และ SB-2D-4mm

ตารางที่ 3 น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยและโมเมนต์ดัดประลัย

| คาน       | $Q_{ult, test}$ (ton) | $M_{ult, test}$ (ton-m) | $M_{ult, mat}$ (ton-m) | $M_{ult, des}$ (ton-m) |
|-----------|-----------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| CB-1S     | 6.776                 | 2.372                   | 2.185                  | 1.630                  |
| SB-1S-3mm | 7.917                 | 2.771                   | 3.828                  | 3.026                  |
| SB-1S-4mm | 7.688                 | 2.691                   | 4.503                  | 3.465                  |
| CB-1D     | 7.213                 | 2.525                   | 1.922                  | 1.402                  |
| SB-1D-3mm | 8.068                 | 2.824                   | 3.409                  | 2.994                  |
| SB-1D-4mm | 7.936                 | 2.778                   | 4.681                  | 3.497                  |
| CB-2S     | 7.219                 | 2.527                   | 2.202                  | 1.649                  |
| SB-2S-3mm | 8.372                 | 2.930                   | 3.873                  | 3.084                  |
| SB-2S-4mm | 7.883                 | 2.759                   | 4.566                  | 3.539                  |
| CB-2D     | 7.760                 | 2.716                   | 1.921                  | 1.401                  |
| SB-2D-3mm | 7.203                 | 2.521                   | 3.409                  | 2.994                  |
| SB-2D-4mm | 7.225                 | 2.529                   | 4.681                  | 3.497                  |

$Q_{ult, test}$  คือ น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากการทดสอบคาน

$M_{ult, test}$  คือ โมเมนต์ดัดประลัยจากการทดสอบคาน

$M_{ult, mat}$  คือ โมเมนต์ดัดประลัยจากค่าการทดสอบวัสดุ

$M_{ult, des}$  คือ โมเมนต์ดัดประลัยจากค่าระบุออกแบบ

#### 4. อภิปรายผลการทดสอบ

การพิจารณาคานควบคุมในภาพที่ 14 และภาพที่ 15 พบว่า เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นทำให้คานน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับภาพที่ 16 ถึงภาพที่ 19 สามารถสังเกตได้ว่า คานน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเมื่อเกิดการหลุดล่อนของคานเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่มีความหนา 3 mm และ 4 mm มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่คานน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กความหนา 3 mm มีค่าสูงกว่าคานเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่มีความหนา 4 mm ในทุกกรณีของคานเสริมกำลังที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวและคานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด แม้ว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มีค่าที่แตกต่างกัน

เพื่อเป็นการสะดวกในการวิเคราะห์ผลลัพท์จากการทดสอบและง่ายต่อการอภิปรายผลในภาพเฉพาะเจาะจงจึงได้ทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวของ

คานเสริมกำลังเพื่อใช้ในการพิจารณาค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนดังแสดงไว้ในภาพที่ 22 ถึงภาพที่ 25

โดยภาพที่ 22 เป็นการเปรียบเทียบในกรณีของคานเสริมกำลังมีการเสริมเหล็กกระหว่างเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวและเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัดที่มีความหนาของแผ่นเหล็กที่ใช้แตกต่างกันด้วยเมื่อคอนกรีตที่ใช้มีกำลังอัดระบุ 240 ksc ส่วนภาพที่ 23 เป็นของคอนกรีตที่มีกำลังอัดระบุ 280 ksc

สำหรับภาพที่ 24 และภาพที่ 25 เป็นการเปรียบเทียบคานน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนของคานเสริมกำลังที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีตที่ใช้และความหนาของแผ่นเหล็กที่ต่างกัน โดยภาพที่ 24 เป็นกรณีของคานเสริมกำลังที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว ส่วนภาพที่ 25 เป็นกรณีของคานเสริมกำลังที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด

ตารางที่ 4 น้ำหนักบรรทุกแตกร้าและโมเมนต์ดัดแตกร้า

| คาน       | $Q_{cr, test}$ (ton) | $M_{cr, test}$ (ton-m) | $M_{cr, mat}$ (ton-m) | $M_{cr, des}$ (ton-m) |
|-----------|----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| CB-1S     | 2.1                  | 1.470                  | 0.536                 | 0.517                 |
| SB-1S-3mm | 2.1                  | 1.470                  | 0.641                 | 0.623                 |
| SB-1S-4mm | 3.1                  | 2.170                  | 0.676                 | 0.657                 |
| CB-1D     | 1.5                  | 1.050                  | 0.523                 | 0.533                 |
| SB-1D-3mm | 2.5                  | 1.750                  | 0.660                 | 0.641                 |
| SB-1D-4mm | 2.4                  | 1.680                  | 0.695                 | 0.677                 |
| CB-2S     | 1.7                  | 1.190                  | 0.556                 | 0.558                 |
| SB-2S-3mm | 2.4                  | 1.680                  | 0.665                 | 0.672                 |
| SB-2S-4mm | 2.4                  | 1.680                  | 0.701                 | 0.710                 |
| CB-2D     | 1.8                  | 1.260                  | 0.573                 | 0.576                 |
| SB-2D-3mm | 2.6                  | 1.820                  | 0.685                 | 0.693                 |
| SB-2D-4mm | 2.7                  | 1.890                  | 0.721                 | 0.731                 |

$Q_{cr, test}$  คือ น้ำหนักบรรทุกแตกร้าสังเกตจากการทดสอบคาน

$M_{cr, test}$  คือ โมเมนต์ดัดแตกร้าสังเกตจากการทดสอบคาน

$M_{cr, mat}$  คือ โมเมนต์ดัดแตกร้าจากค่าการทดสอบวัสดุ

$M_{cr, des}$  คือ โมเมนต์ดัดแตกร้าจากค่าระบุออกแบบ

เมื่อพิจารณาภาพที่ 22 พบว่า ค่าของน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนให้ค่าใกล้เคียงกันสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดระบุ 240 ksc ดังนั้น ความแตกต่างของประเภทการเสริมเหล็กบนหน้าตัดคานไม่มีผลกระทบต่อน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน แต่เมื่อกำลังอัดระบุของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 280 ksc ดังแสดงในภาพที่ 23 พบว่า สามารถเห็นความแตกต่างของน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่คานเสริมกำลังที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียวให้ค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนที่สูงกว่าคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงและรับแรงอัด [10]

ผลกระทบของประเภทการเสริมเหล็กที่แตกต่างกันบนหน้าตัดของคานที่มีค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนได้แสดงไว้ในภาพที่ 24 และภาพที่ 25 สังเกตได้ว่า หน้าตัดคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียวให้ค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนใกล้เคียงกันโดยไม่ขึ้นกับค่ากำลังอัดระบุของ

คอนกรีตดังในภาพที่ 24 แต่ให้ค่าที่แตกต่างกันมากขึ้นเมื่อหน้าตัดมีการเสริมเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัดร่วมกันดังภาพที่ 25

สำหรับผลของความหนาของแผ่นเหล็กที่ใช้ในการเสริมกำลังที่มีผลกระทบต่อค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนพบว่า การใช้แผ่นเหล็กที่หนาจะทำให้ได้ค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนที่ต่ำกว่าการใช้แผ่นเหล็กที่บางในทุกกรณีโดยไม่ขึ้นกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตและประเภทของการเสริมเหล็กบนหน้าตัดคานดังในภาพที่ 22 ถึงภาพที่ 25 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [8]

ตารางที่ 3 แสดงค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ได้จากผลการทดสอบตัวอย่างคานและค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่ได้จากการทดสอบคาน จากการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ค่ากำลังของวัสดุที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณโดยใช้ค่ากำลังระบุออกแบบตามตารางที่ 2 สำหรับตารางที่ 4 แสดงค่าของน้ำหนักบรรทุกแตกร้าและโมเมนต์ดัดแตกร้า

ตารางที่ 5 น้ำหนักบรรทุกต่างๆ จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอนตัว

| คาน       | $Q_{cr}$ (ton) | $Q_y$ (ton-m) | $Q_{ult}$ (ton-m) | $Q_{debond}$ (ton-m) |
|-----------|----------------|---------------|-------------------|----------------------|
| CB-1S     | 1.598          | 5.996         | 6.776             | -                    |
| SB-1S-3mm | -              | -             | -                 | 7.903                |
| SB-1S-4mm | -              | -             | -                 | 7.688                |
| CB-1D     | 1.320          | 6.232         | 7.213             | -                    |
| SB-1D-3mm | -              | -             | -                 | 8.068                |
| SB-1D-4mm | -              | -             | -                 | 7.936                |
| CB-2S     | 1.710          | 6.360         | 7.219             | -                    |
| SB-2S-3mm | -              | -             | -                 | 8.372                |
| SB-2S-4mm | -              | -             | -                 | 7.854                |
| CB-2D     | 1.656          | 6.466         | 7.760             | -                    |
| SB-2D-3mm | -              | 6.415         | 7.203             | 7.118                |
| SB-2D-4mm | -              | 6.325         | 7.225             | 6.501                |

$Q_{cr}$  คือ น้ำหนักบรรทุกทุกแตกร้าว

$Q_y$  คือ น้ำหนักบรรทุกคราก

$Q_{ult}$  คือ น้ำหนักบรรทุกทุกประลัย

$Q_{debond}$  คือ น้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน

จากตารางที่ 3 พบว่า ค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากการทดสอบคานและค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่คำนวณจากค่าการทดสอบวัสดุให้ค่าสอดคล้องกันเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่คำนวณจากค่าการทดสอบวัสดุและค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากค่าระบุออกแบบพบว่า ค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่คำนวณจากค่าการทดสอบวัสดุให้ค่าที่สูงกว่าในทุกกรณีของคาน

สำหรับค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าวที่แสดงไว้ในตารางที่ 4 พบว่า ค่าที่ได้จากการทดสอบคานให้ค่าสูงกว่าประมาณ 2-3 เท่า ของค่าที่ได้จากค่าการทดสอบวัสดุและจากค่าระบุออกแบบ โดยที่ค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าวจากค่าการทดสอบวัสดุและจากค่าระบุออกแบบให้ค่าใกล้เคียงกันมาก

ตารางที่ 5 แสดงค่าน้ำหนักบรรทุกทุกแตกร้าว น้ำหนักบรรทุกครากและน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของคานควบคุมและคาน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กสำหรับคานเสริมกำลัง สังเกตว่า ค่า

น้ำหนักบรรทุกครากและน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยในคาน SB-2D-3mm และ SB-2D-4mm มาจากการให้น้ำหนักบรรทุกกระทำเพิ่มเติมหลังจากคานเกิดการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กเพื่อศึกษาพฤติกรรมของคานเสริมกำลังภายหลังจากการวิบัติแบบหลุดล่อนโดยค่าต่างๆ ที่ได้แสดงไว้ในตารางนั้นได้มาจากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอนตัวของตัวอย่างคานทดสอบ

## 5. สรุป

จากการทดสอบตัวอย่างคานที่ใช้ในการศึกษาพบว่า คานควบคุมซึ่งเป็นคานคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมปริมาณน้อยเกิดการวิบัติจากการบดอัดแตกของคอนกรีตและมีพฤติกรรมการวิบัติเป็นแบบเหนียวเนื่องจากเหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการคราก ส่วนคานที่มีการเสริมกำลังจากภายนอกโดยการยึดติดแผ่นเหล็กที่ผิวด้านรับแรงดึงของคอนกรีตด้วยวัสดุประสานอีพ็อกซี พบว่า เกิดการวิบัติจากการหลุด

ล่อนบริเวณปลายของแผ่นเหล็กในทุกตัวอย่างคานซึ่งเป็นการวิบัติแบบทันทีทันใดและคานมีพฤติกรรมเป็นแบบเปราะเพราะเหล็กเสริมรับแรงดึงไม่เกิดการครากโดยสังเกตได้จากค่าการแอ่นตัวของคานที่มีค่าน้อยเมื่อเกิดการหลุดล่อนของแผ่นเหล็ก ประเภทของการเสริมเหล็กบนหน้าตัดคานไม่มีผลกระทบต่อคาน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนเมื่อใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดน้อย แต่เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นพบว่า คานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวให้คาน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนที่สูงกว่าคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงร่วมกับเหล็กเสริมรับแรงอัด สำหรับผลของความหนาแผ่นเหล็กที่มีต่อคาน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนพบว่า การใช้แผ่นเหล็กที่บางให้คาน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนที่สูงกว่าการใช้แผ่นเหล็กที่หนาโดยไม่ขึ้นกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตและประเภทของการเสริมเหล็กบนหน้าตัดคาน ดังนั้นการเสริมกำลังให้กับคานด้วยวิธีการนี้ควรพิจารณาผลของการวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กเป็นประการสำคัญซึ่งทำให้ความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกภายนอกมีไม่เต็มประสิทธิภาพแม้ว่าคาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานเสริมกำลังโดยส่วนใหญ่ให้ค่าที่สูงกว่าคานควบคุมแต่ไม่มากนักและมีการวิบัติแบบทันทีทันใดซึ่งเป็นการวิบัติที่ไม่พึงประสงค์ในมุมมองของความสามารถในการใช้งานได้ ในปัจจุบันนี้ การเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นและมีความสามารถในการเพิ่มการรับน้ำหนักบรรทุกให้กับคานที่สูง อย่างไรก็ตาม ปัญหาของการหลุดล่อนยังคงเป็นปัญหาหลักที่ต้องมีการพิจารณา [19,20]

## 6. อ้างอิง

- [1] Nilson AH, Winter G. Design of Concrete Structures. 11<sup>th</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill Inc.; 1991.
- [2] Nawy EG. Reinforced Concrete: A fundamental Approach. 4<sup>th</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall Inc.; 2000.
- [3] Reid ILK. Concrete Bridge Strengthening and Repair. London: Thomas Telford Ltd.; 2009.
- [4] Oehlers DJ, Bradford MA. Composite Steel and Concrete Structural Members: Fundamental Behaviour. Oxford: Elsevier Science Ltd.; 1995.
- [5] Holloway LC, Leeming MB. Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering. Cambridge: Woodhead Publishing; 2001.
- [6] Oehlers DJ, Seracino R. Design of FRP and Steel Plated RC Structures: Retrofitting Beams and Slabs for Strength, Stiffness and Ductility. Oxford: Elsevier Ltd.; 2004.
- [7] Jones R, Swamy RN, Ang TH. Under- and over-reinforced concrete beams with glued steel plates. Int J Cem Compos Lightweight Concr. 1982; 4: 19-32.
- [8] Eberline DK, Klaiber FW, Dunker K. Bridge strengthening with epoxy-bonded steel plates. Transp Res Rec. 1988; 1180: 7-11.
- [9] Oehlers DJ. Reinforced concrete beams with plates glued to their soffits. J Struct Eng. 1992; 118: 2023-38.
- [10] Ziraba YN, Baluch MH. Computational model for reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plates. Finite Elem Anal Des. 1995; 20: 253-71.
- [11] Li A, Assih T, Delmas Y. Influence of the adhesive thickness and steel plate thickness on the behaviour of strengthened concrete beams. J Adhes Sci Technol. 2000; 14: 1639-56.

- [12] Teng JG, Yao J. Plate end debonding failures of FRP-or steel-plated RC beams: A new strength model. Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, 2005 December 7-9, Hong Kong, 283-90, 2005.
- [13] Jumaat MZ, Alam MA. Experimental and analytical investigations on the structural behaviour of steel plate and CFRP laminate flexurally strengthened reinforced concrete beams. *J Appl Sci*. 2008; 8: 4383-9.
- [14] Chang X, Yan A, Tang C. Numerical simulation of mixed-mode crack induced failure of steel plate strengthened concrete beam. *Adv Mat Res*. 2011; 152-3: 171-4.
- [15] Ozbek E, Bocek M, Aykac S. Strengthening of RC beams with solid steel plates. *Athens J Technol Eng*. 2016; 3: 291-8.
- [16] Yannian Z, Jun X, Liu W. Experimental study on RC T-section beams strengthened with bottom steel plates. *Jordan J Civ Eng*. 2018; 12: 502-15.
- [17] Abtan YG. Effective length and area of bolted steel plates attached externally to strengthen reinforced concrete beams. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2020; 737: 012012.
- [18] Wojtczak E, Rucka M, Knak M. Detection and Imaging of Debonding in Adhesive Joints of Concrete Beams Strengthened with Steel Plates Using Guided Waves and Weighted Root Mean Square. *Materials*. 2020; 13: 2167.
- [19] Thamrin R, Zaidir Z, Desharma S. Debonding failure analysis of reinforced concrete beams strengthened with CFRP plates. *Polymers*. 2021; 13: polym 13162738.
- [20] Zhou B, Wu R-Y, Yin S. Stress field approach for prediction of end concrete cover separation in RC beams strengthened with FRP reinforcement. *Polymers*. 2022; 14: polym14050988

# กำลังเชิงดัดของการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับแรงดึง ด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนยึดติดจากภายนอก Flexural Strength of Singly Reinforced Concrete Beams Strengthening with Externally Bonded Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates

วิกิร โตวราพงศ์<sup>1</sup>, ธนัตศักดิ์ ธีระเกตุ<sup>1</sup>, ดามอง ดี<sup>2</sup>, ปฎิภาณ จันทรวิชิต<sup>3\*</sup>,  
วิษเนศ วงศ์วานิชวัฒนา<sup>1</sup>, สัจจา บุญยฉัตร<sup>4</sup>, ยศ สมพรเจริญสุข<sup>1#</sup>  
Vigone Tovarapong<sup>1</sup>, Thanutsak Theeraket<sup>1</sup>, Damang Dy<sup>2</sup>, Patiphan Chantarawichit<sup>3\*</sup>,  
Wikhanes Wongwanishwatana<sup>1</sup>, Sutja Boonyachut<sup>4</sup>, Yos Sompornjaroensuk<sup>1#</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร

<sup>2</sup>กรมตรวจคนเข้าเมืองทั่วไป กระทรวงการภายใน พนมเปญ กัมพูชา

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร

<sup>4</sup>กรรมการสภา สมาคมวิชาการแห่งอาเซียนทางวิศวกรรมและเทคโนโลยี กัวลาลัมเปอร์ มาเลเซีย

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, School of Engineering and Industrial Technology  
Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand

<sup>2</sup>General Department of Immigration, Ministry of Interior, Phnom Penh, Cambodia

<sup>3</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering  
Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok, Thailand

<sup>4</sup>Council Member, ASEAN Academy of Engineering and Technology, Kuala Lumpur, Malaysia

\*Major corresponding author. E-mail: patiphan.c@mail.rmutk.ac.th

#Minor corresponding author. E-mail: syossyos@mut.ac.th

## บทคัดย่อ

ปรากฏการณ์ที่ไม่พึงปรารถนาของการวิบัติจากการหลุดล่อนโดยเริ่มต้นที่บริเวณปลายของแผ่น FRP เป็นสาเหตุทำให้แผ่น FRP ลอกออกก่อนที่จะนำหน้ากับรทุกอกแบบจะเข้าสู่ค่าที่เหมาะสมดังที่ได้คาดการณ์ไว้ ใน การศึกษาเชิงทดลองนี้คำนึงถึงการตอบสนองเชิงดัดและความสามารถด้านกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับ แรงดึงอย่างเดียวยที่เสริมกำลังโดยการยึดติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ภายนอกคานด้วยอีพ็อก ซีร์วมกับการจัดเตรียมการรัดที่ปลายของแผ่นทั้ง 4 ด้านของหน้าตัดคาน วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้มี 2 ประการ ประการแรกคือเพื่อศึกษาความสามารถในการแบกรับน้ำหนักบรรทุกและพฤติกรรมการแอ่นตัวของ คานและประการที่สองคือเพื่อทดสอบผลกระทบของตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกกระทำและกำลังของคอนกรีตที่มี ผลต่อคานเสริมกำลัง ผลลัพธ์จากการทดสอบนำเสนอในรูปแบบของกราฟในพจน์ของความสัมพันธ์ระหว่างแรง กระทำและการแอ่นตัว น้ำหนักบรรทุกแตกกร้าวแรกและน้ำหนักบรรทุกประลัยสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กหา ได้จากทั้งการทดลองและการคำนวณเชิงทฤษฎี นอกจากนี้ น้ำหนักบรรทุกครากและน้ำหนักบรรทุกจากการหลุด ล่อนสามารถสังเกตและหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวสำหรับคานควบคุมและ คานเสริมกำลังตามลำดับ

Received 18-05-2022  
Revised 01-08-2022  
Accepted 09-10-2022

**คำสำคัญ :** พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน การวิบัติจากการหลุดล่อน การยึดติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากภายนอก การเสริมกำลังดัด คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ความสามารถด้านกำลัง

## ABSTRACT

The undesired phenomenon of debonding failure initiated at the ends of the FRP plates can cause these bonded FRP plates to peel off before the design load is reached to the expected appropriate value. In this experimental study, it is concerned with the flexural response and strength capacity of the singly reinforced concrete beams strengthened by externally epoxy bonded carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) plates together with providing plate-end wrapping on four sides of the beam section. The objective of the study has two-fold. The first is to investigate the load carrying capacity and deflection behavior of the beams and the second is to examine the effects of applied load position and concrete strength on the strengthened beams. The tested results are presented graphically in terms of load-deflection relationships. The first cracking load and the ultimate load for reinforced concrete beams are determined from both experiments and theoretical calculations. Furthermore, the yielding load and debonding load can be observed and obtained from the load-deflection relationships for control beams and strengthened beams, respectively.

**Keyword:** Carbon fiber-reinforced polymer: Debonding failure: Externally bonded FRP plate: Flexural strengthening: Reinforced concrete beam: Strength capacity

## 1. บทนำ

กลไกสำคัญที่ทำให้องค์อาคารของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีกำลังในการต้านทานต่อน้ำหนักบรรทุกกระทำจากภายนอกที่ได้ประเมินเอาไว้แล้วในขั้นตอนของการออกแบบโครงสร้างหรือส่วนหนึ่งส่วนใดของโครงสร้างนั้นคือ คอนกรีตทำหน้าที่ในการรับแรงอัดส่วนเหล็กเสริมทำหน้าที่ในการรับแรงดึง ทั้งนี้เนื่องมาจากคอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงอัดที่สูงแต่มีความสามารถในการรับแรงดึงที่ต่ำ ส่วนของเหล็กเสริมนั้นมีความสามารถในการรับแรงดึงและแรงอัดที่สูง ดังนั้นเมื่อนำข้อดีของวัสดุทั้งสองมารวมกันทำหน้าที่ในการแบกรับน้ำหนักบรรทุกในบริเวณหรือตำแหน่งที่เหมาะสมจะทำให้ได้โครงสร้างที่มีความปลอดภัยและประหยัด [1-3] เมื่อองค์

อาคารของโครงสร้างมีการชำรุดหรือมีความเสียหายเกิดขึ้น การซ่อมแซมหรือการเสริมกำลังจึงมีความจำเป็นเพื่อให้โครงสร้างนั้นกลับมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพดังเดิม เนื่องจากความก้าวหน้าทางด้านวัสดุศาสตร์ร่วมกับการศึกษาวิจัยและการประยุกต์ความรู้ในเชิงวิศวกรรมโครงสร้างทำให้การเสริมกำลังจากภายนอกด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (fiber-reinforced polymer: FRP) ในรูปแบบแผ่น (FRP plate) ได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบันด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้คือ FRP เป็นวัสดุที่มีค่ากำลังรับแรงดึงและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นสูง มีน้ำหนักเบา สามารถผลิตให้มีขนาดตามความต้องการ สะดวกต่อการขนส่งและการติดตั้ง และทนต่อการกัดกร่อน [4-8]

ผลจากการศึกษาวิจัยต่าง ๆ ที่มีมาในอดีตทำให้มีการพัฒนาแนวทางในการออกแบบการเสริมกำลังจากภายนอกด้วยการยึดติดแผ่น FRP ได้อย่างปลอดภัย [9] และสามารถใช้นำมาพยากรณ์พฤติกรรมเชิงโครงสร้างได้อย่างถูกต้องเพียงพอ การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วัสดุ FRP ในการเสริมกำลังโครงสร้างได้มีการศึกษากันอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบัน Chajes, Thomson, Januszka และ Finch [10] ศึกษาผลของการเสริมกำลังจากภายนอกในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล) โดยทำการยึดติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอารามิด (aramid FRP) เส้นใยแก้ว (glass FRP) และเส้นใยแกรไฟท์ (graphite FRP) ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าความสามารถเชิงดัดของคาน (flexural capacity) เพิ่มขึ้น 36-57% และค่าความแกร่งเชิงดัด (flexural stiffness) เพิ่มขึ้น 45-53% นอกจากนี้ยังพบว่า มีการวิบัติแบบฉีกขาด (rupture failure) เกิดขึ้นในกรณีของการเสริมด้วยแผ่น glass FRP และ graphite FRP ในอาณาบริเวณของคานที่มีโมเมนต์ดัดสูงสุด (maximum moment region) ส่วนการวิบัติแบบบดอัดแตกในคอนกรีตเกิดขึ้นกับการเสริมด้วยแผ่น aramid FRP

Varastehpour และ Hamelin [11] แนะนำแบบจำลองเชิงวิเคราะห์แบบการวนซ้ำ (iterative analytical model) มาใช้จำลองพฤติกรรมการยึดเกาะและเลื่อนไถล (bond-slip) และความไร้เชิงเส้นของวัสดุ (material nonlinearity) ที่อยู่บนพื้นฐานความเข้ากันได้ของการเสียรูปร่าง (compatibility of deformations) และสมดุลของแรง (equilibrium of forces) เพื่อการทำนายค่าแรงปฏิกิริยา การแอ่นตัว และความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งงอ (moment-curvature relationships)

Ramana, Kant, Morton และคณะ [12] ได้พิจารณาผลของตึกรังในการเสริมกำลัง (degree of strengthening) ของคาน คสล ด้วยการติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) โดยทำการทดสอบคานภายใต้ผลของการให้แรงกระทำแบบควบคุมการ

เคลื่อนที่ (displacement control) จากการศึกษาพบว่า กำลังเชิงดัด (flexural strength) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อความกว้างของแผ่นเสริมกำลัง (plate width) เพิ่มขึ้น ส่วนผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี (theoretical analysis) ที่อยู่บนพื้นฐานของความเข้ากันได้ของความเครียดพบว่า สามารถนำมาใช้ทำนายกำลังปฏิกิริยาและพฤติกรรมระหว่างค่าโมเมนต์และค่าการแอ่นตัวของคานได้ Azevedo, Juvandes และ Henriques [13] ทำการศึกษาโดยเปรียบเทียบเกณฑ์การออกแบบระหว่างแนวทางของ ACI และ FIB ในแผ่นพื้น คสล ที่ทำการเสริมกำลังจากภายนอกด้วยแผ่น FRP พบว่า การทำนายความสามารถเชิงกำลังของเกณฑ์การออกแบบทั้งสองให้ผลลัพธ์ที่คล้ายกันและให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการประยุกต์ใช้ค่าตัวประกอบปรับลดกำลัง (strength reduction factors) ของวัสดุ FRP ตามคำแนะนำของ ACI พบว่าให้ค่าความสามารถเชิงกำลังใกล้เคียงมากกับผลการทดสอบ

Rosenboom และ Rizkalla [14] ศึกษาผลของการหลุดล่อนอันเนื่องมาจากการเกิดขึ้นของรอยร้าวภายในคาน (intermediate crack debonding: IC debonding) และเสนอแบบจำลองสำหรับทำนายค่าตรวจวัดที่ได้จากการทดสอบสำหรับคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่วงพาดยาว (long-span prestressed concrete beam) ที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP แต่ไม่มีการโอบรัดด้วยแถบรูปตัวยู (U-wraps) พบว่า การวิบัติที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปเป็นแบบการหลุดล่อนเนื่องจากรอยร้าวภายใน (IC debonding) และเมื่อมีการใช้แถบ U-wraps ตลอดความยาวคานพบว่า สามารถเพิ่มความเครียดดึง (tensile strain) ในแผ่น CFRP ได้อีกประมาณ 20% ของการเกิดการวิบัติแบบ IC debonding

Perera และ Bueso-Inchausti [15] นำเสนอวิธีการสเปกตรัล (spectral method) มาประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาเชิงสถิตย์และเชิงพลศาสตร์ (static and dynamic problems) ของ

การศึกษาพฤติกรรมคาน คสล เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP พบว่า ปัญหาที่พิจารณานั้นสามารถทำการจำลองการวิบัติแบบหลุดล่อนด้วยแบบจำลองเชิงกล (mechanical modeling) ได้โดยทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริม สำหรับผิวสัมผัสระหว่างแผ่น FRP และคอนกรีตได้ทำการจำลองโดยการใช้กฎการยึดเกาะและการเลื่อนไถลเฉพาะที่แบบ 2 เส้นตรง (bilinear local bond-slip law) Hamed และ Bradford [16] ศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าวเชิงคดที่แปรผันตามเวลา (time-dependent flexural cracking behavior) และพฤติกรรมภายหลังการแตกร้าว (post-cracking behavior) ของคาน คสล ที่เสริมกำลังด้วยการติดแผ่น FRP ภายนอก โดยสนใจผลกระทบจากการคืบ (creep) อีกทั้งได้ทำการพัฒนาแบบจำลองเชิงทฤษฎีที่มีการพิจารณารวมผลของการคืบ ผลการแตกร้าวที่แปรผันตามเวลาและผลของการเกิดปรากฏการณ์การเกร็งตัวเพิ่มขึ้นจากการดึง (tension-stiffening phenomenon) นอกจากนี้ ได้พิจารณาผลการเสียรูปได้ของชิ้นวัสดุประสานจากการเชื่อมตลอดความหนาในแบบจำลอง Bykov และ Kalugin [17] นำเสนอแบบจำลองด้วยวิธีการอย่างง่ายสำหรับการคำนวณหาความเครียดหลุดล่อนของแผ่น FRP (FRP debonding strain) และทำการประเมินความน่าเชื่อถือ (reliability assessment) โดยได้มีการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองในอดีต จากนั้นได้มีการนำเสนอสูตรการคำนวณค่าที่ใช้ในการออกแบบ (design value) สำหรับค่าความเครียดหลุดล่อนใน FRP

Ding, Wang, Huang และ Chen [18] สนใจศึกษาและพิจารณาผลของความยาวแผ่น CFRP ที่มีผลต่อรูปแบบการวิบัติ (failure mode) รูปแบบรอยร้าว (crack pattern) และการแผ่ขยายของรอยร้าว (crack propagation) ในคานเสริมกำลังที่มีรอยบากเริ่มแรก (initial notch) อยู่ก่อน ผลการศึกษาพบว่า คานเสริมกำลังมีการปรับปรุงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นได้ และรูปแบบการวิบัติมีความ

แตกต่างกันไปตามความยาวของแผ่น CFRP ที่ใช้ และเมื่อพิจารณากรณีที่ปลายของแผ่น CFRP อยู่ห่างจากฐานรองรับเป็นระยะ 0.10 ม พบว่า มีการรูปแบบการวิบัติการรอยร้าวเอียง (inclined crack) ที่ปลายแผ่น CFRP และเมื่อปลายอยู่ห่างจากฐานรองรับเป็นระยะ 0.10 – 0.30 ม พบว่า รูปแบบการวิบัตินั้นเกิดจากการแผ่ขยายของรอยร้าวเล็กๆ (smeared crack propagation) ตรงบริเวณที่มีรอยบากเริ่มแรกไปตามแนวผิวสัมผัสของแผ่น CFRP Bennegadi, Hadjazi, Sereir และคณะ [19] ได้เสนอแบบจำลองเพื่อทำนายการกระจายของความเค้นเฉือนและความเค้นดัดฉากที่ผิวสัมผัสจากการเกิดรอยร้าวตัดภายในแผ่น FRP ของคานเสริมกำลัง โดยในแบบจำลองเชิงทฤษฎีได้ใช้สมมติฐานของกฎการยึดเกาะและการเลื่อนไถลแบบ 2 เส้นตรงสำหรับการหลุดล่อนจากรอยร้าวภายในแผ่น (intermediate crack-induced debonding) จากผลลัพธ์ที่ได้พบว่า เมื่อความหนาของแผ่น FRP เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกของคานเสริมกำลังเพิ่มขึ้น การพิจารณาค่าน้ำหนักบรรทุกที่ขีดจำกัดในขั้นตอนของการอ่อนตัว (softening) ของคอนกรีตและการหลุดล่อน (debonding) ของแผ่น FRP พบว่า มีค่ามากกว่าในกรณีที่พิจารณาผลของความหนาของแผ่น FRP ในแบบจำลอง

Mostafa และ Razaqpur [20] ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลศาสตร์ไร้เชิงเส้น LS-DYNA วิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมหลังเกิดการหลุดล่อนของแผ่น FRP (post delamination behavior) ในคาน คสล ที่เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP และทำการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ พบว่า ถึงแม้ว่าคานจะมีการเกิดการหลุดล่อนขึ้นมาบางส่วน (partial delamination) ซึ่งเป็นผลนำไปสู่การลดลงของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน แต่เมื่อการเสียรูปมีการเพิ่มมากขึ้นต่อไปอีก พบว่า คานมีการเพิ่มค่าขึ้นของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้อีกภายใต้การเพิ่มค่าของการเสียรูปที่มีค่ามาก (large deformation) ซึ่งพฤติกรรมเช่นนี้บ่งชี้ว่าคานมีความเหนียวที่ดี โดยที่การรายงานผล

การศึกษาในอดีตนั้น ส่วนใหญ่ได้ระบุไว้ว่าคานามีพฤติกรรมเป็นแบบเปราะ (brittle behavior)

Nguyen- Minh, Phan- Vu, Tran- Thanh และคณะ [21] ทำการศึกษาพฤติกรรมเชิงดัดของคาน คสล ที่ทำการอัดแรงก่อนแบบไม่มีการยึดเกาะ (unbonded post-tensioned concrete beam) และมีการเสริมกำลังจากภายนอกด้วยแผ่น CFRP ผลการศึกษา พบว่า อัตราส่วนของปริมาณการเสริมแผ่น FRP มีผลในการควบคุมความสามารถเชิงดัด ความกว้างรอยร้าว (crack width) การแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน (mid-span deflection) และความเหนียว (ductility) ของคาน ซึ่งประสิทธิภาพของการเสริมกำลัง (strengthening efficiency) มีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มจำนวนชั้นของแผ่น CFRP นอกจากนี้แล้ว การเพิ่มตัวจับยึด (anchorage) ด้วยแถบ CFRP รูปตัวยู (U-wrapped anchors) ในบริเวณช่วงการเฉือน (shear span) ส่งผลกระทบต่อรูปแบบการวิบัติและพฤติกรรมของคานเสริมกำลัง

Chen, Wang, Sui และคณะ [22] ได้ศึกษาเชิงทดลองและสร้างแบบจำลองเชิงวิเคราะห์มาใช้ศึกษาอิทธิพลของความหนาของแผ่น FRP และผลกระทบของการโอบรัด (confining effect) ที่มีต่อสมรรถนะเชิงดัด (flexural performance) ของคานที่เสริมกำลังโดยใช้การยึดเกาะแบบผสม (hybrid bonded: HB) ผลลัพธ์จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของแผ่น FRP เพิ่มขึ้นและมีการโอบรัดที่มาก เมื่อพิจารณาสมรรถนะด้านความเหนียว (ductility performance) พบว่า จะให้ค่าดีที่สุดเมื่อพบการหลุดออกของตัวจับยึด (fastener detachment) ไปพร้อมกันกับการฉีกขาดของแผ่น FRP ต่อมา Zhou, Guo, Wang และคณะ [23] เสนอการแก้ปัญหาการหลุดลอกและพัฒนาการใช้ระบบสมอจับยึดที่ปลายแบบผสมเชิงนวัตกรรม (innovative hybrid end-anchorage system) ในการจับยึดได้ด้วยตัวเอง (self-locking) ของแผ่น CFRP ที่ยึดติดจากภายนอก (externally bonded CFRP sheets) จากผลการ

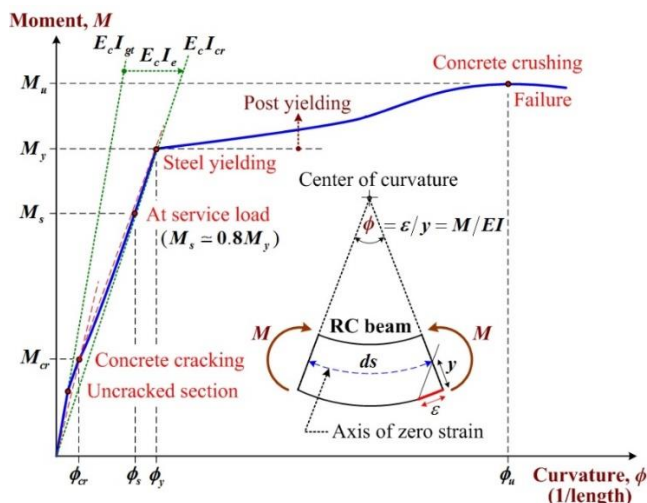
ทดลองพบว่า การใช้แผ่น CFRP ที่มีแถบกว้างส่งผลต่อการเสริมกำลังที่มากขึ้นโดยเฉพาะเมื่อกำลังของคอนกรีตที่ใช้มีค่าสูงขึ้น Al-Negheimish, El-Sayed, Al-Saawani และ Alhozaimy [24] ศึกษาผลกระทบของปริมาณเหล็กปลอก (steel stirrups) ที่ส่งกระทบต่อค่าน้ำหนักบรรทุกทุกวิบัติแบบหลุดลอกที่ปลายแผ่น (plate-end debonding failure load) ของคานเมื่อเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP จากผลการศึกษาพบว่า คาน คสล ที่เสริมกำลังและมีปริมาณของเหล็กปลอกมาก (large amounts of stirrups) เกิดการวิบัติจากการหลุดลอกที่ปลายแผ่นเนื่องจากการแยกตัวออกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ในขณะที่คานเสริมกำลังและมีปริมาณเหล็กปลอกที่น้อย (lower amounts of stirrups) พบการวิบัติจากการหลุดลอกระหว่างผิวสัมผัสที่ปลายแผ่น หรือมีการวิบัติจากการหลุดลอกอื่นเนื่องมาจากรอยร้าวทแยงวิกฤติ (critical diagonal crack-induced debonding failure)

เมื่อไม่นานมานี้ Zhou, Wu และ Yin [25] นำเสนอสนาความเค้นเชิงนวัตกรรมที่อยู่บนพื้นฐานของแนวทางเชิงวิเคราะห์ (innovative stress filed-based analytical approach) เพื่อใช้ประเมินกำลังวิบัติของการแยกตัวออกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมบริเวณปลายแผ่น ร่วมกับการใช้แนวทางเชิงวิเคราะห์ของหน้าตัดขยาย (extended sectional analytical approach) ที่ได้พิจารณารวมผลขององค์ประกอบความเครียดดึงประสิทธิภาพของ FRP (components of effective tensile strain of FRP) ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการดัดและการเฉือนมาทำการประเมินความสามารถของคานเสริมกำลัง

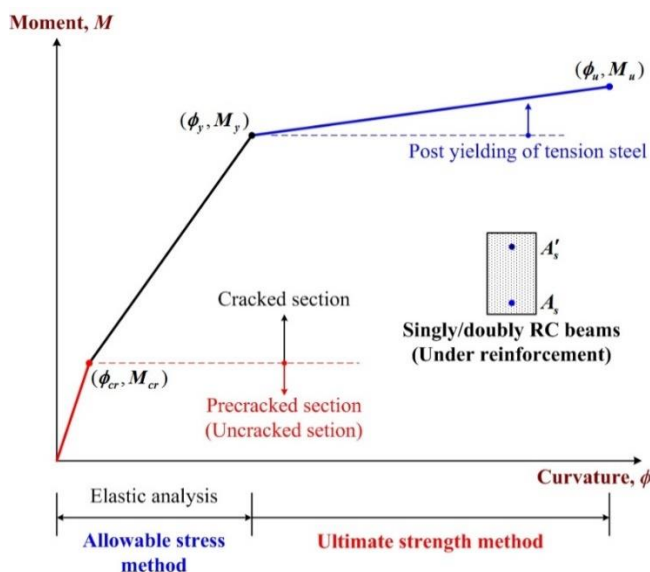
ก่อนการพิจารณาทำการเสริมกำลังให้กับองค์อาคารในส่วนหนึ่งส่วนใดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจำเป็นต้องทราบถึงพฤติกรรมภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกจากภายนอกขององค์อาคารนั้น ทั้งนี้เพื่อที่จะได้ทำการเสริมกำลังในตำแหน่งที่เหมาะสมและทำให้การเสริมกำลังมีประสิทธิภาพอย่างเต็มที่

สำหรับการเสริมกำลังให้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น คาน คสล เป็นองค์อาคารที่ใช้ต้านทานโมเมนต์ดัดเป็นหลักเนื่องจากผลของน้ำหนักบรรทุกกระทำตั้งฉากกับความยาวคาน โดยทำการออกแบบหน้าตัดคานให้มีอัตราส่วนของปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมที่สภาวะสมดุลของแรงอัดจากคอนกรีตและแรงดึงจากเหล็กเพราะต้องการให้

คาน คสล แสดงพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวเกิดขึ้นคือต้องการให้เหล็กเสริมเกิดการยืดตัวมากหรือที่เรียกว่าการคราก (yielding) ก่อนที่จะมีการวิบัติจากการบดอัดแตกของคอนกรีต (concrete crushing) ที่เป็นการวิบัติแบบเปราะเพื่อส่งสัญญาณเตือนในระหว่างการใช้งานองค์อาคารให้รับทราบก่อนเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด [2,3]



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งงอของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งงอแบบ 3 เส้นตรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

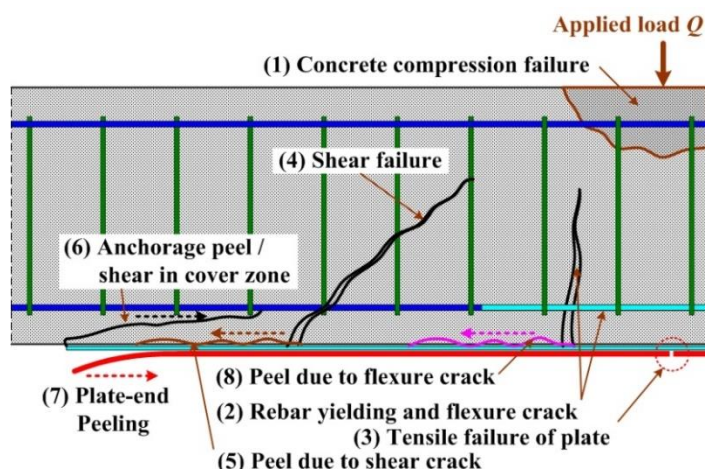
พฤติกรรมโดยทั่วไปของคาน คสล ที่มีปริมาณการเสริมเหล็กน้อยสามารถแสดงได้ในความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัด ( $M$ ) และความโค้ง ( $\phi$ ) ดังภาพที่ 1 [3] ซึ่งเมื่อภายหลังจากที่เหล็กเสริมมีการครากเกิดขึ้นสามารถสังเกตได้ว่า ค่าความโค้งจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากภายใต้การเพิ่มขึ้นของโมเมนต์ดัดที่น้อย โดยที่ค่าความโค้งนี้สัมพันธ์กับปริมาณการแอ่นตัวของคาน สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของคาน คสล นั้น โดยส่วนใหญ่นิยมใช้แบบจำลองพฤติกรรมอย่างง่ายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งในรูปแบบ 3 เส้นตรง (tri-linear model) ดังภาพที่ 2 [2,3]

สำหรับการพิจารณาการเสริมกำลังให้กับคาน คสล โดยใช้วิธีการยึดติดแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากภายนอกคาน (externally bonded FRP plates) ด้วยอีพ็อกซีเรซิน (epoxy resin adhesive) พบว่า คานที่ได้รับการเสริมกำลังยังคงมีการปรากฏพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกับคาน คสล ก่อนทำการเสริมกำลังหากได้รับการพิจารณาทำการออกแบบได้อย่างเหมาะสม โดยให้คานเสริมกำลังมีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวเกิดขึ้นก่อนมีการวิบัติเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์

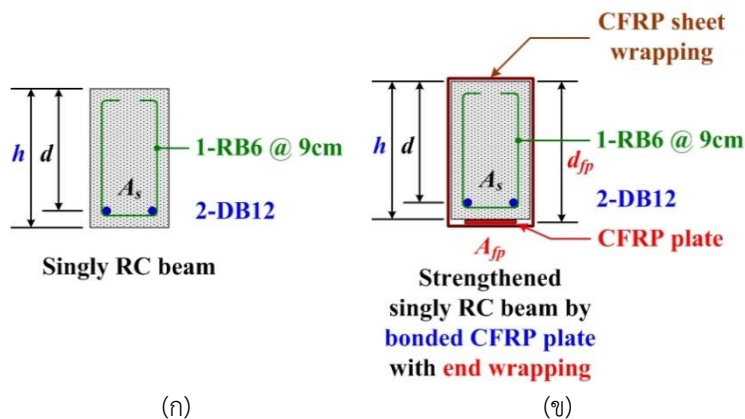
จากผลการวิจัยในอดีตที่ได้ทำการศึกษามาอย่างต่อเนื่องสามารถทำการสรุปรูปแบบของการ

วิบัติที่อาจจะเป็นได้ในรูปแบบต่าง ๆ ของคาน คสล ที่มีการเสริมกำลังจากภายนอกด้วยวิธีการที่ได้กล่าวถึงนี้แสดงในภาพที่ 3 [4] โดยที่การวิบัติในรูปแบบที่ 6 (การลอกออกที่ปลายแผ่น) และรูปแบบที่ 7 (การลอกออกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม) ดังแสดงไว้ในภาพนั้นเป็นการวิบัติก่อนเวลากำหนด (premature failures) ซึ่งส่งผลให้การเสริมกำลังให้กับคาน คสล มีการใช้งานได้อย่างไม่เต็มประสิทธิภาพและที่สำคัญมากประการหนึ่งคือ เป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นในแบบทันทีทันใดโดยคานเสริมกำลังมีพฤติกรรมแบบเปราะ [5-8] ดังนั้นการศึกษาวิจัยส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นศึกษาเพื่อทำการแก้ปัญหาต่างๆ เหล่านี้

สำหรับวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและพฤติกรรมการตอบสนองของคานเสริมกำลัง อีกทั้งศึกษาถึงผลกระทบของตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำและค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีต่อคาน โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ได้มีการนำเสนอไว้ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำและค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบ รวมไปถึงการระบุหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำในสถานะต่างๆ และมีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณเชิงทฤษฎี



ภาพที่ 3 รูปแบบการวิบัติที่อาจเกิดขึ้นได้ของคานเสริมกำลัง



ภาพที่ 4 ตัวอย่างคานทดสอบ (ก) คานควบคุมและ (ข) คานเสริมกำลัง

## 2. วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

แผนดำเนินการศึกษาวิจัยประกอบไปด้วย (1) ขั้นตอนของการออกแบบการศึกษาเชิงทดลอง (2) ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างคานทดสอบ (3) ขั้นตอนของการเตรียมเครื่องมือตรวจวัดการทดสอบตัวอย่างคาน (4) ขั้นตอนดำเนินการทดสอบและ (5) ขั้นตอนการแปลผลการทดสอบ โดยมีรายละเอียดของการศึกษาวิจัยดังต่อไปนี้

เริ่มต้นด้วยการกำหนดให้มีการหล่อเตรียมตัวอย่างคานในที่ (cast-in-place) โดยได้มีการใช้คอนกรีตผสมเสร็จ (ready mixed concrete) ที่ใช้ในการศึกษาทดสอบเป็นจำนวนทั้งสิ้น 14 ตัวอย่างคาน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ตามค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (nominal concrete cylinder compressive strengths) คือมีค่า 240 ksc และ 280 ksc และได้กำหนดให้เป็นคานควบคุม (control beams) จำนวน 8 ตัวอย่าง และมีการยึดติดด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP plates) จำนวน 6 ตัวอย่าง

โดยตัวอย่างคานทดสอบทุกตัวอย่างนั้นมีการกำหนดให้มีหน้าตัดกว้าง (b) 15 cm ลึก (h) 25 cm และคานมีความยาวรวม 2.4 m และมีความยาวช่วงพาดระหว่างฐานรองรับ (L) ทั้งสองข้างคือ 2.1 m

สำหรับในทุกตัวอย่างคานมีการเสริมเหล็กรับแรงดึงภายในที่ใช้คือ DB12 ชั้นคุณภาพ SD40 และมีการใช้เหล็กปลอกรับแรงเฉือนรูปตัว U (U-shape) รััดเหล็กเสริมตามแนวยาวคือ RB6 ชั้นคุณภาพ SR24 ดังภาพที่ 4 (ก)

สำหรับการเสริมกำลังให้กับคานใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนแบบแผ่นแข็ง (plate) โดยมีกำลังดึงประลัยระบุ 29000 ksc และมีค่ามอดุลัสยืดหยุ่น  $1.65 \times 10^6$  ksc ที่มีความกว้าง ( $b_{fp}$ ) 5 cm ยาว 1.9 m และหนา (t) 2.4 mm และทำการยึดติดโดยใช้อีพ็อกซีที่ไซทราดอป (Sikadur®-30) สำหรับใช้ยึดติดงานเสริมกำลัง และนอกจากนี้ได้ทำการรัดรอบปลายแผ่น CFRP plate ทั้งสองข้างด้วยแผ่น CFRP แบบแผ่นอ่อน (sheet) โดยมีความกว้าง 25 cm และหนา 0.16 mm ความยาวที่ใช้รัดรอบเมื่อรวมระยะทาบลแล้วคือ 95 cm และทำการยึดติดโดยใช้อีพ็อกซี Sikadur®-330 ดังภาพที่ 4 (ข)

รายละเอียดของการเรียกชื่อสำหรับตัวอย่างคานที่ใช้ทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ส่วนตารางที่ 2 แสดงค่าคุณสมบัติของวัสดุที่กำหนดค่าระบุในการคำนวณออกแบบและค่าที่ได้จากการทดสอบ

สำหรับการทดสอบตัวอย่างคานทำโดยการให้น้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นแบบจุดด้วยแม่แรงไฮดรอลิกสัณฐาน 30 ตัน กดลงบนคานส่งถ่ายแรง (transfer

beam) และส่งผ่านน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำลงบนคาน

ทดสอบเป็นแบบ 2 จุด ดังภาพที่ 5 ถึง ภาพที่ 11

**ตารางที่ 1** รายละเอียดของตัวอย่างคานทดสอบ

| คาน        | ประเภทคาน     | กำลังอัดคอนกรีต (ksc) | ระยะน้ำหนักบรรทุกกระทำจากฐานรองรับ (cm) |
|------------|---------------|-----------------------|-----------------------------------------|
| CB-1S-L/3  | คานควบคุม     | 240                   | $L/3 = 70$                              |
| CB-1S-1.5h | คานควบคุม     | 240                   | $a = 1.5h = 37.5$                       |
| FB-1S-1.5h | คานเสริมกำลัง | 240                   | $a = 1.5h = 37.5$                       |
| CB-1S-2.0h | คานควบคุม     | 240                   | $a = 2.0h = 50$                         |
| FB-1S-2.0h | คานเสริมกำลัง | 240                   | $a = 2.0h = 50$                         |
| CB-1S-2.5h | คานควบคุม     | 240                   | $a = 2.5h = 62.5$                       |
| FB-1S-2.5h | คานเสริมกำลัง | 240                   | $a = 2.5h = 62.5$                       |
| CB-2S-L/3  | คานควบคุม     | 280                   | $L/3 = 70$                              |
| CB-2S-1.5h | คานควบคุม     | 280                   | $a = 1.5h = 37.5$                       |
| FB-2S-1.5h | คานเสริมกำลัง | 280                   | $a = 1.5h = 37.5$                       |
| CB-2S-2.0h | คานควบคุม     | 280                   | $a = 2.0h = 50$                         |
| FB-2S-2.0h | คานเสริมกำลัง | 280                   | $a = 2.0h = 50$                         |
| CB-2S-2.5h | คานควบคุม     | 280                   | $a = 2.5h = 62.5$                       |
| FB-2S-2.5h | คานเสริมกำลัง | 280                   | $a = 2.5h = 62.5$                       |

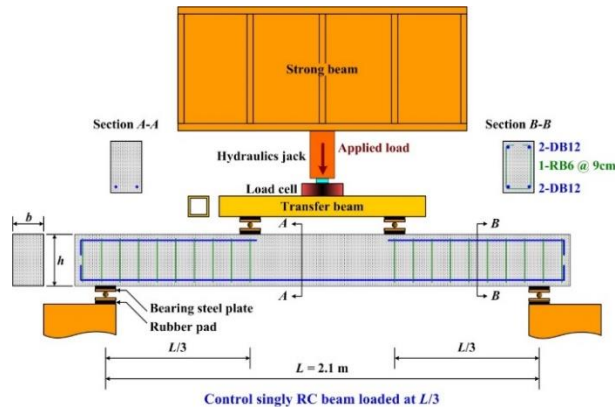
**ตารางที่ 2** คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้

| วัสดุ                   | ค่าระบุออกแบบ          | ค่าจากการทดสอบวัสดุ |
|-------------------------|------------------------|---------------------|
| กำลังครากเหล็ก DB12     | 4000 ksc               | 5484 ksc            |
| กำลังครากเหล็ก RB6      | 2400 ksc               | 4129 ksc            |
| มอดูลัสเหล็กเสริม       | $2.04 \times 10^6$ ksc | -                   |
| คอนกรีตกำลังอัด 240 ksc | 240 ksc                | 259.58 ksc          |
| มอดูลัสคอนกรีต          | 235632 ksc             | 245056 ksc          |
| คอนกรีตกำลังอัด 280 ksc | 280 ksc                | 279.39 ksc          |
| มอดูลัสคอนกรีต          | 254512 ksc             | 254235 ksc          |
| กำลังดึงประลัยแผ่น CFRP | 29000 ksc              | -                   |
| มอดูลัสแผ่น CFRP        | $1.65 \times 10^6$ ksc | -                   |

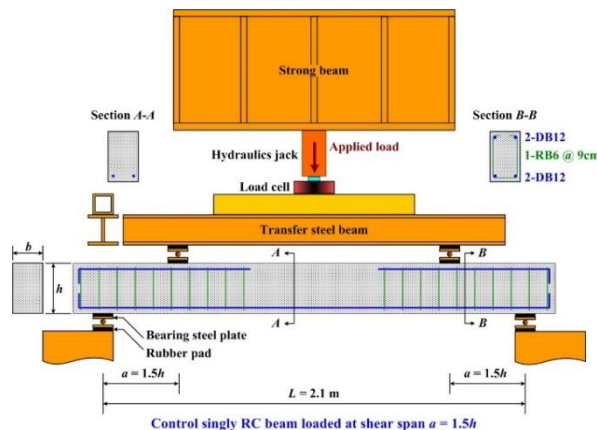
ภาพที่ 12 ให้นิยามของอัตราส่วนช่วงเฉือน [4] ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $a/h$  หรือ  $a/d$  โดยที่ค่า  $a$  คือ ระยะช่วงเฉือนเมื่อวัดจากฐานรองรับไปถึงตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำเป็นแบบจุด ส่วน  $h$  คือ ความลึกคานและ  $d$  คือ ความลึกประสิทธิภาพที่วัดจากผิวรับแรงอัดของคอนกรีตถึงตำแหน่งศูนย์ถ่วง

ของเหล็กเสริมรับแรงดึง ในการศึกษานี้กำหนดให้อัตราส่วนช่วงเฉือนเป็น  $a/h$  สำหรับภาพที่ 13 แสดงตำแหน่งตรวจวัดค่าการแอ่นตัวของคานด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดค่าการเคลื่อนที่แปรเปลี่ยนแบบเชิงเส้น (linear variable differential transformer: LVDT) ใน 3 หน้าตัดตรงบริเวณครึ่งความลึกคานที่ตำแหน่ง

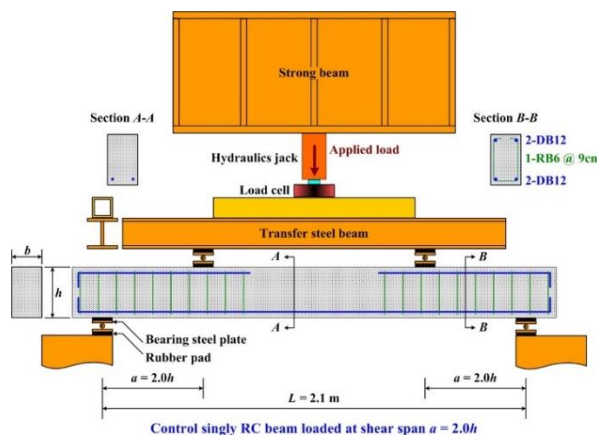
ของน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำเป็นแบบจุดทางซ้ายและ แต่สะพานตัดได้ทำการตรวจวัดอยู่ 2 ตำแหน่งคือ ทางขวาและที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวคานโดยใน ด้านหน้า (หน้า A) และด้านหลัง (หน้า B)



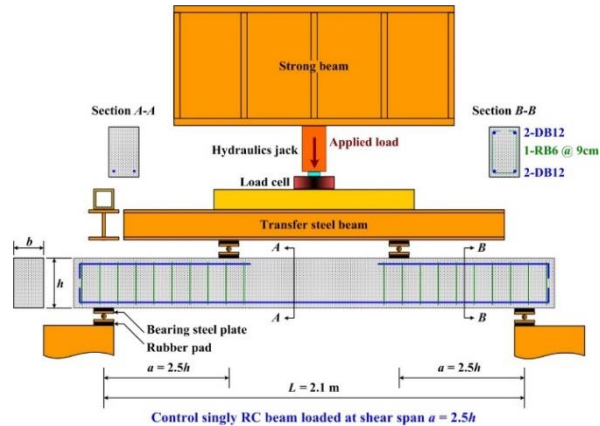
ภาพที่ 5 การให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานควบคุม CB-1S-L/3 และ CB-2S-L/3



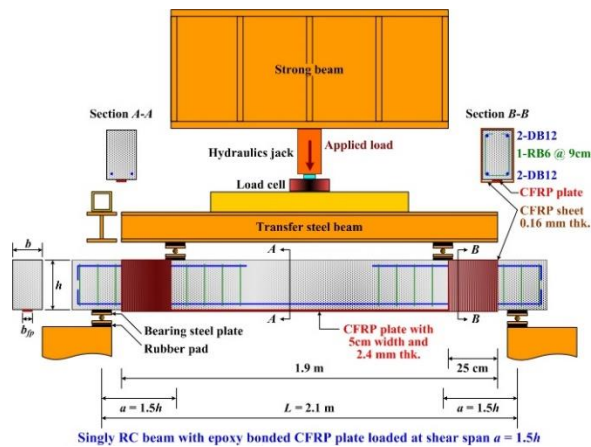
ภาพที่ 6 การให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานควบคุม CB-1S-1.5h และ CB-2S-1.5h



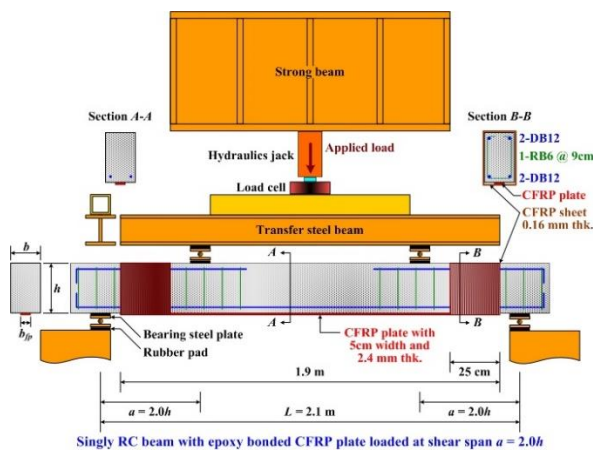
ภาพที่ 7 การให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานควบคุม CB-1S-2.0h และ CB-2S-2.0h



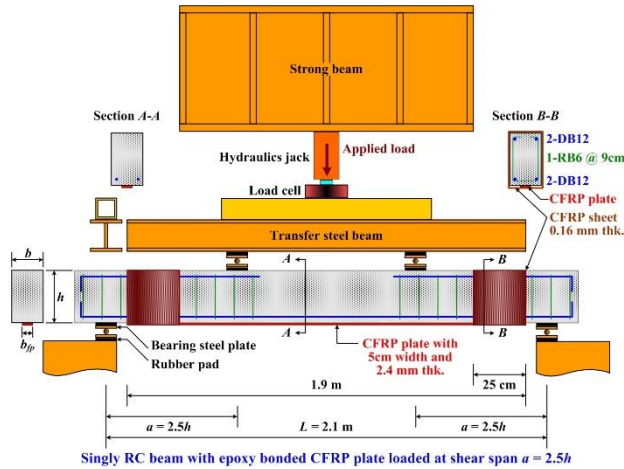
ภาพที่ 8 การให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานควบคุม CB-1S-2.5h และ CB-2S-2.5h



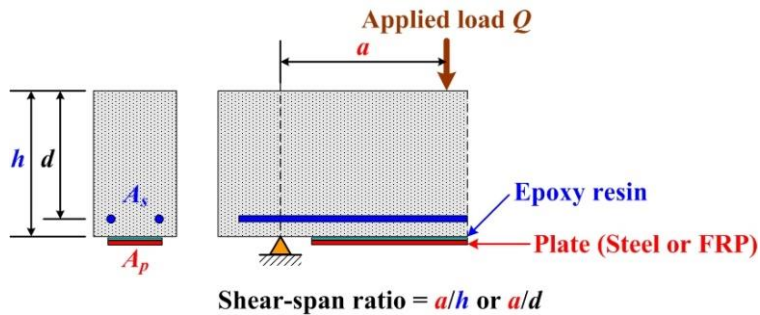
ภาพที่ 9 การให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานเสริมกำลัง FB-1S-1.5h และ FB-2S-1.5h



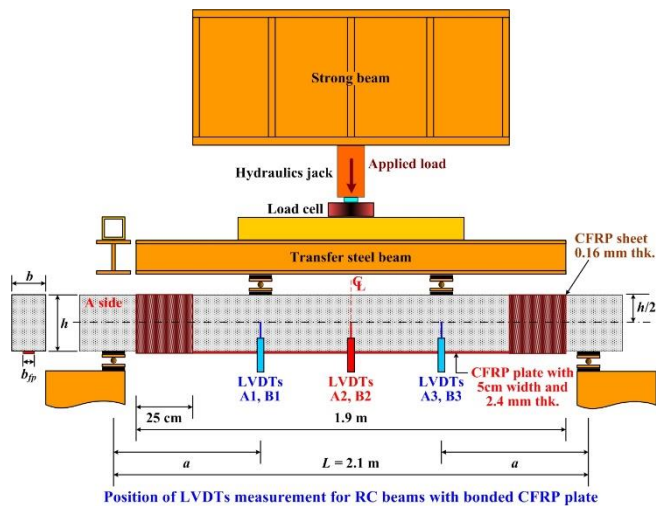
ภาพที่ 10 การให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานเสริมกำลัง FB-1S-2.0h และ FB-2S-2.0h



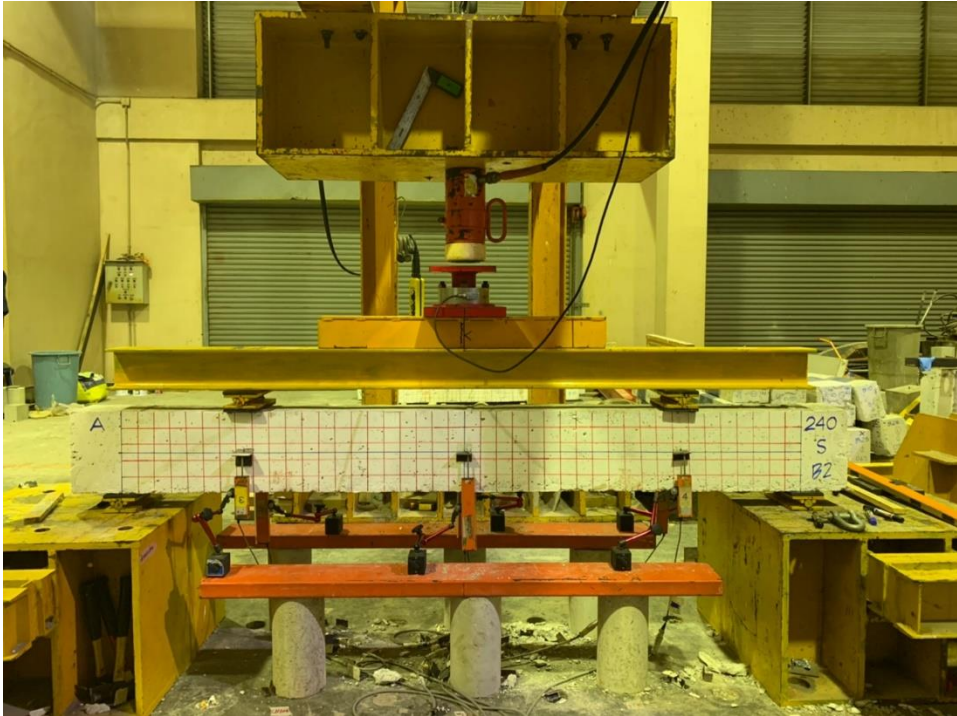
ภาพที่ 11 การให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานเสริมกำลัง FB-1S-2.5h และ FB-2S-2.5h



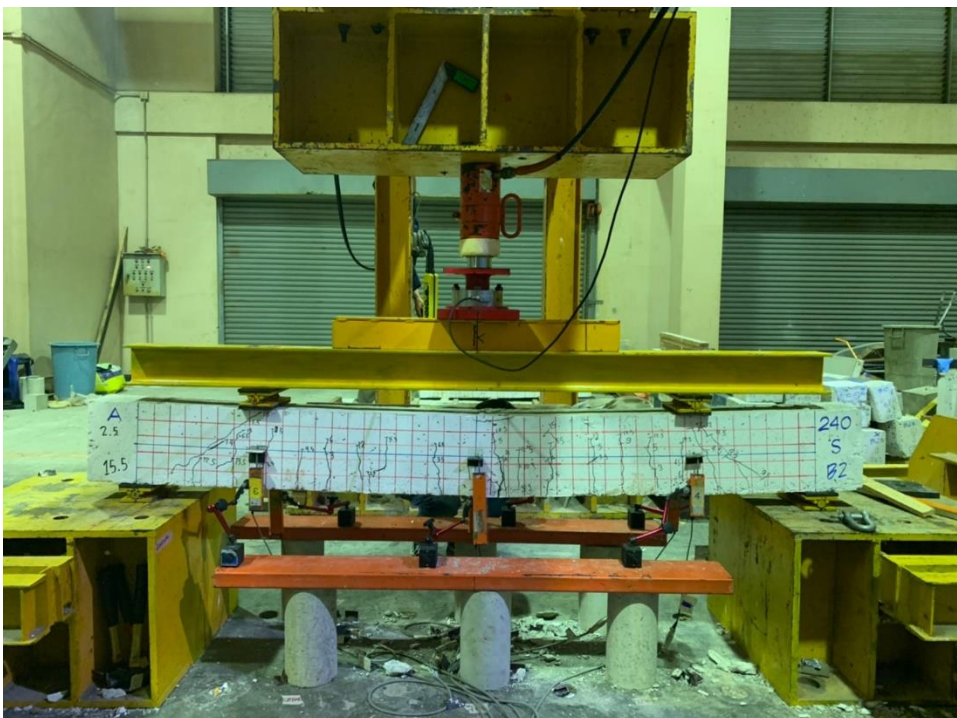
ภาพที่ 12 การให้นิยามของค่าอัตราส่วนช่วงเฉือน (shear-span ratio)



ภาพที่ 13 ตำแหน่งการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวของคานด้านหน้า (หน้า A) ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด LVDTs



ภาพที่ 14 คานควบคุม CB-1S-1.5h ก่อนให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ



ภาพที่ 15 คานควบคุม CB-1S-1.5h เมื่อหยุดให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ



ภาพที่ 16 คานเสริมกำลัง SB-1S-1.5h ก่อนให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ



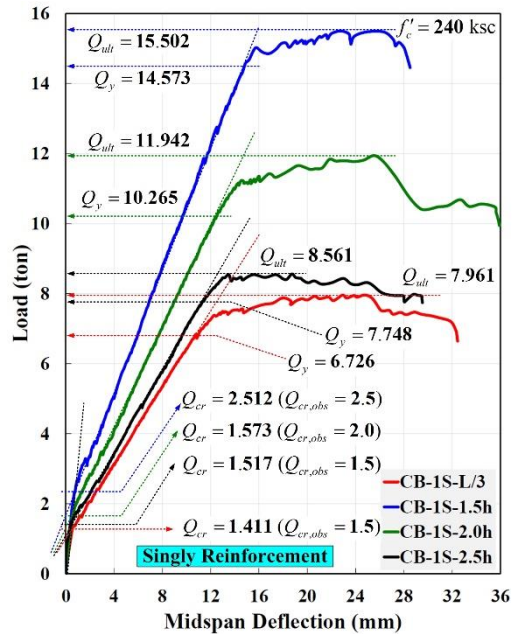
ภาพที่ 17 คานเสริมกำลัง SB-1S-1.5h เมื่อหยุดให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ

ตัวอย่างของภาพถ่ายสำหรับคานทดสอบในการศึกษานี้แสดงไว้ในภาพที่ 14 และภาพที่ 15 ซึ่งแสดงตัวอย่างของคานควบคุม CB-1S-1.5h ทั้งก่อนให้และหยุดให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ ตามลำดับ ส่วนภาพที่ 16 และภาพที่ 17 เป็นภาพถ่ายของคานเสริมกำลัง SB-1S-1.5h ทั้งก่อนให้และหยุดให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ ตามลำดับ

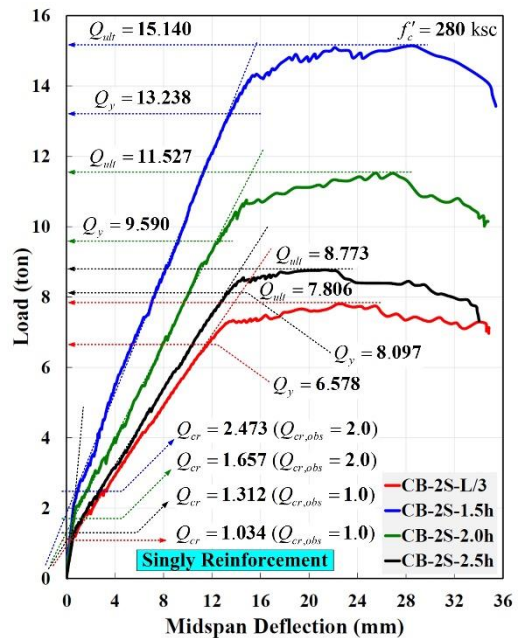
### 3. ผลลัพธ์จากการทดสอบ

ภายหลังจากการทดสอบตัวอย่างคานทั้ง 14 ตัวอย่างจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำจากแม่แรงไฮดรอลิกส์ ( $Q$ ) และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงพาด ( $\delta$ ) ของคานทดสอบซึ่งได้มาจากการเก็บบันทึกข้อมูลของมาตรวัดแรง (load cell) และอุปกรณ์การตรวจวัดค่าการเคลื่อนที่ LVDTs ด้วยชุดอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (data acquisition) โดยที่ค่าของการแอ่นตัวที่ได้เป็นการหามาจากผลเฉลี่ยของการแอ่นตัวของตัวอย่างคานทดสอบที่ด้าน A และด้าน B ของคาน

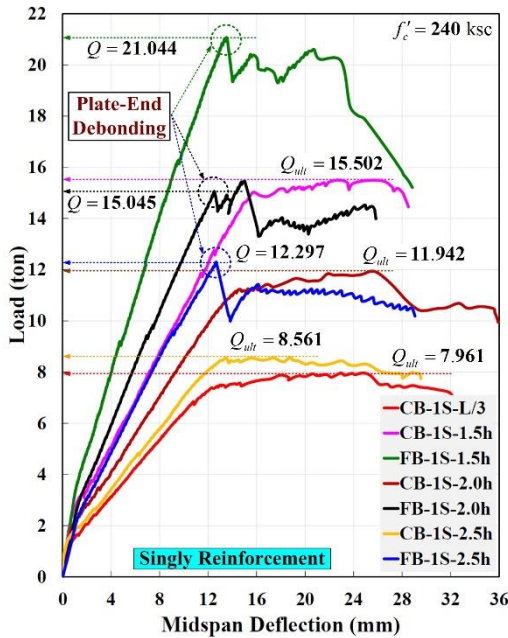
ภาพที่ 18 และภาพที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำและการแอ่นตัวสำหรับกรณีของคานควบคุมต่างๆ ที่มีค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีตที่ใช้คือ 240 ksc และ 280 ksc ตามลำดับ โดยในแต่ละภาพนั้นได้มีการแสดงค่าของน้ำหนักบรรทุกแรกเริ่มแรก ( $Q_{cr}$ ) ค่าน้ำหนักบรรทุกคราก ( $Q_y$ ) และค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย ( $Q_{ult}$ ) ที่ได้จากการพิจารณาผลของการทดสอบตัวอย่างของคานในทำนองเดียวกันกับความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งไว้ในแบบ 3 เส้นตรง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2 สำหรับภาพที่ 20 และภาพที่ 21 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำและการแอ่นตัวของคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่มีค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีตที่ใช้คือ 240 ksc และ 280 ksc ตามลำดับ และมีการระบุค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน ( $Q$ ) ของแผ่น CFRP ในคานเสริมกำลังและค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย ( $Q_{ult}$ ) ของคานควบคุม



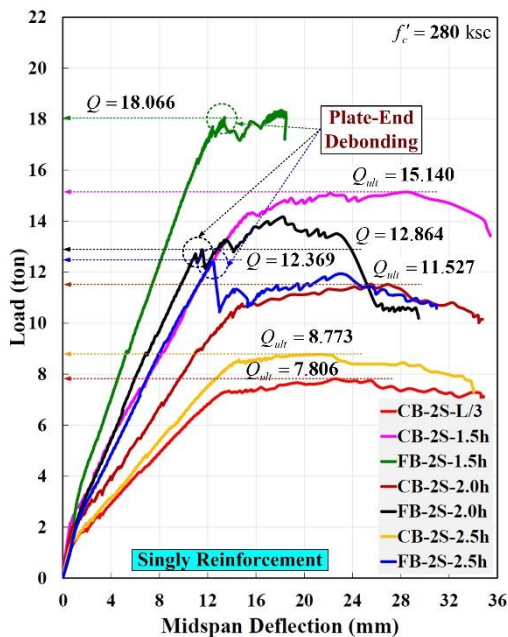
ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุมที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 240 ksc



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุมที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 280 ksc



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 240 ksc

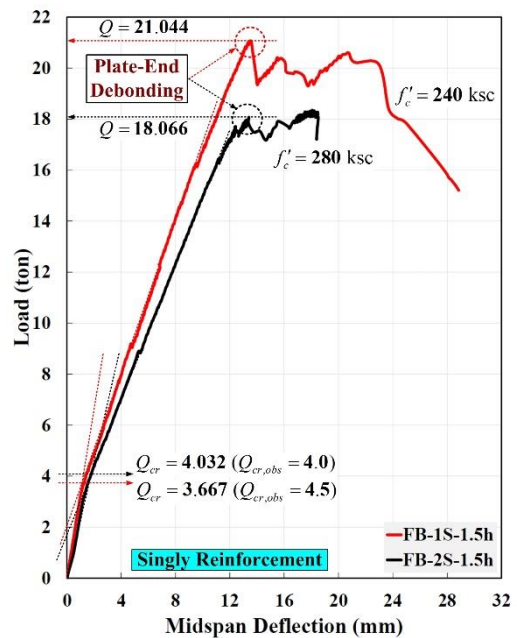


ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 280 ksc

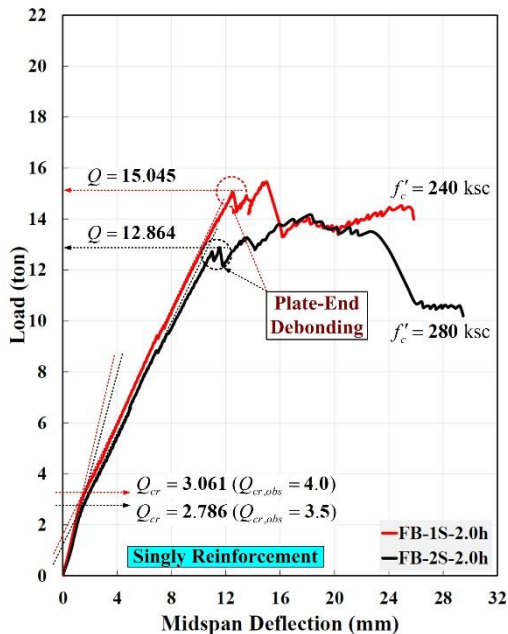
สังเกตว่าในภาพที่ 19 และภาพที่ 20 ยังได้มีการระบุค่าของน้ำหนักบรรทุกแตกร้าเริ่มแรกที่ได้มาจากการสังเกตด้วยสายตาในระหว่างทำการทดสอบคาน ( $Q_{cr,obs}$ ) เมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก ดังนั้น ค่าที่ได้จึงมีความแตกต่างไปจากค่าที่ได้จากความสัมพันธ์ในภาพ

#### 4. อภิปรายผลการศึกษาวิจัย

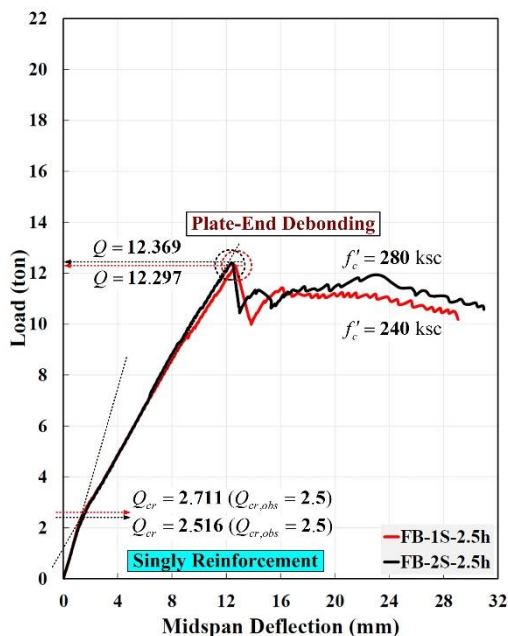
เมื่อพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานควบคุมในภาพที่ 18 และภาพที่ 19 พบว่า ค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้าเริ่มแรก ค่าน้ำหนักบรรทุกครากและค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำมีการขยับเข้าใกล้ฐานรองรับ และค่าน้ำหนักบรรทุกเหล่านี้มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อกำลังอัดระบุของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างภาพที่ 18 และภาพที่ 19 ในแต่ละตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกเดียวกันที่กระทำลงบนคาน



ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานเสริมกำลัง FB-1S-1.5h และ FB-2S-1.5h



ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคาน เสริมกำลัง FB-1S-2.0h และ FB-2S-2.0h



ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคาน เสริมกำลัง FB-1S-2.5h และ FB-2S-2.5h

สำหรับการพิจารณาค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนของแผ่น CFRP ( $Q$ ) ที่แสดงไว้ในแต่ละภาพของภาพที่ 20 และภาพที่ 21 นั้นพบว่า มีค่าลดลงเมื่อตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำมีการขยับออกห่างไปจากฐานรองรับและมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อคอนกรีตที่ใช้มีค่ากำลังอัดระบุเพิ่มมากขึ้นคือจาก 240 ksc เป็น 280 ksc เฉพาะในการศึกษานี้และเมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบเฉพาะคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP เท่านั้น และกำหนดให้มีตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนคานมีระยะที่เท่ากันดังได้แสดงไว้ในภาพที่ 22 ถึงภาพที่ 24 พบว่า ค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนของคานที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 240 ksc มีค่าสูงกว่ากำลังอัดระบุของคอนกรีต 280 ksc ยกเว้นในกรณีที่ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนคานมีค่าเท่ากับ 2.5 เท่าของความลึกคาน ( $a = 2.5h$ ) โดยทำการวัดห่างจากฐานรองรับทั้งสองข้างนั้นมีความใกล้เคียงกันมาก

ในการเปรียบเทียบค่าปริมาณเชิงตัวเลขของแต่ละสภาวะความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานควบคุมและคานเสริมกำลังได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 ถึงตารางที่ 5 โดยตารางที่ 3 แสดงถึงค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยและค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่ได้จากการทดสอบคานตัวอย่าง ค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ค่ากำลังของวัสดุที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณด้วยค่ากำลังระบุออกแบบดังที่ได้ให้ไว้ในตารางที่ 2 ส่วนตารางที่ 4 แสดงค่าของน้ำหนักบรรทุกแตกร้าวและโมเมนต์ดัดแตกร้าวที่ได้จากการสังเกตรอยร้าวด้วยสายตาระหว่างดำเนินการทดสอบและมีการจดบันทึกค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้าวไว้ในขณะนั้นและค่าที่ได้มาจากการคำนวณของกำลังระบุและค่าจากการทดสอบวัสดุที่สามารถหามาได้ สำหรับตารางที่ 5 เป็นการสรุปผลของค่าน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ที่หาได้มาจากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวของคานทดสอบทั้ง 14 ตัวอย่างคานทั้งที่หามาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวของคาน

ตารางที่ 3 น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยและโมเมนต์ดัดประลัย

| คาน        | $Q_{ult, test}$ (ton) | $M_{ult, test}$ (ton-m) | $M_{ult, mat}$ (ton-m) | $M_{ult, des}$ (ton-m) |
|------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| CB-1S-L/3  | 7.961                 | 2.786                   | 2.223                  | 1.657                  |
| CB-1S-1.5h | 15.502                | 2.907                   | 2.223                  | 1.657                  |
| FB-1S-1.5h | 21.061                | 3.949                   | -                      | 6.927                  |
| CB-1S-2.0h | 11.942                | 2.986                   | 2.223                  | 1.657                  |
| FB-1S-2.0h | 15.488                | 3.872                   | -                      | 6.927                  |
| CB-1S-2.5h | 8.561                 | 2.675                   | 2.223                  | 1.657                  |
| FB-1S-2.5h | 12.297                | 3.843                   | -                      | 6.927                  |
| CB-2S-L/3  | 7.806                 | 2.732                   | 2.239                  | 1.676                  |
| CB-2S-1.5h | 15.140                | 2.839                   | 2.239                  | 1.676                  |
| FB-2S-1.5h | 18.350                | 3.441                   | -                      | 7.431                  |
| CB-2S-2.0h | 11.527                | 2.882                   | 2.239                  | 1.676                  |
| FB-2S-2.0h | 14.160                | 3.540                   | -                      | 7.431                  |
| CB-2S-2.5h | 8.773                 | 2.742                   | 2.239                  | 1.676                  |
| FB-2S-2.5h | 12.369                | 3.865                   | -                      | 7.431                  |

$Q_{ult, test}$  และ  $M_{ult, test}$  คือ น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยและโมเมนต์ดัดประลัยที่คำนวณจากการทดสอบคาน

$M_{ult, mat}$  และ  $M_{ult, des}$  คือ โมเมนต์ดัดประลัยที่คำนวณจากค่าการทดสอบวัสดุและจากค่าระบุนอกแบบ

ตารางที่ 4 น้ำหนักบรรทุกแตกร้าวและโมเมนต์ดัดแตกร้าว

| คาน        | $Q_{cr, obs}$ (ton) | $M_{cr, obs}$ (ton-m) | $M_{cr, mat}$ (ton-m) | $M_{cr, des}$ (ton-m) |
|------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| CB-1S-L/3  | 1.5                 | 1.050                 | 0.536                 | 0.517                 |
| CB-1S-1.5h | 2.5                 | 0.938                 | 0.536                 | 0.517                 |
| FB-1S-1.5h | 4.5                 | 1.688                 | -                     | 0.557                 |
| CB-1S-2.0h | 2.0                 | 1.000                 | 0.536                 | 0.517                 |
| FB-1S-2.0h | 4.0                 | 2.000                 | -                     | 0.557                 |
| CB-1S-2.5h | 1.5                 | 0.938                 | 0.536                 | 0.517                 |
| FB-1S-2.5h | 2.5                 | 1.563                 | -                     | 0.557                 |
| CB-2S-L/3  | 1.5                 | 0.700                 | 0.556                 | 0.558                 |
| CB-2S-1.5h | 2.0                 | 0.750                 | 0.556                 | 0.558                 |
| FB-2S-1.5h | 4.0                 | 1.500                 | -                     | 0.601                 |
| CB-2S-2.0h | 2.0                 | 1.000                 | 0.556                 | 0.558                 |
| FB-2S-2.0h | 3.5                 | 1.750                 | -                     | 0.601                 |
| CB-2S-2.5h | 1.0                 | 0.625                 | 0.556                 | 0.558                 |
| FB-2S-2.5h | 2.5                 | 1.563                 | -                     | 0.601                 |

$Q_{cr, obs}$  และ  $M_{cr, obs}$  คือ น้ำหนักบรรทุกแตกร้าวและโมเมนต์ดัดแตกร้าวที่สังเกตจากการทดสอบคาน

$M_{cr, mat}$  และ  $M_{cr, des}$  คือ โมเมนต์ดัดแตกร้าวที่คำนวณจากค่าการทดสอบวัสดุและค่ากำลังระบุนอกแบบ

ตารางที่ 5 น้ำหนักบรรทุกต่างๆ จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัว

| คาน        | $Q_{cr}$ (ton) | $Q_y$ (ton-m) | $Q_{ult}$ (ton-m) | $Q_{debond}$ (ton-m) |
|------------|----------------|---------------|-------------------|----------------------|
| CB-1S-L/3  | 1.411          | 6.726         | 7.961             | -                    |
| CB-1S-1.5h | 2.512          | 14.573        | 15.502            | -                    |
| FB-1S-1.5h | 3.667          | -             | -                 | 21.044               |
| CB-1S-2.0h | 1.573          | 10.265        | 11.942            | -                    |
| FB-1S-2.0h | 3.061          | -             | -                 | 15.045               |
| CB-1S-2.5h | 1.517          | 7.748         | 8.561             | -                    |
| FB-1S-2.5h | 2.711          | -             | -                 | 12.297               |
| CB-2S-L/3  | 1.034          | 6.578         | 7.806             | -                    |
| CB-2S-1.5h | 2.473          | 13.238        | 15.140            | -                    |
| FB-2S-1.5h | 4.032          | -             | -                 | 18.066               |
| CB-2S-2.0h | 1.657          | 9.590         | 11.527            | -                    |
| FB-2S-2.0h | 2.786          | -             | -                 | 12.864               |
| CB-2S-2.5h | 1.312          | 8.097         | 8.773             | -                    |
| FB-2S-2.5h | 2.516          | -             | -                 | 12.369               |

$Q_{cr}$  คือ น้ำหนักบรรทุกทุกแตกร้าว:  $Q_y$  คือ น้ำหนักบรรทุกคราก:  $Q_{ult}$  คือ น้ำหนักบรรทุกประลัยและ

$Q_{debond}$  คือ น้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนของแผ่น CFRP

พิจารณาตารางที่ 3 เห็นได้ว่าไม่ได้ทำการระบุค่าของโมเมนต์ดัดประลัยที่คำนวณจากผลทดสอบวัสดุเนื่องจากไม่มีผลการทดสอบของแผ่น CFRP ดังแสดงในตารางที่ 2 ส่วนค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากค่าระบุออกแบบของคานเสริมกำลังมีค่าคงที่เท่ากันในแต่ละค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีตที่ใช้และไม่ขึ้นกับตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกกระทำเนื่องจากเป็นค่ากำลังความสามารถของหน้าตัดคานที่ได้จากวัสดุ และนอกจากนี้ยังสังเกตได้อีกว่ามีค่าสูงกว่าโมเมนต์ดัดประลัยที่ได้จากการทดสอบคานซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าคานเสริมกำลังมีการสูญเสียพฤติกรรมคอมโพสิตก่อนที่คานจะมีความสามารถเต็มประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกจากภายนอก

สำหรับตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าวที่ได้จากการคำนวณพบว่า มีค่าคงที่ในแต่ละคานควบคุมและคานเสริมกำลังโดยไม่ขึ้นกับตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำและมีค่าน้อยกว่าค่าที่สังเกตได้จากการทดสอบคานในทุกกรณี

ตารางที่ 5 แสดงถึงค่าน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ที่ได้จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวของคานทดสอบพบว่าไม่สามารถหาค่าน้ำหนักบรรทุกครากได้อย่างชัดเจนจากความสัมพันธ์และค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยเนื่องจากการบดแตกของคอนกรีตในกรณีของคานเสริมกำลังแต่สามารถหาค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้าวและค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนด้วยการพิจารณาพฤติกรรมจากความสัมพันธ์ในภาพที่ 22 ถึงภาพที่ 24 ในส่วนของคานควบคุมทุกตัวอย่างนั้นสามารถหาค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้าว น้ำหนักบรรทุกครากและน้ำหนักบรรทุกประลัยได้ในลักษณะทำนองเดียวกันกับความสัมพันธ์แบบ 3 เส้นตรงในภาพที่ 2

## 5. สรุปผล

จากผลการศึกษาเชิงทดลองสามารถสรุปได้ว่า คานควบคุมทุกตัวอย่างมีพฤติกรรมแบบเหนียวเนื่องจากเกิดการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงโดย

พบว่า ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกแตกช้า ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกครากและค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนช่วงเฉือนมีค่าลดลงและมีแนวโน้มลดลงเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาคานเสริมกำลังพบว่า ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกจากการหลุดล่อนของแผ่น CFRP มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนช่วงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น แม้ว่าค่าน้ำหนักบรรทุกทุกจากการหลุดล่อนของคานเสริมกำลังมีค่าสูงกว่าค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของคานควบคุมก็ตามแต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบพบว่า มีค่าต่ำกว่าค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากการคำนวณออกแบบโดยใช้ค่ากำลังระบุซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการใช้ความสามารถของหน้าตัดคานเสริมกำลังไม่เต็มประสิทธิภาพของกำลังของวัสดุ

## 6. อ้างอิง

- [1] Park R, Paulay T. Reinforced Concrete Structures. New York: John Wiley & Sons Inc.; 1975.
- [2] Nilson AH, Winter G. Design of Concrete Structures. 11<sup>th</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill Inc.; 1991.
- [3] Nawy EG. Reinforced Concrete: A fundamental Approach. 4<sup>th</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall Inc.; 2000.
- [4] Hollaway LC, Leeming MB. Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering. Cambridge: Woodhead Publishing; 2001.
- [5] GangaRao HVS, Taly N, Vijay PV. Reinforced Concrete Design with FRP Composites. Boca Raton: Taylor & Francis Group LLC.; 2007.
- [6] Balaguru P, Nanni A, Giancaspro J. FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures: A Guide to Fundamentals and Design for Repair and Retrofit. New York: Taylor & Francis Group LLC.; 2009.
- [7] Rasheed HA. Strengthening Design of Reinforced Concrete with FRP. Boca Raton: Taylor & Francis Group LLC.; 2015.
- [8] Wu H-C, Eamon CD. Strengthening of Concrete Structures Using Fiber Reinforced Polymers (FRP): Design, Construction and Practical Applications. Cambridge: Woodhead Publishing; 2017.
- [9] ACI 440.2R-17. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. Michigan: American Concrete Institute (ACI) Committee 440; 2017.
- [10] Chajes MJ, Thomson TA, Januszka TF, Finch WW. Flexural strengthening of concrete beams using externally bonded composite materials. Constr Build Mater. 1994; 8: 191-201.
- [11] Varastehpour H, Hamelin P. Strengthening of concrete beams using fiber-reinforced plastics. Mater Struct. 1997; 30: 160-6.
- [12] Ramana VPV, Kant T, Morton SE, Dutta PK, Mukherjee A, Desai YM. Behavior of CFRPC strengthened reinforced concrete beams with varying degrees of strengthening. Compos B Eng. 2000; 31: 461-70.
- [13] Azevedo DMM, Juvandes LFP, Henriques AAR. Flexural strengthening with FRP systems experimental results vs. expected results based on actual design guidelines. Composites in Construction 2005-

- Third International Conference, 2005 July 11-13, Lyon, France, 2005.
- [14] Rosenboom O, Rizkalla SH. Experimental study of intermediate crack debonding in fiber-reinforced polymer strengthened beams. *ACI Struct J*. 2008; 105: 41-50.
- [15] Perera R, Bueso-Inchausti D. A unified approach for the static and dynamic analyses of intermediate debonding in FRP-strengthened reinforced concrete beams. *Compos Struct*. 2010; 92: 2728-37.
- [16] Hamed E, Bradford MA. Flexural time-dependent cracking and post-cracking behaviour of FRP strengthened concrete beams. *Int J Solids Struct*. 2012; 49: 1595-607.
- [17] Bykov AA, Kalugin AV. New model for evaluation of FRP debonding strain for Russian design code. *Adv Mater Sci Eng*. 2013; 2013: 130162.
- [18] Ding J, Wang F, Huang X, Chen S. The effect of CFRP length on the failure mode of strengthened concrete beams. *Polymers*. 2014; 6: 1705-26.
- [19] Bennegadi ML, Hadjazi K, Sereir Z, Amziane S, El Mahi B. General cohesive zone model for prediction of interfacial stresses induced by intermediate flexural crack of FRP-plated RC beams. *Eng Struct*. 2016; 126: 147-57.
- [20] Mostafa AAB, Razaqpur AG. Finite element model for predicting post delamination behaviour in FRP-retrofitted beams in flexure. *Constr Build Mater*. 2017; 131: 195-204.
- [21] Nguyen-Minh L, Phan-Vu P, Tran-Thranh D, Truong QPT, Pham TM, Ngo-Huu C, Rovnak M. Flexural-strengthening efficiency of cfrp sheets for unbonded post-tensioned concrete T-beams. *Eng Struct*. 2018; 166: 1-15.
- [22] Chen C, Wang X, Sui L, Xing F, Chen X, Zhou Y. Influence of FRP thickness and confining effect on flexural performance of HB-strengthened RC beams. *Compos B Eng*. 2019; 161: 55-67.
- [23] Zhou C, Guo Y, Wang Y, He X, Xiong Z. Flexural behavior of narrow RC beams strengthened with hybrid anchored CFRP sheets. *J Adv Concr Technol*. 2020; 18: 54-66.
- [24] Al-Negheimish AI, El-Sayed AK, Al-Saawani MA, Alhozaimy AM. Effect of stirrups on plate end debonding in reinforced concrete beams strengthened with fiber reinforced polymers. *Polymers*. 2021; 13: polym 13193322.
- [25] Zhou B, Wu R-Y, Yin S. Stress field approach for prediction of end concrete cover separation in RC beams strengthened with FRP reinforcement. *Polymers*. 2022; 14: polym14050988.

# Short-term Prediction of Flow Rate and Suspended Sediment Transport in a Tidal River Using Genetic Programming

Chaiyuth Chinnarasri<sup>1\*</sup>, Pakorn Ditthakit<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Water Resources Engineering and Management Research Center (WAREE),  
King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT),  
Bangkok 10140, Thailand

<sup>2</sup>School of Engineering and Resources Management, Walailak University,  
Nakhon Si Thammarat 80160, Thailand

\* Corresponding author. Email: Chaiyuth.chi@kmutt.ac.th

## ABSTRACT

Predicting flow rate and sediment transport are essential for water transportation, water resources management and drainage systems in lowland areas. This paper aims to develop simple models for predicting flow rate and suspended sediment transport in the lower Chao Phraya River, which has complicated flow characteristics. The predicted flow rate equations were developed based on genetic programming (GP) and the relationships among flow rates, water levels and flow directions during spring and neap tide periods. The prediction results for the short term show accurate performance with correlation coefficient ( $r$ ) values greater than 0.88 for the training and testing processes (with the flow rates of  $-3,000 \text{ m}^3/\text{s}$  to  $+3,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ). The flow rate and nearshore sediment transport rate using the GP model in spring tide show more accuracy than those in the neap tide. During spring tide, there is a change in the water level that had a great influence on both the flow rate and the flow velocity. The flow direction is one of the important parameters for the proposed GP model that can be used for practical engineering applications for predicting flow rate and nearshore sediment transport rate for water management in the tidal river.

**Keywords:** Artificial intelligence, Flow characteristics, Genetic programming, Modelling, Suspended sediment transport.

Received 15-10-2022

Revised 19-12-2022

Accepted 23-12-2022

## Notation List

|                  |                                                   |
|------------------|---------------------------------------------------|
| $A$              | = cross-sectional area ( $m^2$ )                  |
| MAE              | = mean absolute error                             |
| $n$              | = manning's roughness coefficient ( $s/m^{1/3}$ ) |
| $N$              | = number of observations                          |
| $Q$              | = discharge ( $m^3/s$ )                           |
| $Q_f$            | = discharge of non-uniform flow ( $m^3/s$ )       |
| $Q_0$            | = discharge of uniform flow ( $m^3/s$ )           |
| $q_s$            | = nearshore sediment transport rate ( $g/m^2/s$ ) |
| $r$              | = correlation coefficient                         |
| $R$              | = hydraulic radius of the river section (m)       |
| RMSE             | = root mean square error                          |
| $S_f$            | = friction slope (dimensionless)                  |
| $S_0$            | = bed slope or bottom slope (dimensionless)       |
| $S_w$            | = water surface slope (dimensionless)             |
| $V_{max}$        | = maximum velocity (m/s)                          |
| $V_{mean}$       | = mean velocity (m/s)                             |
| WL               | = water level (m, mean sea level)                 |
| $X_i^{obs}$      | = observed data                                   |
| $X_i^{pre}$      | = predicted result                                |
| $X_{mean}^{obs}$ | = mean observed value                             |
| $X_{mean}^{pre}$ | = mean predicted value                            |
| $y$              | = flow depth (m)                                  |

## 1. INTRODUCTION

Tides can be described as phenomena resulting from gravitational attractions among the Sun, the Moon and Earth. These attractions of the gravitational forces differ depending on the Moon's and the Sun's positions relative to that of Earth. If they are on the same side or directly opposite to each other, the resulting tide is called spring tide; if they are perfectly

perpendicular, the resulting tide is called neap tide [1]. The Chao Phraya River is located in Thailand's central region and has a flat plains area in the lower part, which is influenced by the tide. The tide characteristics of the Gulf of Thailand, which is affected by mixed tides, consist of two high and/or low tides on each tidal day. The height of each tide varies from day to day, resulting in changes in the water levels in the lower part of the Chao Phraya River, which ranges from the river mouth to Bang Sai, Ayutthaya province [2-3].

When the seawater level starts to fall from the highest level, it causes the water to continually flow into the sea with a profile of vertical velocity. The maximum and minimum flow rates in the river do not occur at the time when the water level has reached its highest or lowest points. The maximum flow rate into the sea is generated when the sea level sharply drops and approaches the lowest level, due to the extremely different upstream and downstream water levels [4-5].

The tide results in flow rate and sediment transport in two directions; where the river flows into the sea and where the seawater flows into the river. Consequently, the tidal affected area is where sediment accumulates that cause rivers to become shallow, blocking them from draining into the sea. Therefore, predicting flow rate and sediment transport in rivers is essential for water resources management, planning, navigation and environmental protections, including sediment problems in the factories' cooling systems.

Chen and Chiu (2002) proposed a quick and easy method to predict flow rate in a tidal river. The method is determined by the ratio between mean

velocity ( $V_{\text{mean}}$ ) and maximum velocity ( $V_{\text{max}}$ ) and considers the relationship between velocity and area. Additionally, Chen and Chui reported data from the Tanshui River based on tidal effects obtained using this method. Their results provided evidence that this efficient method is effective in predicting tide-influenced flow rates [6].

Recently, machine learning (ML) techniques have been used for many applications in water resources. These models can capture data's non-linearity, non-stationarity, noise, complexity and dynamism. These models can be categorized into four groups: classifiers and machine-learning approaches, fuzzy sets, evolutionary computation and wavelet conjunction models [7]. Comprehensive reviews of different ML techniques and their applications in water resources engineering can be found in [8-10].

Genetic programming (GP), a subset of ML, is an evolutionary approach. It is one of the most popular evolutionary computing techniques that use a Darwinian algorithm to solve problems [11]. This approach generates input-output relationships as explicit symbolic mathematical expressions. It is often regarded as a grey-box data-driven technique rather than as a black-box data-driven technique, such as Artificial Neural Networks (ANNs) or Support Vector Machines (SVMs) [10]. In recent decades, GP has been a successful tool in solving various kinds of engineering problems and has undergone early advancements, and its accuracy is higher than that of traditional programs [8, 12]. Moreover, GP can be applied in various water resource problems for estimation or prediction. Examples of such problems include rainfall runoff

modelling [13-14], probabilistic flood forecasting [15-16], reservoir management [17], flood forecasting system prediction [18], water-level and storage-capacity curves [19], lake level prediction models [20], groundwater level forecast models [21], runoff forecasting [22], wave height forecasting [23-27], and suspended sediment modelling [28-33]. However, GP's utilization for tidal rivers has not yet been achieved.

Therefore, this research's aim is to develop simple models to predict flow rate and suspended sediment transport in the lower Chao Phraya River based on the tides' characteristics, which are rather complicated. The important hydraulic factors are determined and analysed to obtain their relationships.

## 2. THEORY

### 2.1 Relationship between water level and flow rate in the lower Chao Phraya River

For a uniform flow in an open channel, the discharge can be computed using Manning's principle as:

$$Q_0 = \frac{1}{n} A R^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

where  $Q_0$  is the discharge of uniform flow ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $n$  is the Manning's roughness coefficient ( $\text{s}/\text{m}^{1/3}$ ),  $A$  is the cross-sectional area ( $\text{m}^2$ ),  $R$  is the hydraulic radius of the river section ( $\text{m}$ ), and  $S_0$  is the bed slope (dimensionless).

However, in the case of non-uniform flow, the water surface slopes depend on flood hydrograph of upstream and tide from downstream. When the Manning's principle is

applied, the discharge could be expressed as:

$$Q_f = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

where  $Q_f$  is the discharge of non-uniform flow ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), and  $S_f$  is the friction slope (dimensionless).

When the flood waves and tidal waves, moving through the river, the friction slope ( $S_f$ ) does not consistently equal the water surface slope ( $S_w$ ) or the bed slope ( $S_0$ ). Therefore, a unique rating curve could not exist and the relationship between water level and flow rate in unsteady conditions leads to the loop pattern.

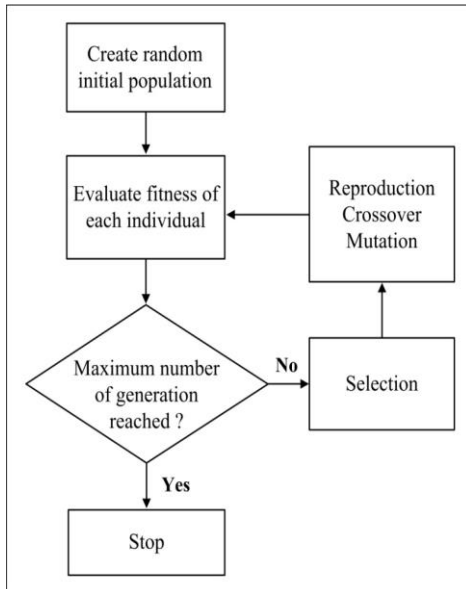
As mentioned earlier, the flow in the lower Chao Phraya River is influenced by tides. The study of this relationship between water level and flow rate was conducted at the Wat Bang Hua Suea station using field measurements during Oct. 2015 and May 2016. These months cover all tide seasons, including spring and neap tides [5].

## 2.2 Prediction by GP

GP is an evolutionary algorithm, which is a process inspired by the Darwinian theory of evolution. This approach offers results in the form of mathematical equations, involving various variables [11]. GP has many advantages: for example, it can be applied to areas where the interrelationships among the relevant variables are poorly understood or those where conventional mathematical analysis does not or cannot provide analytical solutions [34]. GP algorithms are often used as data fitting tools, thus

making GP applications highly similar to those of other ML algorithms, such as artificial neural networks or support-vector machines [10]. GP's most unique and distinct feature, which differentiates it from other ML approaches, is its ability to test relationships and present the best ones. Practically, in stream-flow modelling and forecasting, evolutionary computation has scored higher in accuracy than other ML techniques such as artificial neural networks [7]. Many researchers have demonstrated evolutionary computations' capabilities [35-39].

The GP algorithm begins with random initial populations called potential solutions. During the training phase, the solutions that demonstrate high performance (during the fitness evaluation) survive to the next generation and are considered as parents to create offspring. Next, three evolutionary operators - namely, reproduction, crossover and mutation - are used to act on each individual solution to improve it to achieve a desired state [40]. Reproduction is the process of transferring the single best solution into the new population set without any change. Crossover refers to producing two new individuals by selecting a random subtree (i.e. function nodes) in each of the two parents and swapping the resultant subtrees, with the new individuals being the offspring. In the mutation, a subtree is randomly chosen and is removed and replaced by a randomly generated subtree [41]. A flow chart of the GP algorithm, which expresses the conceptual framework of the study, is shown in Figure 1.



**Figure 1** Simplified GP flowchart.

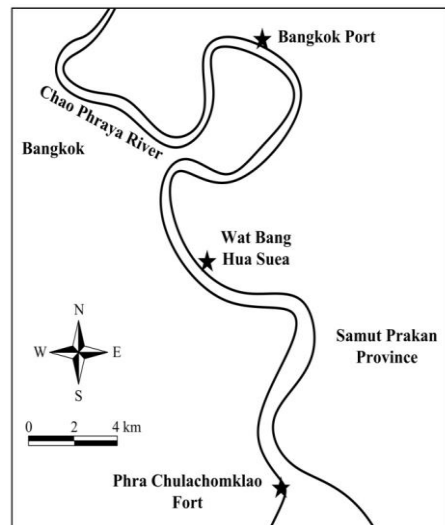
These looping processes are repeated until the optimal results are found or the maximum number of generations is reached. For testing, GP is used to determine various parameters, such as population size, crossover probability, mutation probability, reproduction probability, max tree depth, function set and generation numbers to find the optimal values for problem-solving. The probabilities of crossover and mutation are determined based on the application, but the probability of mutation is typically much smaller than that of crossover.

### 3. METHODOLOGY

#### 3.1 Field data collection

Field data such as current velocity, sediment concentration, and flow depth were collected at the Wat Bang Hua Suea station between October and September 2019 (Figure 2). Water levels were collected at Bangkok Port, the Wat Bang Hua Suea and

Chulachumklao Fort stations. The hydrographic department provided some hydrologic data. Bangkok Port's, the Wat Bang Hua Suea station's and Chulachomklao Fort station's distances from the mouth of the Chao Phraya River are 30 km, 14 km and 3 km, respectively. Instantaneous flow velocity was measured at any flow depth using a propeller current meter.



**Figure 2** Locations of the field measurement.

The flow depths were measured using an echo sounder and a GPS, which were installed in a flat aluminum boat that travelled throughout the study area. The echo sounder works by pulsing ultrasonic wave signals transmitted from the sound wave transducer toward the river bed, from which the signal is reflected back to the sound wave sensor. Computation of the water depth value is based on the celerity of the sound wave and the travel time for the sound waves to reach the bottom and reflect back. The accuracy of these water level

measurements is within  $\pm(1 \text{ cm} + 0.1\%)$  of water depth.

The flow velocity at the area's boundary was measured using the current meter (model FP211, Global Water). This tool features water flow velocity measurements ranging from 0.1 m/s to 6.1 m/s and a measurement accuracy within 0.03048 m/s. The front of the impeller was parallel to the direction of water flow. The measurements were taken when the water flowed, and the device's propeller was rotated around the horizontal axis for  $N$  rotations each time. The meter was installed at the downstream location to measure the flow velocities at different points in time during the test.

Suspended concentrations data were collected using the OBS-3A concentration meter, which uses the nephelometric method: It emits infrared light to the suspended particles in the water. Then, it uses infrared sensors to detect the scattered suspended particles. This tool's accuracy depends on the type of sludge: 2% for mud and 3.5% for sand.

### 3.2 Process of model development

To predict flow rate, flow depths are used as the input data. To predict sediment transport rate, the input data include flow depths, flow rates and water surface slopes. The data (current velocity, sediment concentration and depth) were measured in the lower Chao Phraya River between November 2015 and December 2016, which cover all the tide seasons [42].

GP testing and determination was achieved through the determination of parameters. Population size consists of the number of individuals involved in each generation; Crossover probability

is the possibility of a crossover in a generation; Mutation probability is the possibility of mutation or creating a new generation in each individual; Reproduction probability is the possibility of individuals with high fitness to be selected for producing offspring of the next generation; Max tree depth is to avoid excessive growth of its individuals; function set is the set of calculated parameters consisted of arithmetic operations; and generation number is to determine the length of the genetic algorithm process.

By experimentally, the values of parameters used to set up GP in this study are summarized in Table 1. These parameters were set as constants, whereas the generation number was tested at 500, 1,000, 1,500, 2,500 and 3,000 to obtain the appropriate generation number.

After the appropriate generation number was obtained, it was fixed as a constant, and the next parameter was varied until it was found. To control the solution's complexity, only basic arithmetic operations were used as the members of the functional set. The root mean square error (RMSE) and correlation coefficient ( $r$ ) values were used in the objective functions to train the GP model.

To create a GP-based model, the software GPdotNET v5.0 [40], an open-source computer program for running tree-based GP, was used. The data were split into two periods: the spring tide period and the neap tide period. The spring tide and neap tide data were each divided into 2 parts, one of which was used for the training

processes and the other of which was used for the testing processes.

Due to lacking of data of the mass influx and out flux of sediment in

the study areas, the input data for the predictions contain the following elements.

**Table 1.** Parameters selected for GP set-up.

| Parameter                | Set-up value                       |
|--------------------------|------------------------------------|
| Population size          | 500                                |
| Crossover probability    | 0.90                               |
| Mutation probability     | 0.05                               |
| Reproduction probability | 0.20                               |
| Max tree depth           | 5.0                                |
| Function set             | +, -, * and /                      |
| Generation number        | 500, 1,000, 1,500, 2,500 and 3,000 |

1) To predict the flow rate, the input data are the water levels at the Bangkok Port station and Chulachumklao Fort station. The data sets for developing GP models to predict discharge were 131. Those data sets were divided 70% (92 data sets) for the training process and 30% (39 data sets) for testing process. Mixed data of spring and neap tide were used.

2) To predict the sediment transport rate, the input data are the flow rates and flow depths at the Wat Bang Hua Suea station. The data sets for developing the GP model to predict sediment transport rate were 41. Those data sets were divided into two types, i.e., 25 data sets for spring tide and 16 data sets for neap tide. In addition, for spring tide, the data sets of 25 were divided 56% (14 data sets) for the training process and 44% (11 data sets) for the testing process. Those data sets for neap tide were divided 50% (8 data

sets) for the training process and 50% (8 data sets) for the testing process

### 3.3 Criteria for evaluating model's performance

The correlation coefficient ( $r$ ), RMSE and mean absolute error (MAE) were used in the model efficiency comparison. The correlation coefficient is used mainly to indicate accuracy because when the correlation coefficient is exactly 1, it indicates perfect accuracy. In contrast, when the correlation coefficient is close to 0, it indicates low accuracy. The performance evaluation criteria are given as follows:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i^{obs} - X_{mean}^{obs})(X_i^{pre} - X_{mean}^{pre})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i^{obs} - X_{mean}^{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i^{pre} - X_{mean}^{pre})^2}} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i^{obs} - X_i^{pre})^2}{N}} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_i^{obs} - X_i^{pre}| \quad (5)$$

where  $X_i^{obs}$  is the observed data,  $X_i^{pre}$  is the predicted result,  $X_{mean}^{obs}$  is the mean observed value,  $X_{mean}^{pre}$  is the mean predicted value and  $N$  is the number of observations

#### 4. RESULTS AND DISCUSSION

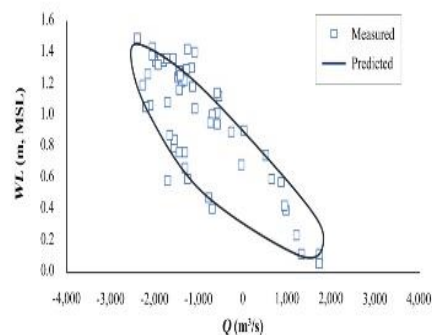
The flow rate and sediment transport rate field data were collected at Wat Bang Hua Suea station between 8 October and 21 November of 2019. There were 45 data sets, which were divided into 19 sets of spring tide data and 26 sets of neap tide data. The GP model was used to simulate and predict the flow rate and sediment transport rate, and the predictions were compared to the field data to evaluate their accuracy.

##### 4.1 Hydrologic characteristics of flow influenced by tides

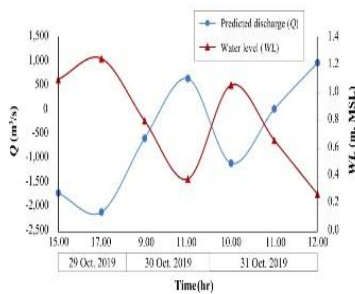
The relation between water levels (m) and flow rates ( $m^3/s$ ) in the lower Chao Phraya River involves multiple loops, in which the water levels are associated with various flow rates depending on tidal levels. Accuracy in flow rate prediction is measured by the similarity between the rating curve and the data format.

The relationship between water levels and flow rates at Wat Bang Hua Suea station between October and November 2019 is indicated by loops,

where the flows were in the range of -2,300  $m^3/s$  to +2,000  $m^3/s$  and the water levels were in the range of +0.10 m to +1.50 m (mean sea level), as shown in Figure3. The discharge during the ebb tide (falling tide) was positive while the discharge at the same stage during the flood tide (rising tide) was negative. Those discharges at the same stage were different in magnitudes. Moreover, the maximum and minimum flow rates in the river did not occur at the time when the water level reached its highest or lowest. Because seawater levels are influenced by tides, as shown in Figure4, the minimum flow rates occurred when the water level reached its peak and sea water flowed into the river and impeded the river from flowing into the sea. In contrast, the maximum flow rates occurred at the time when the water level reached its lowest, when the water in the river flowed into the sea.



**Figure 3** Water levels and flow rates at Wat Bang Hua Suea station (Oct. - Nov. 2019).



**Figure 4** Water levels and flow rates at Wat Bang Hua Suea station (29 - 31 Oct. 2019)

The relationship between water levels and cross-sections was determined in the form of power regression using Chen and Chiu's method [6], which uses a constant ratio of the mean velocity ( $V_{mean}$ ) and maximum velocity ( $V_{max}$ ) of the considered river section. Within the range of data measured this study, the cross-sectional area of flow was determined and the flow rate at Wat Bang Hua Suea station can be expressed as follows:

$$Q = (0.6415 V_{max}) A \quad (6)$$

where  $Q$  is flow rate ( $m^3/s$ ),  $V_{max}$  is the maximum velocity ( $m/s$ ), and  $A$  is the cross-sectional area ( $m^2$ )

## 4.2 Prediction of flow rate using GP model

Based on literature reviews, no previous study of river flow rates has used flow direction in a machine learning model. The lower Chao Phraya River's flow has two directions: (i) flow from upstream mentioned above, the flow rate has two directions (either upstream fresh water flows into the sea

[flow rate is positive: +] or seawater flows backward into the river [flow rate is negative: -]), with flow rates of  $-3,000 m^3/s$  to  $+3,000 m^3/s$ . The trend of flow rate closely relates to the flow velocity during spring tide. During neap tide, the flow rate is unidirectional: The seawater flows into the river, meaning the flow rate out to the sea (+) and (ii) flow from the sea into river (-). This study's flow rate prediction is based on a mathematical model using GP principles for correlation analysis, which is used to convert data into mathematical equations.

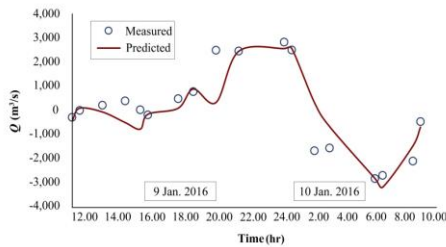
Using data sets of 131 for field survey during November 2015 and March 2016. The developed equation containing flow rates ( $m^3/s$ ) and water levels (m) covers all tide seasons, including spring tide and neap tide, and can be expressed as follows:

$$Q = f_1 (WL_1, WL_2, \text{flow direction}) \quad (7)$$

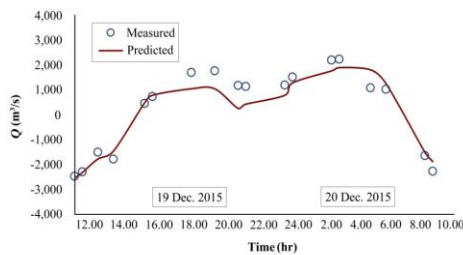
where  $Q$  is the predicted flow rate ( $m^3/s$ ),  $WL_1$  is the water level at Bangkok port station (m),  $WL_2$  is the water level at Chulachumklao Fort (m) and flow direction is represented by a positive or negative.

The predicted flow rate results using GP and the looped rating curve were compared with flows in the field measurement. As is negative. The neap tide period has a smaller flow rate range than the spring tide period, with flow rates ranging from  $-2,500 m^3/s$  to  $+2,050 m^3/s$ .

The flow rate forecasting performance of this method was satisfactory. The relations between observed and predicted flow rates during the spring and neap tides are shown in Figures 5 and 6, respectively.



**Figure 5** GP model flow rate prediction during spring tide.



**Figure 6** GP model flow rate prediction during neap tide.

The GP model (Eq. 7) demonstrated satisfactory performance with a correlation coefficient ( $r$ ) of 0.887, an RMSE of 710.491 m<sup>3</sup>/s and an MAE of 539.885 m<sup>3</sup>/s for the training processes. For the testing processes, those values were 0.943, 818.988 m<sup>3</sup>/s and 665.242 m<sup>3</sup>/s, respectively.

### 4.3 Prediction of sediment transport rate using GP model

Spring tide and neap tide influence the behaviour of flow rates and sediment transport rates in the lower Chao Phraya River. In the case of spring tide, flow rate and sediment transport rate have two directions, while the neap tide features a unidirectional flow, where the seawater flows into the river. Moreover, the estimated sediment transport rate closely correlates with the flow rate.

The sediment transport rate relationships may be classified into

three forms: (i) the relationship between the sediment transport rate and the flow rate, (ii) the relationships between the sediment transport rate and depth and between flow rate and depth, and (iii) the relationship among sediment transport rate, flow rate and water surface slope. These relationships can be illustrated using the linear and GP equations by further analysing the flow depth and surface slope data. As a result of the water level change caused by tidal influence on the river, water depth change causes changes in the flow and sediment transport rates. Additionally, the difference between the upstream and downstream water levels determines the water surface slope and the flow direction caused by the tide's influence. All of these factors influence the sediment transport rate. The hydraulics data indicated that sediment transport rate changes in the tidal river are influenced by spring and neap tides.

The developed equation can be expressed either functions of flow rates and flow depth or flow rate and water surface slope can be expressed as follows:

$$q_s = f_2(Q, y, \text{flow direction}) \quad (8)$$

$$q_s = f_3(Q, S_w, \text{flow direction}) \quad (9)$$

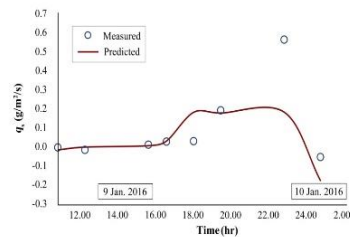
where  $q_s$  is the nearshore sediment transport rate (g/m<sup>2</sup>/s),  $Q$  is the flow rate (m<sup>3</sup>/s),  $y$  is the flow depth (m),  $S_w$  is the water surface slope, and flow direction is represented by a positive or negative.

Prediction results obtained from Eqs. (8) and (9) were compared with field measurements. Then, statistical indexes were used to compare the predicted results to select the most optimal model. It was found that the GP model using Eq. (8) based on the flow

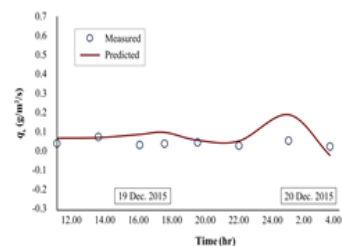
rate and flow depth variables predicted the sediment transport rate with the value closest to the observed data in both spring and neap tides. These results had high correlation coefficient ( $r$ ) values in both the training processes and the testing processes. It was found that the model's prediction results reflected satisfactory performance and were highly accurate in both the spring tide period and neap tide period, as shown in Figures 7 and 8.

These results had high correlation coefficient ( $r$ ) values in both the training processes and the testing processes. It was found that the model's prediction results reflected satisfactory performance and were highly accurate in both the spring tide period and neap tide period. However, it is noted that the model is incapable of predicting the sudden increase in the sediment transport rate.

The GP model using Eq. (8) demonstrated satisfactory performance during the spring tide period with a correlation coefficient ( $r$ ) of 0.960, an RMSE of 0.054 g/m<sup>2</sup>/s and an MAE of 0.027 g/m<sup>2</sup>/s for the training processes. For the testing processes, the values were 0.728, 0.147 g/m<sup>2</sup>/s and 0.113 g/m<sup>2</sup>/s, respectively. During the neap tide period, the GP model shows a correlation coefficient ( $r$ ) value of 0.969, an RMSE of 0.026 g/m<sup>2</sup>/s and an MAE of 0.017 g/m<sup>2</sup>/s for the training processes. Whereas the same values are 0.645, 0.060 g/m<sup>2</sup>/s and 0.045 g/m<sup>2</sup>/s, respectively, for the testing processes. For this case, the value of  $r$  is quite low because of the limited amount of field data and the nature of variation of parameters involved in the tidal phenomena.



**Figure 7** Spring tide period sediment transport rate prediction



**Figure 8** Neap tide period sediment transport rate prediction.

The results demonstrate that the proposed GP model with high  $r$  values and low RMSE and MAE values can predict the flow and nearshore sediment transport rates with satisfactory performance. The proposed GP model identified the flow direction as an important parameter affecting flow and sediment transport rates in the studied tidal river. Additionally, it is clear that this GP model can be used for practical flow and nearshore sediment transport rate applications in this tidal river.

## 5. CONCLUSIONS

The flow direction, which was used in the proposed GP model, was shown to be an important parameter affecting flow and nearshore sediment transport rates in the studied tidal river. The prediction results show accurate

performance, correlation coefficient ( $r$ ) values greater than 0.88 for training and testing processes. Regarding the sediment transport rates, the GP model equation used to predict these rates demonstrated good performance with RMSE and MAE values close to those of the observed data. The spring tide flow and sediment transport rates determined by the GP model are more accurate than those for the neap tide period. This difference is because during spring tide, there is a greater water level change than the change during neap tide. For this reason, water level changes during the spring tide period had a greater influence on the flow rate and velocity than the changes during the neap tide period. Given that compared to for the spring tide period, the predicted flow rate was a little bit more accurate for the neap tide period, the predicted sediment transport rate for the neap tide was a little bit more accurate as well. Hence, this model can be applied to effectively predict the flow rate and nearshore sediment load in the lower Chao Phraya River.

## 6. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank researchers of WAREE, KMUTT for their assistance in field measurement. Partly financial support from Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) is also appreciated.

## 7. REFERENCES

- [1] Hicks S.D. Understanding tides. NOAA National Ocean Service. Silver Spring. MD. USA. 2006. DOI: 10.25607/OBP-157.
- [2] Maghrebi M.F. and Givehchi M. Discharge estimation in a tidal river with partially reverse flow. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 2010; 136(5): 266-274. DOI:10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000049.
- [3] Chinnarasri C. and Kemden N. Discharge estimation of a tidal river with reverse flow: Case of the Chao Phraya River, Thailand. Journal of Hydrologic Engineering. 2016; 21(4). DOI:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001323.
- [4] Voulgaris G. and Trowbridge J.H. Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for turbulence Measurements. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 1998; 15(1): 272-289. DOI:10.1175/15200426(1998)015<0272:EOTADV>2.0.O;2.
- [5] Chinnarasri C., Phothiwijit K. and Apipattanasri S. A study of flow characteristics in the lower Chao Phraya River using Acoustic Doppler Velocity Technology, Engineering Journal of Research and Development. 2017; 40(2): 217-235.
- [6] Chen Y.C., and Chiu C.L. An efficient method of discharge measurement in tidal streams. Journal of Hydrology. 2002; 265(1-4): 212-224. DOI:10.1016/S0022-1694(02)00100-2.
- [7] Yaseen Z.M., El-shafie A., Jaafar O., et al. Artificial intelligence based models for stream-flow forecasting: 2000-2015. J. Hydrol. 2015; 530: 829-844. DOI:10.1016/j.jhydrol.2015.10.038.
- [8] Danandeh Mehr A., Nourani V., Kahya E., et al. Genetic

- programming in water resources engineering: a state-of-the-art review. *Journal of Hydrology*. 2018; 566:643-667.  
DOI:10.1016/j.jhydrol.2018.09.043.
- [9] Govindaraju R.S. Artificial neural networks in hydrology II: Hydrologic applications. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2000; 5: 124-137.  
DOI:10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:2(124).
- [10] Herath H.M.V.V., Chadalawada J., and Babovic V. Genetic programming for hydrological applications: to model or to forecast that is the question. *Journal of Hydroinformatics*. 2021;  
DOI:10.2166/hydro.2021.179.
- [11] Koza J.R. Genetic Programming: on the programming of computers by means of natural selection. MIT Press, Cambridge MA. 1992.
- [12] Fallah-Mehdipour E. and Haddad O.B. Application of genetic programming in hydrology. In: *Handbook of Genetic Programming Applications* (A. H. Gandomi, A. H. Alavi and C. Ryan, eds.) Springer. 2015: 59-70.
- [13] Babovic V. and Keijzer M. Rainfall runoff modelling based on genetic programming, *Hydrology Research*. 2002; 33(5): 331-346.  
DOI:10.2166/ nh.2002.0012.
- [14] Havlicek V., Hanel M., Maca P., et al. Incorporating basic hydrological concepts into genetic programming for rainfall-runoff forecasting. *Computing*. 2013; 95(1): 363-380.  
DOI:10.1007/s00607-013-0298-0.
- [15] Mediero L., Garrote L. and Chavez- Jimenez A. Improving probabilistic flood forecasting through a data assimilation scheme based on genetic programming, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 2012; 12: 3719-3732.  
DOI:10.5194/nhess-12-3719-2012, 2012.
- [16] Ji H., Songlin W., Qinglin W., et al. Douhe reservoir flood forecasting model based on data mining technology. *Procedia Environmental Sciences*. 2012; 12: 93-98.  
DOI: 10.1016/j.proenv.2012.01.252
- [17] Fallah-Mehdipour E., Bozorg Haddad O.B., and Marino M.A. Developing reservoir operational decision rule by Genetic Programming. *Journal of Hydroinformatics*. 2013; 15(1): 103-119. DOI: 10.2166/hydro.2012.140.
- [18] Watanabe N., Fukami K., Imamura H., et al. Flood forecasting technology with radar-derived rainfall data using genetic programming, *International Joint Conference on Neural Networks*. Atlanta GA, USA, 14-19 June 2009: pp. 3311-3318.
- [19] Hongyan L., Shan J., and Xinhua B. Application of genetic programming to identifying water-level and storage-capacity curve of the Xingxingshao Reservoir, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC 2009)*.

- Wuhan, China, 27-31 March 2009: pp. 9-11.
- [20] Aytek A., Kisi O., and Guven A. A genetic programming technique for lake level modeling. *Hydrology Research*. 2014; 45(4-5): 529–539. DOI: 10.2166/ nh.2013.069.
- [21] Kasiviswanathan K.S., Saravanan S., Balamurugan M., et al. Genetic Programming based monthly groundwater level forecast models with uncertainty quantification. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2016; 2(27): 1-11. DOI: 10.1007/s40808-016- 0083-0.
- [22] Khu S.T., Liong S.Y., Babovic V., et al. Genetic programming and its application in real-time runoff forecasting. *Journal of the American Water Resources Association*. 2001; 37(2): 439–451. DOI: 10.1111/ j.1752-1688.2001.tb00980.x.
- [23] Kalra R. and Deo M.C. Genetic programming for retrieving missing information in wave records along the west coast of India. *Applied Ocean Research*. 2007; 29(3): 99-111. DOI: 10.1016/j.apor.2007.11.002.
- [24] Ustoorikar K. and Deo M.C. Filling up gaps in wave data with genetic programming. *Marine Structures*. 2008; 21: 177-195. DOI: 10.1016/ j.marstruc.2007.12.001.
- [25] Gaur S. and Deo M.C. Real-time wave forecasting using genetic programming. *Ocean Engineering*. 2008; 35(11-12): 1166-1172. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2008.04.007.
- [26] Londhe S.N. Soft computing approach for real-time estimation for missing wave heights. *Ocean Engineering*. 2008; 35: 1080-1089. DOI:10.1016/j.oceaneng.2008.05.003.
- [27] Roy C., Motamedi S., Hashim R., et al. A comparative study for estimation of wave height using traditional and hybrid soft-computing methods. *Environmental Earth Sciences*. 2016; 75(7): 590. DOI: 10.1007/s12665-015- 5221-x.
- [28] Aytek A. and Kisi Ö. A genetic programming approach to suspended sediment modeling. *Journal of Hydrology*. 2008; 351(3–4): 288–298. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.12.005.
- [29] Rezapour O.M., Shui L.T., and Dehghani A.A. Review of genetic algorithm model for suspended sediment estimation. *Aust. J. Basic Appl. Sci*. 2010; 4(8): 3354-3359.
- [30] Guven A. and Kisi O. Estimation of suspended sediment yield in natural rivers using machine-coded linear genetic programming. *Water Resources Management*. 2011; 25(2): 691-704. DOI: 10.1007/s11269-010- 9721-x.
- [31] Kisi O. and Shiri J. River suspended sediment estimation by climatic variables implication: Comparative study among soft computing techniques. *Comput. Geosci*. 2012; 43: 73-82. DOI:10.1016/j.cageo.2012.02.007.

- [32] Danandeh Mehr A. and Sorman A.U. Streamflow and sediment load prediction using linear genetic programming. *Uludag University Journal of The Faculty of Engineering*. 2018; 23(2): 323-332. DOI: 10.17482/UUmfd.352833.
- [33] Idrees M.B., Jehanzaib M., Kim D., et al. Comprehensive evaluation of machine learning models for suspended sediment load inflow prediction in a reservoir. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2021; 35: 1805-1823. DOI: 10.1007/s00477-021-01982-6.
- [34] Banzhaf W., Nordin P., Keller R. E., et al. Genetic programming: An introduction on the automatic evolution of computer programs and its applications. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Francisco, California. 1998.
- [35] Friedel M.J. A data-driven approach for modeling post-fire debris-flow volumes and their uncertainty. *Environ. Model. Softw.* 2011; 26: 1583–1598. DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.07.014.
- [36] Dumedah G. Toward essential union between evolutionary strategy and data assimilation for model diagnostics: An application for reducing the search space of optimization problems using hydrologic genome map. *Environ. Model. Softw.* 2014; 69: 342–352. DOI:10.1016/j.envsoft.2014.09.025.
- [37] Maier H.R., Kapelan Z., Kasprzyk J., et al. Evolutionary algorithms and other metaheuristics in water resources: current status, research challenges and future directions. *Environ. Model. Softw.* 2014; 62: 271–299. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.09.013.
- [38] Tran H.D., Muttil N., and Perera B.J.C. Selection of significant input variables for time series forecasting. *Environ. Model. Softw.* 2015; 64: 156–163. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.11.018.
- [39] Zimmer A., Schmidt A., Ostfeld A., et al. Evolutionary algorithm enhancement for model predictive control and real-time decision support. *Environ. Model. Softw.* 2015; 69:330–341. DOI: 10.1016/j.envsoft.2015.03.005.
- [40] Hrnjica B. and Danandeh Mehr A. Optimized Genetic Programming Applications: Emerging Research and Opportunities. IGI Global, Hershey, PA. 2019: p. 310.
- [41] Danandeh Mehr A. and Safari M.J.S. Genetic programming for streamflow forecasting: a concise review of univariate models with a case study. *Advances in Streamflow Forecasting*. 2021; 193-214: DOI: 10.1016/B978-0-12-820673-7.00007-X.
- [42] Thammapraserdee N. and Chinnarasri C. Behavior of suspended sediment at the lower Chao Phraya River. *Engineering Journal of Research and Development*. 2019; 30(3): 7-29.

# การจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 33 บัสโดยการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

## Power Distribution System 33 Bus Simulation by Connecting a Distributed Photovoltaic Power Generation to Improve Power Loss

สาคร วุฒิพัฒน์พันธุ์<sup>1</sup>, ปพน งามประเสริฐ<sup>1</sup>, นัฐโชติ รักษ์ไทยเจริญชีพ<sup>1\*</sup>  
Sakhon Woothipatanapan<sup>1</sup>, Papon Ngamprasert<sup>1</sup>,  
Nattachote Rugthaicharoencheep<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,  
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thailand

\*E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 33 บัสโดยการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูญเสีย การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยมีผลกระทบทางเทคนิคภายใต้ข้อจำกัด เช่น ช่วงเวลาระยะของโหลด ระยะทางจากจุดต้นทางไปยังกลุ่มโหลด ดังนั้นจึงนำเสนอบทความนี้เพื่อแก้ไขปัญหากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยการเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจำหน่าย 33 บัสในโปรแกรม MATLAB และอัลกอริทึมการไหลของพลังงานร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดพลังงานแสงอาทิตย์ ผลการวิจัยพบว่าการเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายได้

**คำสำคัญ :** กำลังไฟฟ้าสูญเสีย โฟโตโวลตาอิก ระบบจำหน่ายไฟฟ้า

### ABSTRACT

This paper presents a power distribution system 33 bus simulation by connecting a distributed photovoltaic power generation to improve power loss. Reducing power loss is a factor affecting the efficiency of the power distribution system. It has technical impacts under limitations such as intervals of load and distance from source point to load group. Therefore, this paper presented to solve the problem of power loss in the power distribution system synergy photovoltaic power plant using mathematical modelling of a 33-bus distribution system in MATLAB program and a power flow algorithm in conjunction with a distributed generator type photovoltaic power plant. The results showed the connect photovoltaic power plant can improve the power loss in the distribution system.

**Keyword:** Power Loss, Photovoltaic, Distribution System

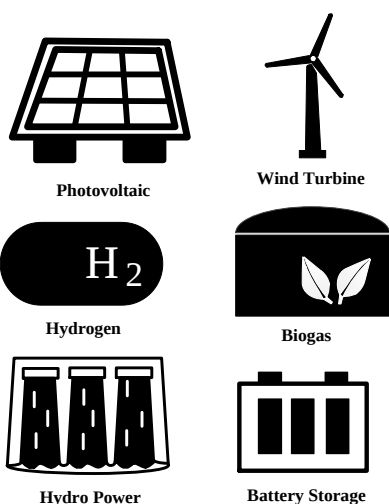
Received 16-08-2022

Revised 22-12-2022

Accepted 22-12-2022

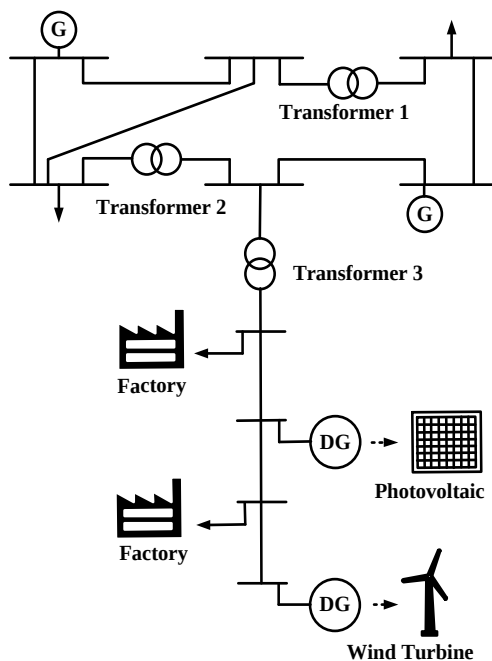
## 1. บทนำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว [1] เป็นแนวทางที่ใช้กับเทคโนโลยีขนาดเล็กเพื่อผลิตไฟฟ้าให้กับผู้ใช้พลังงานที่อยู่ใกล้แนวปลายสายส่ง เทคโนโลยีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed generation: DG) ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแยกส่วน (และบางครั้งเป็นพลังงานหมุนเวียน) สามารถใช้ประโยชน์ได้หลายประการ ตัวอย่าง เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิง พลังงานจากไฮโดรเจน และพลังงานก๊าซชีวภาพ [2-3] ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว

การจัดวางเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายเพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ภายใต้เงื่อนไขทางเทคนิค สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า โซลูชันการสร้างแบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 33 บัส [4] เพื่อหาคำตอบด้วยเทคนิคที่นำเสนอการปรับปรุงการสูญเสียพลังงานในระบบจำหน่ายโดยการเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ดังแสดงในภาพที่ 2

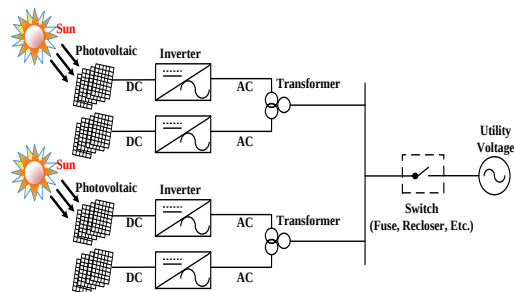


ภาพที่ 2 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว

กำลังไฟฟ้าสูญเสียเป็นดัชนีที่สำคัญสำหรับการประเมินทางเทคนิคในการระบุตำแหน่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (PV-DG) กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดที่โหลดแต่ละระดับหลังการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นองค์ประกอบหลักในฟังก์ชันนี้ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียให้เหลือน้อยที่สุด หลังจากติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยมีการวางแผนจัดการหน่วยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่จำนวนหนึ่งสำหรับการจัดวาง สำหรับพื้นที่ในการค้นหาบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งจะมีขนาดใหญ่มาก [5]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูญเสีย [6] ดังแสดงในภาพที่ 3 ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับเครื่องกำเนิด

ไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้า 33 บัส  
มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์เทคนิคการเชื่อมต่อ  
โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดกำลังไฟฟ้า  
สูญเสียในระบบจำหน่าย

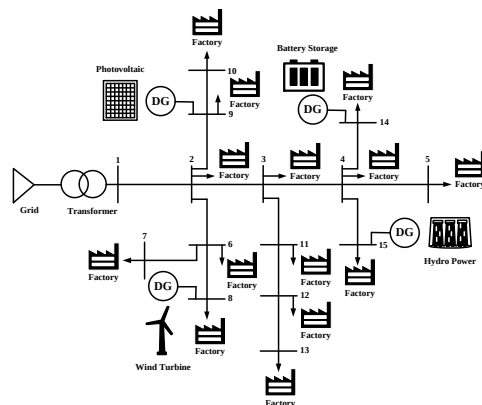


ภาพที่ 3 ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงาน  
แสงอาทิตย์

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 กำลังไฟฟ้าสูญเสีย

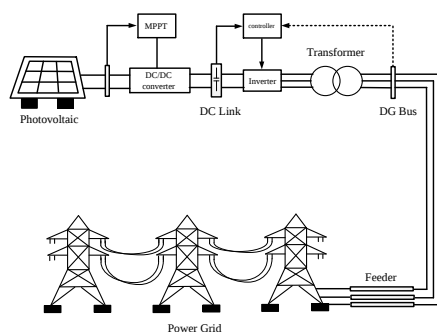
กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบจำหน่ายโดยการ  
วิเคราะห์การเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์  
ร่วมกับโหลดในระบบจำหน่าย [5] การสร้าง  
แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้ารวมกับการเข้าถึง  
ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ทิศทางการไหลของ  
พลังงานส่วนใหญ่จะเป็นทางด้านเครือข่ายมากกว่า  
ทางด้านโหลดในระบบจำหน่ายแบบเดิมที่ไม่มีการ  
เข้าถึงระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ กระแสที่ไหล  
เข้าสู่ทางด้านโหลดมีระยะห่างระหว่างสถานีย่อยและ  
ด้านโหลด กระแสที่ไหลจากสถานีย่อยคือกระแสที่ไหล  
จากไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ระยะห่างระหว่างสถานี  
ย่อยกับพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ และระยะห่าง  
ระหว่างพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์กับด้านโหลด [7]  
การสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวและโหลด  
ด้วยระบบจำหน่ายแบบเรเดียลที่แสดงโดยเมทริกซ์  
อิมพีแดนซ์บัส เมื่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียระบบจำหน่าย  
แบบเรเดียลจะเทียบเท่ากับโหลดเดียวที่มีการเชื่อมต่อ  
และโหลดทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ระบบจำหน่ายแบบเรเดียลร่วมกับเครื่อง  
กำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว

### 2.2 โฟโตโวลตาอิก

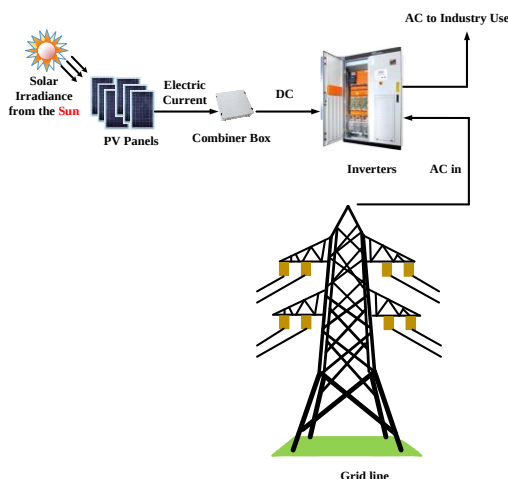
ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการ  
ผลิตไฟฟ้าผ่านสารกึ่งตัวนำ [8] การผลิตไฟฟ้าจาก  
พลังงานแสงอาทิตย์ (PV) เป็นพลังงานหมุนเวียนจาก  
ธรรมชาติ มีความปลอดภัยและยั่งยืน พลังงาน  
แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่แปลงแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้า  
โดยใช้ความเข้มของแสงอาทิตย์ ระบบพลังงาน  
แสงอาทิตย์ที่ใช้สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์  
จำนวนมากเชื่อมต่อกับกริดทุกที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง  
ในประเทศที่พัฒนาแล้ว [9] แผนผังของระบบพลังงาน  
แสงอาทิตย์ ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แผนผังของระบบพลังงานแสงอาทิตย์

จากภาพที่ 5 ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์  
รวมถึงระบบอาร์เรย์ ประกอบด้วยแผงโซลาร์เซลล์  
ตั้งแต่สองแผงขึ้นไปที่แปลงแสงจากดวงอาทิตย์เป็น

ไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่ไม่ธรรมดา สามารถใช้กับระบบกักเก็บแรงดันไฟฟ้าแบบไดนามิก (DVR) สำหรับการจัดเก็บพลังงาน ระบบนี้จะจ่ายพลังงานให้กับแหล่งจ่ายกระแสตรงซึ่งทำหน้าที่โดยระบบอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง DC เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ AC สำหรับการใช้งานกับระบบ DVR ต่อไป Maximum power point tracking (MPPT) คือ อัลกอริทึมหรือรูปแบบการคำนวณอย่างหนึ่ง ที่นำมาใช้กับการทำงานของเครื่องผลิตไฟฟ้ากระแสตรงแบบจำลองวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในภาพที่ 6 [10]



ภาพที่ 6 ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

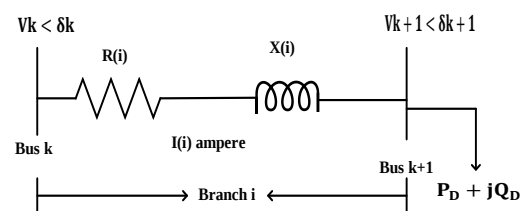
ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ไฟดับในเมืองขนาดใหญ่ทั้งหมดเกิดจากการโหลดเกินในสายส่งซึ่งเชื่อมต่อบรรณจําหน่ายแบบกระจายตัว ดังนั้นกลยุทธ์การควบคุมพลังงานที่บทความนี้ออกแบบการตอบสนองความต้องการโหลดภายในระบบจําหน่ายระดับสูงสุดและการใช้กลยุทธ์นี้ก็ลดการส่งกำลังทางไกล การป้อนพลังงานแบบอัตโนมัติและแบบทันทีทันใดจากภายนอก ระบบจ่ายไฟฟ้าแบบไฮบริดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ถูกตั้งโปรแกรมให้เป็นแบบจำลองการทำงานการจ่ายไฟฟ้าแบบระบบไฟฟ้าแยกโดด (Islanding) ที่แยกออกมา ซึ่งสามารถ

เข้าถึงพลังงานใหม่ได้สูงสุดและทำงานที่โหลดเชื่อมต่อกริดเพื่อส่งพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มเติม [11]

### 2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์การไหลของโหลดในระบบจําหน่ายแบบกระจายตัวได้รับการแก้ไขโดยใช้วิธีการไหลของโหลดทั้งไปข้างหน้าและย้อนหลัง (Power flow) [12-13]

ไดอะแกรมเส้นเดียวในส่วนของระบบจําหน่ายแบบกระจายตัว ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ระบบจําหน่ายแบบเรเดียล 2 บัส

ซึ่งแสดง 2 บัส  $k$  และ  $k+1$  เชื่อมต่อผ่านพารามิเตอร์ (Branch)  $i$  ความต้านทานและปฏิกิริยาของพารามิเตอร์  $i$  แสดงโดย  $R_i$  และ  $X_i$  ตามลำดับ ในขณะที่  $I(i)$  คือกระแสที่ไหลผ่านบรานช์  $i$  กำลังไฟฟ้าสูญเสียข้ามพารามิเตอร์  $i$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)-(2)

$$P_{loss(i)} = R_{(i)} \times \frac{P_{k+1}^2 + Q_{k+1}^2}{|V_{k+1}|^2} \quad (1)$$

$$Q_{loss(i)} = X_{(i)} \times \frac{P_{k+1}^2 + Q_{k+1}^2}{|V_{k+1}|^2} \quad (2)$$

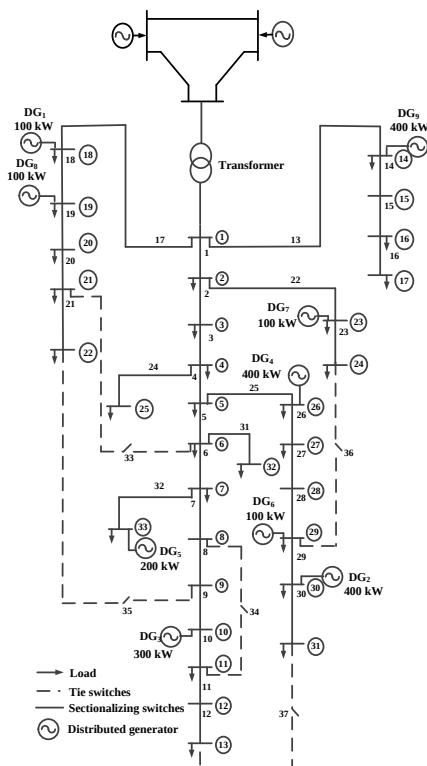
โดยที่  $P_{loss(i)}$  และ  $Q_{loss(i)}$  คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียแบบแอกทีฟและแบบรีแอกทีฟทั่วทั้งพารามิเตอร์  $i$  กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดในระบบจําหน่ายแบบกระจายตัว สามารถคำนวณได้โดยการรวมกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ใช้งานและปฏิกิริยาของพารามิเตอร์ทั้งหมดในระบบจําหน่าย กำลังไฟฟ้าสูญเสียระบบทั้งหมดสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ (3)

$$P_{loss\_total} = \sum_{i=1}^{no. of branches} P_{loss(i)} + Q_{loss(i)} \quad (3)$$

### 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 3.1 กรณีศึกษา

การศึกษากำหนดการปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยใช้ระบบจำหน่าย 33 บัส พร้อมติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวจากพลังงานแสงอาทิตย์ ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 โดอะแกรมเส้นเดียวของระบบจำหน่าย 33 บัส

ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวจำนวน 9 ยูนิท โดยติดตั้งที่บัสหมายเลข 10, 14, 18, 19, 23, 26, 29, 30 และ 33 มีกำลังการผลิตที่ 100 kW, 100 kW, 100 kW, 100 kW, 100 kW, 100 kW, 100 kW, 100 kW และ 100 kW ตามลำดับ กำลังการผลิตติดตั้งรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ

กระจายตัว คือ 1,000 kW ค่าฐานของโหลดเป็น 100 MVA และค่าฐานแรงดันคือ 12.66 kV

แต่ละพารามิเตอร์ในระบบมีสวิตช์แยกต่างหากเพื่อกำหนดค่าใหม่ ข้อมูลโหลดในตาราง [5], [14] สวิตช์หมายเลข 1-32 เป็นสวิตช์แบ่งส่วนบนตัวป้อนแบบกระจาย (ปกติปิด) และสวิตช์หมายเลข 33-37 เป็นสวิตช์ไทร์ (ปกติเปิด) โหลดทั้งหมดสำหรับระบบทดสอบนี้คือ 1,718.37 kW และ 1,226.90 kVar แรงดันไฟฟ้าของบัสทั้งหมดตั้งไว้ที่ 0.95 และ 1.05 p.u. โดยทำการทดสอบ 4 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 1

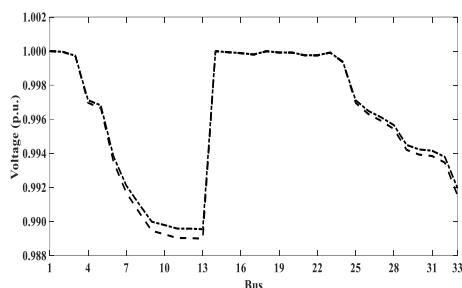
ตารางที่ 1 กรณีศึกษาการทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย 33 บัส ร่วมกับติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

| Case | Installation DGs (Unit) | PV at bus                          | Capacity of DGs |
|------|-------------------------|------------------------------------|-----------------|
| 1    | -                       | -                                  | -               |
| 2    | 3                       | 10, 14, 18                         | 300             |
| 3    | 6                       | 10, 14, 18, 19, 23, 26             | 600             |
| 4    | 9                       | 10, 14, 18, 19, 23, 26, 29, 30, 33 | 1000            |

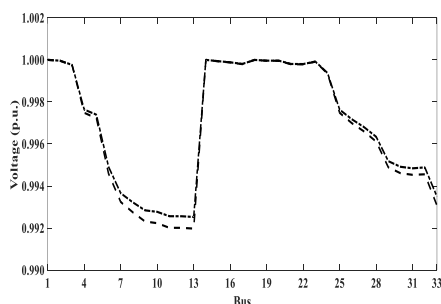
ผลลัพธ์ที่เป็นตัวเลขสำหรับทั้ง 4 กรณีแสดงในตารางที่ 2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดสำหรับกรณีที่ 1, 2, 3 และ 4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจะดีขึ้นดังแสดงให้เห็นได้ชัดเจนในกรณีที่ 4 มีกำลังการผลิตที่ 1,000 kW ผลลัพธ์ข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าสำหรับกรณีที่ 1 และ 3 ดังแสดงในภาพที่ 9 และภาพที่ 10

**ตารางที่ 2** รายงานผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย 33 บัส ร่วมกับติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

| Case | Vmin (p.u.) | PV at bus                          | Capacity of DGs | Total Power Loss (kW) |
|------|-------------|------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| 1    | 0.95        | -                                  | -               | 13.2316               |
| 2    | 0.95        | 10, 14, 18                         | 300             | 10.4515               |
| 3    | 0.95        | 10, 14, 18, 19, 23, 26             | 600             | 9.5910                |
| 4    | 0.95        | 10, 14, 18, 19, 23, 26, 29, 30, 33 | 1000            | 5.6347                |



**ภาพที่ 9** ข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่าย



**ภาพที่ 10** ข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่าย

จากภาพที่ 9 ข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่าย กรณีนี้แสดงถึง

กรณีพื้นฐาน กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด 13.23 kW ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และภาพที่ 10 ข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่าย มีกำลังการผลิตไฟฟ้า 600 kW กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม 9.59 kW ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถปรับลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายลงได้ โดยพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าเป็นหลัก

**ตารางที่ 3** บัสและกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัสทดสอบ

| Bus | Capacity of PV (kW) |
|-----|---------------------|
| 10  | 100                 |
| 14  | 100                 |
| 18  | 100                 |
| 19  | 100                 |
| 23  | 100                 |
| 26  | 100                 |
| 29  | 100                 |
| 30  | 100                 |
| 33  | 200                 |

#### 4. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้นำเสนอการจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ทดสอบด้วยไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบจำหน่าย 33 บัส ซึ่งได้ดำเนินการ 4 กรณี ดังนี้ กรณีที่ 1 ไม่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่าย กรณีที่ 2, 3 และ 4 ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวจำนวน 3, 6 และ 9 เครื่อง ในระบบจำหน่าย ตามลำดับ พบว่ากรณีที่ 2, 3 และ 4 สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ 2.78 kW, 3.64 kW และ 7.60 kW ตามลำดับ ดังนั้นกรณีที่ 4 ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวจำนวน 9 เครื่อง ในระบบจำหน่ายสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้สูงที่สุด

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล  
พระนคร ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือใน  
การจัดทำบทความนี้ซึ่งได้ช่วยให้บทความนี้สำเร็จ  
ลุล่วงอย่างสมบูรณ์

## 6. อ้างอิง

- [1] Ngamprasert P, Woothipatanapan S, Wannakarn P, et al. Improvement for Voltage Sag with Photovoltaic Performance on Distribution System. IET - International Electrical Engineering Transactions. 2020;6(1):28-33.
- [2] Ngamprasert P, Rugthaicharoencheep N, Woothipatanapan S. Application Improvement of Voltage Profile by Photovoltaic Farm on Distribution System. International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI2019). 2019 October 16-18; Pattaya, Thailand. 2019. P. 98-101.
- [3] Rugthaicharoencheep N, Ngamprasert P, Ruangsap N, et al. Minimize the Customer Outage for Improved Reliability in Distribution System with Photovoltaic Distributed Generation. 2022 57<sup>th</sup> International Universities Power Engineering Conference (UPEC). 2022 August 30 - September 02; Istanbul, Turkey. 2022.
- [4] Rupa JAM, Ganesh S. Power Flow Analysis for Radial Distribution System Using Backward/Forward Sweep Method. International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2014; 8(10):1628-1632.
- [5] Ngamprasert P, Wannakarn P, Rugthaicharoencheep N. Enhance Power Loss in Distribution System Synergy Photovoltaic Power Plant. 2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI). 2020 October 14-16; Chiangmai, Thailand. 2021. P.173-176.
- [6] Chang GW, Chinh NC. Coyote Optimization Algorithm-Based Approach for Strategic Planning of Photovoltaic Distributed Generation. IEEE Access. 2020;8:36180-90.
- [7] Wang Q, Wang T, Zheng Y, et al. Research on power loss of distribution network with photovoltaic access. The Journal of Engineering. 2017;2017(13):2257-60.
- [8] Ngamprasert P, Chatranont N, Rugthaicharoencheep N. The Analysis Harmonic for Connect Grid Photovoltaic Rooftop Synergy Distribution System. 2022 International Electrical Engineering Congress (iEECON). 2022 March 09-11; Khon Kaen, Thailand. 2022.
- [9] Sarkar F, Ramya R. Voltage sag and distortion mitigation in a hybrid power system using FACTS device. International Journal of Science and Research. 2015;4(5):311 - 317.
- [10] Aarif S, Randhawa ERK. Improvement of power quality using photovoltaic dynamic voltage restorer. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology. 2017;5(9):703-708.
- [11] Yang GEY, Yung CZ, Yong SL. Optimal placement for hybrid energy in micro-grid. IEEE International Conference on Power

- System Technology (POWERCON). 2016  
September 28 - October 01; Wollongong,  
NSW, Australia. 2016.
- [12] N. M. Nor, A. Ali, T. Ibrahim, and M. F. Romlie.  
Battery Storage for the Utility-Scale  
Distributed Photovoltaic Generations. IEEE  
Access. 2017;6:1137-1154.
- [13] Wang Y, Zhang N, Li H, et al. Linear three-  
phase power flow for unbalanced active  
distribution networks with PV nodes.  
CSEE Journal of Power and Energy  
Systems. 2017;3(3):321-324.
- [14] Savier JS, Das D. Impact of network  
reconfiguration on loss allocation of radial  
distribution systems. IEEE Trans. on Power  
Delivery. 2007;22(4):2473-2480.

# การเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 85 บัส ด้วยการติดตั้ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ Increasing Power Supply Performance in 85 Bus Distribution System Model with Installation Photovoltaic Distributed Generation

มนัส บุญเที่ยรทอง<sup>1</sup>, ณัฏพล เรืองทรัพย์<sup>1</sup>, นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ<sup>1\*</sup>  
Manat Boonthienthong<sup>1</sup>, Natchapol Ruangsap<sup>1</sup>, Nattachote Rugthaicharoencheep<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,  
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thailand  
Corresponding author. E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

## บทคัดย่อ

การจ่ายไฟมีความสำคัญต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นอย่างมาก ถ้าระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบที่น้อยจะส่งผลให้การจ่ายไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ และเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบโดยใช้แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 85 บัส ทดสอบในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อจำลองการทำงานใน 4 กรณีได้แก่ กรณีที่ 1 ไม่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า กรณีที่ 2, 3 และ 4 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์กำลังการผลิตติดตั้งรวม 2,700 1,950 และ 1,800 kW ตามลำดับ ผลลัพธ์กรณีที่ 2, 3 และ 4 สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียร้อยละ 30.27 49.37 และ 51.07 ตามลำดับ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าดีขึ้น

**คำสำคัญ :** ประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้า ระบบจำหน่ายไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์

## ABSTRACT

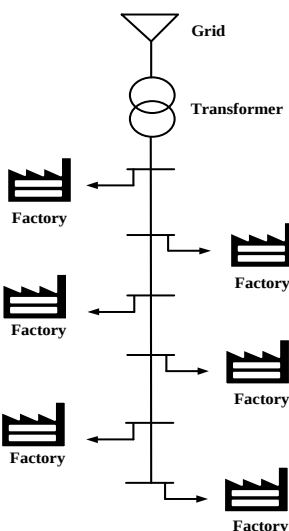
Power supply is very important to the distribution system. If distribution system has less power loss of system, result in a good power supply performance and increasing stability of system. The purpose of this research is to increase power supply performance in distribution system with reduction power loss of system, using 85-bus distribution system model, which was tested in MATLAB/Simulink program, to simulate operation in 4 cases. Case 1 no photovoltaic distributed generation was installed. Cases 2, 3 and 4 installed the photovoltaic distributed generation with total installed capacity of 2,700 1,950 and 1,800 kW, respectively. The results obtained from case 2, 3 and 4 found that the power loss can reduce for 30.27 49.37 and 51.07 percent, Consequently, the power supply performance of the distribution system was improved.

**Keyword:** Power Supply Performance, Distribution System, Photovoltaic Distributed Generation

Received 14-08-2022  
Revised 24-09-2022  
Accepted 20-12-2022

## 1. บทนำ

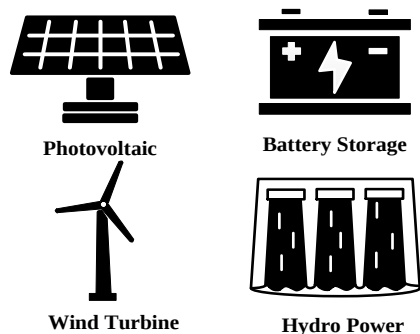
ความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้ามีความสำคัญมาก เนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นจุดเชื่อมต่อสุดท้ายระหว่างโครงข่ายไฟฟ้ากับผู้ใช้งานไฟฟ้า ตัวบ่งชี้หลักของระบบจำหน่ายไฟฟ้าจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับสถานีย่อยหลายแห่ง สถานีเหล่านี้จ่ายไฟฟ้าให้กับจุดจ่ายไฟของผู้ใช้ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล [1] จำเป็นต้องมีการสูญเสียการจ่ายไฟฟ้าที่ดีเนื่องจากเป็นระบบที่มีการจ่ายไฟฟ้าทางเดียวมีข้อดี คือ สามารถจ่ายไฟฟ้าให้ผู้ใช้งานได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเกิดลัดวงจรจะส่งผลให้มีการจ่ายไฟฟ้าให้กับสถานีย่อยทุกแห่งที่รับไฟฟ้าจากวงจร การเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าให้แก่วงจรจำหน่ายไฟฟ้าสามารถทำได้ด้วยวิธีการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย และปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (DG) [2] เป็นแนวทางที่ใช้กับเทคโนโลยีขนาดเล็กเพื่อผลิตไฟฟ้าให้กับผู้ใช้พลังงานที่อยู่บริเวณปลายสายส่ง เทคโนโลยีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว

สามารถใช้ประโยชน์ได้หลายประการ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ และระบบกักเก็บพลังงาน เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว

ในอดีตมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยการปรับปรุงแรงดันไฟฟ้า และลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เช่น ในปี ค.ศ. 2016 [3] ได้มีการศึกษาการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของ DSTATCOM และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (DG) ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า 30 บัส ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้สามารถหาขนาดที่เหมาะสมของ DSTATCOM และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้าส่งผลให้ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและปรับปรุงแรงดันไฟฟ้า ในปี ค.ศ. 2017 [4] ได้มีการศึกษาปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า 33 บัส วัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสมด้วยวิธี IA ผลลัพธ์สามารถปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าของระบบได้โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในปี ค.ศ. 2019 [5] มีการศึกษาปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าด้วย DSTATCOM ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยวิธีกลุ่มอนุภาคแบบไฮบริดและโครงข่ายประสาทเทียม (PSO-ANNs) ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้แสดงประสิทธิภาพของเทคนิค DSTATCOM สามารถปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายได้ ในปีเดียวกัน [6] ได้มีการศึกษาการเปรียบเทียบปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าโดยโซลาร์ฟาร์มในระบบจำหน่ายด้วยอัลกอริทึมการไหลของพลังงาน

ผลลัพธ์ของวิจัยนี้พบว่าโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายได้ ในปี ค.ศ. 2020 [7] ได้มีการศึกษาหาตำแหน่งที่ดีที่สุดและการปรับขนาดการชดเชยพลังงานรีแอกทีฟโดยใช้วิธีการแบบผสมผสานเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและปรับปรุงเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในปี ค.ศ. 2020 [8] ได้มีการศึกษาการปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา

ดังนั้นในบทความวิจัยนี้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าด้วยเทคนิคการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย และปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ทำการทดสอบในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 85 บัส โดยแบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษา

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 การจ่ายไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

การจ่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล ความเชื่อถือได้มีความสำคัญซึ่งมีหลักการสำคัญ คือ การออกแบบ และวางแผนระบบจำหน่ายไฟฟ้าอย่างประหยัด จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้สม่ำเสมอต่อเนื่อง และเวลาการหยุดจ่ายน้อยที่สุด [9-10]

การจ่ายไฟของระบบจำหน่ายไฟฟ้าสามารถทำได้ด้วยการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย และปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบ [11] มีบทบาทสำคัญ อุปกรณ์ในระบบได้รับการออกแบบให้ทำงานในช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด ถ้าอุปกรณ์ถูกจ่ายโดยแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าช่วงของตัวอุปกรณ์อายุการใช้งานของอุปกรณ์จะเกิดความเสียหายอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติในระบบจำหน่ายไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่กำหนดโดย IEC ช่วงแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน คือ  $\pm 5\%$  จากค่าแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด ( $0.95 - 1.05$  p.u.) ในระบบ

จำหน่ายไฟฟ้าสามารถปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าได้ด้วยวิธีการดังนี้

1 การตัดจ่ายวงจรใหม่ เพื่อถ่ายโหลดให้วงจรอื่นโดยลดความยาวของสายป้อน และปริมาณโหลดในสายป้อน

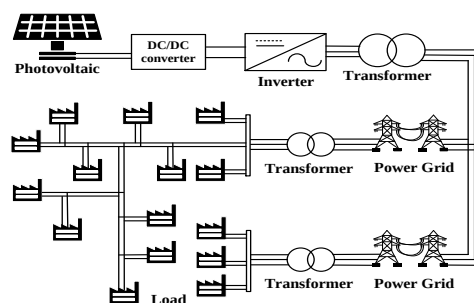
2 ติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor)

3 ติดตั้ง เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator)

4 ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว

### 2.2 เซลล์แสงอาทิตย์

การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ใช้พลังงานหมุนเวียนที่เป็นธรรมชาติ สะอาดปลอดภัย และยั่งยืน โซลาร์เซลล์เป็นอุปกรณ์ที่แปลงแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ความเข้มของแสงอาทิตย์ [12] ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วย แผงโซลาร์เซลล์ อินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) แผนผังของระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ ดังแสดงในภาพที่ 3



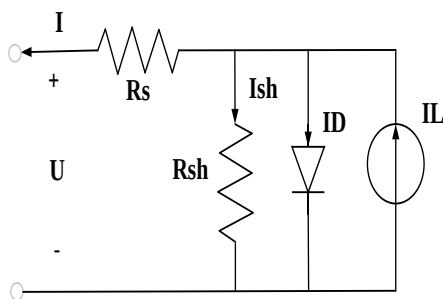
ภาพที่ 3 แผนผังของระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์

พลังงานแสงอาทิตย์ [13] เป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งซึ่งจัดอยู่ในพลังงานประเภทพลังงานหมุนเวียนที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้ตลอดเวลา ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งถูกผลิตโดยสารกึ่งตัวนำซิลิกอนผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ทำให้ซิลิกอนบริสุทธิ์เพื่อผลิตเป็นแผ่นซิลิกอน การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าจะเริ่มเมื่อมีแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ รังสีของแสง

ที่มีอนุภาคของพลังงานโฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้กับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์จนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอมทำให้เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจึงทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น ซึ่งมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส การผลิตไฟฟ้าจะลดลงร้อยละ 0.5, ทิศทางการรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์, ผลกระทบของสิ่งสกปรกบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์, ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ แบตเตอรี่ เป็นต้น

### 2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยวงจรไดโอด ดังแสดงในภาพที่ 4 [14]



ภาพที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยวงจรไดโอด

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต  $U$  และกระแสโหลดสามารถกำหนดได้ดังนี้ [15]-[16]

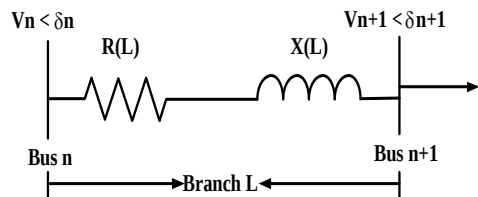
$$I = I_L - I_D = I_L - I_O \left[ \exp\left(\frac{U + RI_s}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

โดยที่  $I$  คือ กระแสโหลด  
 $I_L$  คือ กระแสเซลล์แสงอาทิตย์  
 $I_O$  คือ กระแสอิ่มตัว  
 $U$  คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก

$R_s$  คือ ตัวต้านทานแบบอนุกรม  
 $\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิแรงดัน

### 2.4 กำลังไฟฟ้าสูญเสีย

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า [7] ใช้วิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าไปข้างหน้าและย้อนหลังสูตรทางคณิตศาสตร์ของการกำลังไฟฟ้าสูญเสียมาจากการส่งกำลังไฟฟ้า โดยจะแถมเส้นเดียวของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล 2 บัส ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล 2 บัส

โดยที่บัส  $n$  และ  $n+1$  เชื่อมต่อผ่านพารามิเตอร์สาขา  $L$  สามารถหากำลังไฟฟ้าสูญเสียจริง และกำลังไฟฟ้าสูญเสียรีแอกทีฟจากสมการที่ (2)-(3)

$$P_{loss(L)} = \left( \frac{P_{n+1} - jQ_{n+1}}{V_{n+1}} \right)^2 \cdot R_L \quad (2)$$

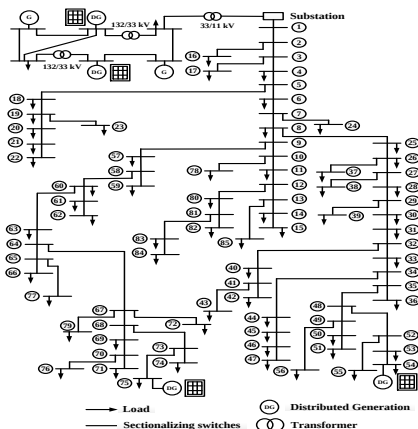
$$Q_{loss(L)} = \left( \frac{P_{n+1} - jQ_{n+1}}{V_{n+1}} \right)^2 \cdot X_L \quad (3)$$

โดยที่  $P_{loss(L)}$  คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงที่สาขา  $L$  และ  $Q_{loss(L)}$  คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียรีแอกทีฟที่สาขา  $L$  การสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟทั้งหมดของระบบนั้นสามารถพิจารณาจากสมการที่ (4)

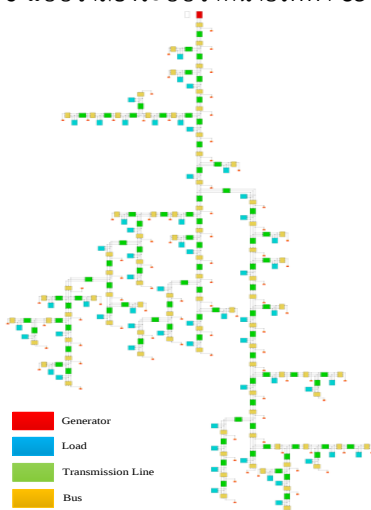
$$P_{total\_loss} = \sum_{t=1}^{nl} P_{loss(L)} + Q_{loss(L)} \quad (4)$$

## 2.5 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า

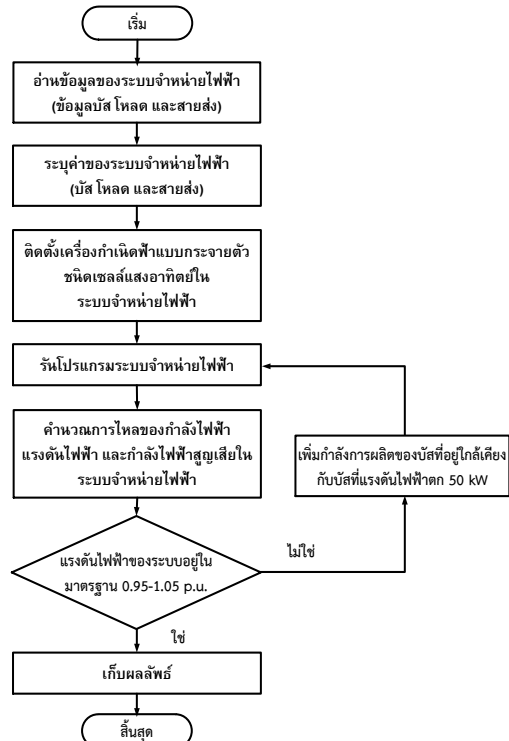
ในบทความนี้ทดสอบด้วยแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 85 บัส ดังแสดงในภาพที่ 6 และแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 85 บัส จำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังแสดงในภาพที่ 7 ประกอบด้วย 59 จุดโหลด ค่าฐานของโหลดเป็น 100 MVA และค่าฐานแรงดันคือ 11 kV โหลดรวมของระบบ 2,570.28 kW และ 2,622.08 kVar ข้อมูลโหลด ดังแสดงในตารางที่ A1 และข้อมูลสายส่ง ดังแสดงในตารางที่ A11 [17-18] แผนภาพของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 6 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 85 บัส



ภาพที่ 7 แบบระบบจำหน่ายไฟฟ้า 85 บัส จำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink



ภาพที่ 8 แผนภาพของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

## 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

### 3.1 กรณีศึกษา

ในบทความนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ด้วยการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์โดยแบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 1 กำลังการผลิตติดตั้งรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่ 2, 3 และ 4 คือ 2,700 1,950 และ 1,800 kW ตามลำดับ

**ตารางที่ 1** กรณีศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์

| กรณี | จำนวน<br>การติดตั้ง | บัสที่ทำ<br>การติดตั้ง | ขนาด<br>(kW)           |
|------|---------------------|------------------------|------------------------|
| 1    | -                   | -                      | -                      |
| 2    | 3                   | 15, 36, 54             | 1,500,<br>600, 600     |
| 3    | 6                   | 12, 15,<br>36,         | 300, 300,<br>300, 300, |
|      |                     | 51, 54, 76             | 300, 450               |
| 4    | 9                   | 12, 15,<br>36, 47,     | 200, 200,<br>250, 100, |
|      |                     | 51, 54,                | 200, 250,              |
|      |                     | 62, 74, 76             | 200, 200,              |
|      |                     |                        | 200                    |

จากตารางที่ 1 กรณีที่ 2 เหตุผลในการเลือกบัสติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 15, 36 และ 54 เนื่องจากเป็นบัสที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุดในระบบเมื่อทำการวิเคราะห์กรณีพื้นฐาน ส่วนในกรณีที่ 3 และ 4 เป็นการเพิ่มการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากกรณีที่ 2 เป็น 6 และ 9 เครื่องตามลำดับ โดยทำการพิจารณาจากบัสที่มีแรงดันไฟฟ้าตรองลงไปที่วิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเปรียบเทียบกับกำลังการผลิตรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์

### 3.2 ผลการวิจัย

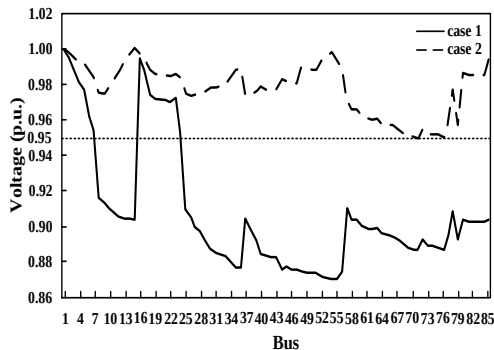
การทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ผลลัพธ์เชิงตัวเลขของการทดสอบทั้ง 4 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** ผลลัพธ์การทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์

| กรณี | แรงดันไฟฟ้า<br>ต่ำสุด | กำลังไฟฟ้า<br>สูญเสีย | ร้อยละ<br>กำลังไฟฟ้า<br>สูญเสีย |
|------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|
|      | (p.u.)                | (kW)                  |                                 |
| 1    | 54 (0.87)             | 313.27                | -                               |
| 2    | 76 (0.95)             | 218.44                | 30.27                           |
| 3    | 75 (0.95)             | 158.59                | 49.37                           |
| 4    | 42 และ 43<br>(0.95)   | 153.26                | 51.07                           |

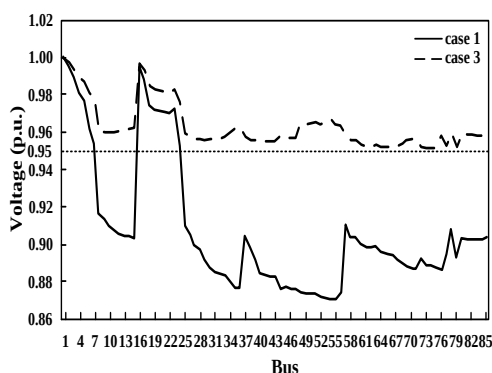
เมื่อทำการทดสอบในกรณีที่ 1 ไม่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า กรณีนี้เป็นกรณีพื้นฐาน ผลลัพธ์พบว่า เกิด กำลัง ไฟ ฟ้า สูญ เ ลี ย 313.27 kW แรงดันไฟฟ้าที่บัส 8-15 และ 25-85 ต่ำกว่ามาตรฐาน 0.95-1.05 p.u. และบัสที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัสที่ 54 (0.87 p.u.)

ในกรณีที่ 2 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 15, 36 และ 54 ขนาด 1,500 600 และ 600 kW ตามลำดับ ผลลัพธ์พบว่าเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 218.44 kW คิดเป็นร้อยละ 30.27 ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียกรณีที่ 1 และบัสที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัสที่ 76 (0.95 p.u.) ผลลัพธ์เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากรณีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 15, 36 และ 54 และกรณีพื้นฐานดังแสดงในภาพที่ 9



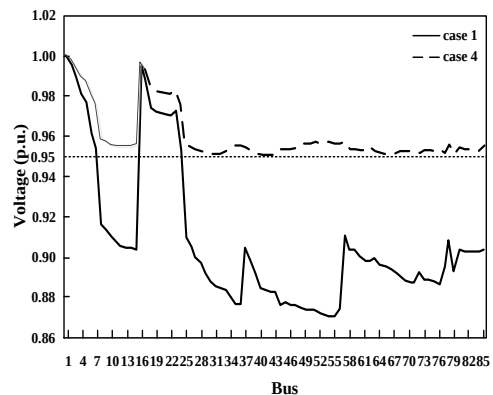
ภาพที่ 9 ผลลัพธ์เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากรณีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 15, 36 และ 54 และกรณีพื้นฐาน

ในกรณีที่ 3 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 12, 15, 36, 51, 54 และ 76 ขนาด 300, 300, 300, 300, 300 และ 450 kW ตามลำดับ ผลลัพธ์พบว่าเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 158.59 kW คิดเป็นร้อยละ 49.37 ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียกรณีที่ 1 และบัสที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัสที่ 75 (0.95 p.u.) ผลลัพธ์เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากรณีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 12, 15, 36, 51, 54 และ 76 และกรณีพื้นฐาน ดังแสดงในภาพที่ 10



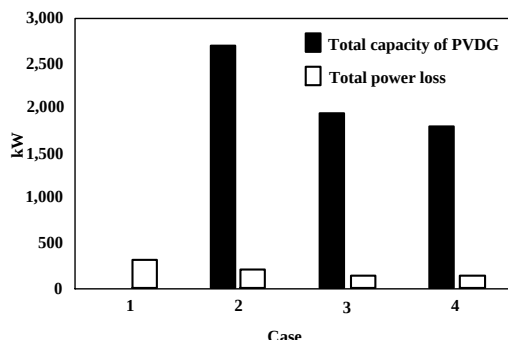
ภาพที่ 10 ผลลัพธ์เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากรณีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 12, 15, 36, 51, 54 และ 76 และกรณีพื้นฐาน

ในกรณีที่ 4 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 12, 15, 36, 47, 51, 54, 62, 74 และ 76 ขนาด 200, 200, 200, 250, 100, 200, 250, 200, 200 และ 200 kW ตามลำดับ ผลลัพธ์พบว่าเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 153.26 kW คิดเป็นร้อยละ 51.07 ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียกรณีที่ 1 และบัสที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด คือ บัสที่ 42 และ 43 (0.95 p.u.) ผลลัพธ์เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากรณีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 12, 15, 36, 47, 51, 54, 62, 74 และ 76 และกรณีพื้นฐาน ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ผลลัพธ์เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากรณีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 12, 15, 36, 47, 51, 54, 62, 74 และ 76 และกรณีพื้นฐาน

จากภาพที่ 11 ผลลัพธ์กรณีที่ 4 สามารถปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าทุกบัสในระบบจำหน่ายไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน 0.95-1.05 p.u. และลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้สูงที่สุดร้อยละ 51.07 ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียกรณีที่ 1 ส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้สูงที่สุด การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสีย และกำลังการผลิตรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสีย และ กำลังการผลิตรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ กระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์

#### 4. สรุปผล

บทความวิจัยนี้นำเสนอการเพิ่ม ประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าในแบบจำลองระบบ จำหน่ายไฟฟ้า 85 บัส ด้วยการติดตั้งเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อ จำลองการทำงานใน 4 กรณี ผลลัพธ์พบว่ากรณีที่ 1 หากไม่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย ตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายไฟในระบบ จำหน่ายไฟฟ้า ส่วนกรณีที่ 2, 3 และ 4 การติดตั้ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์ แสงอาทิตย์จำนวน 3, 6 และ 9 เครื่องกำลังการผลิต ติดตั้งรวม 2,700 1,950 และ 1,800 kW ตามลำดับ ผลลัพธ์พบว่ากรณีที่ 2, 3 และ 4 สามารถปรับปรุง แรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่กำลังไฟฟ้า สูญเสียมีค่าต่างกันร้อยละ 30.27, 49.37 และ 51.07 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 ผลลัพธ์ในกรณีที่ 4 สามารถปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายให้ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน 0.95-1.05 p.u. และลด กำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ต่ำที่สุดส่งผลให้ประสิทธิภาพ การจ่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงที่สุด งานวิจัยในอนาคตต้องเพิ่มระบบกักเก็บพลังงานเพื่อ เพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชภัฏพระนคร ที่ให้การสนับสนุนและ ความ ช่วยเหลือในการจัดทำบทความนี้ซึ่งได้ช่วยให้ บทความนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

#### 6. อ้างอิง

- [1] ชำนาญ ห่อเกียรติ. ระบบไฟฟ้ากำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: โครงการพัฒนาความชำนาญด้าน ไฟฟ้า; 2552.
- [2] Ngamprasert P, Woothipatanapan S, Wannakarn P, et al. Improvement for Voltage Sag with Photovoltaic Performance on Distribution System. IET - International Electrical Engineering Transactions. 2020;6(1):28-33.
- [3] Sanam J, Ganguly Sanjib, Panda AK. Allocation of DSTATCOM and DG in distribution systems to reduce power loss using ESM algorithm. 2016 IEEE 1<sup>st</sup> International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). 2016 July 4-6; Delhi, India. 2016. P. 1-5.
- [4] Lakith G, Kumar N, Kumar LMV, et al. Multiple Distributed Generator and Capacitor Placement in Distribution Network for Voltage Profile Improvement and Network Loss Reduction. 2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC). 2017 September 8-9; Mysore, India. 2017. P. 584-588.
- [5] Saafin ZA, Zaro F, Jawadeh M. Voltage Profile Improvement Using DSTATCOM

- Based on Artificial Intelligent Techniques. 2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology. 2019 April 9-11; Amman, Jordan. 2019. P. 773-778
- [6] Ngamprasert P, Rugthaicharoencheep N, Woothipatanapan S. Application Improvement of Voltage Profile by Photovoltaic Farm on Distribution System. 2019 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI). 2019 October 16- 18; Pattaya, Thailand. 2019. P. 98-101.
- [7] Ismail B, Wahab NIA, Othman ML, et al. A Comprehensive Review on Optimal Location and Sizing of Reactive Power Compensation Using Hybrid- Based Approaches for Power Loss Reduction, Voltage Stability Improvement, Voltage Profile Enhancement and Loadability Enhancement. IEEE Access. 2020;8: 222733-65.
- [8] Razavi AB, Elmi MMB. Improvement of Voltage Profiles in Mashhad Distribution System with Presence of Rooftop PV. 2020 10<sup>th</sup> Smart Grid Conference (SGC). 2020 December 16-17; Kashan, Iran. 2020.
- [9] Li F. Distributed processing of reliability index assessment and reliability-based network reconfiguration in power distribution systems. IEEE Transactions on Power Systems. 2005;20: 230-238.
- [10] Rugthaicharoencheep N. Placement of distributed generation for reliability in distribution system. RMUTP Research Journal. 2016;10(2): 148-156.
- [11] Reddy MV, Muni BP, Sarma AVR. Enhancement of Voltage Profile for IEEE 14 Bus System with Inter line Power Flow Controller. 2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE). 2016 January 21-23; Bengaluru, India. 2016.
- [12] Ngamprasert P, Wannakarn P, Rugthaicharoencheep N. Enhance Power Loss in Distribution System Synergy Photovoltaic Power Plant. 2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI). 2020 October 14-16; Chiangmai, Thailand. 2021. P. 173-176.
- [13] Canada AH. Solar voltaic generation power plants: 1000 MW to 10 kW photovoltaic plant design and application guide for the Pacific Northwest. IEEE Technical Applications Conference and Workshops. Northcon/95. Conference Record. 1995 October 10-12; Portland, OR, USA. 2002. P. 189-94.
- [14] Nezhad OZ, Zadeh SAH, Mohammadian M. The analysis of hybrid system as DG in smart grids by the use of loss sensitivity coefficient method. 2013 Smart Grid Conference (SGC). 2013 December 17-18; Tehran, Iran. 2014. P. 246-251.
- [15] Carmona MC, Vega J, Olivares MC. Power flow algorithm for analysis of distribution networks including distributed generation. 2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA). 2018 September 18-21; Lima, Peru. 2018.
- [16] Rugthaicharoencheep N, Ngamprasert P, Ruangsap N, et al. Minimize the Customer Outage for Improved Reliability in Distribution System with Photovoltaic Distributed Generation. 2022 57<sup>th</sup>

- International Universities Power Engineering Conference (UPEC). 2022 August 30 - September 02; Istanbul, Turkey. 2022.
- [17] Das D, Kothari DP, Kalam A. Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 1995; 17: 335-46.
- [18] Prakash DB, Lakshminarayana C. Optimal siting of capacitors in radial distribution network using Whale Optimization Algorithm. alexandria engineering journal. 2017; 56: 499-09.

## 7. ภาคผนวก

ตารางที่ AI ข้อมูลโหลดของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 85 บัส

| บัส | $P_L$<br>(kW) | $Q_L$<br>(kVAr) | บัส | $P_L$<br>(kW) | $Q_L$<br>(kVAr) |
|-----|---------------|-----------------|-----|---------------|-----------------|
| 4   | 56.00         | 57.13           | 46  | 35.28         | 35.99           |
| 6   | 35.28         | 35.99           | 47  | 14.00         | 14.28           |
| 8   | 35.28         | 35.99           | 50  | 36.28         | 37.01           |
| 11  | 56.00         | 57.13           | 51  | 56.00         | 57.13           |
| 14  | 35.28         | 35.99           | 53  | 35.28         | 35.99           |
| 15  | 35.28         | 35.99           | 54  | 56.00         | 57.13           |
| 16  | 35.28         | 35.99           | 55  | 56.00         | 57.13           |
| 17  | 112.00        | 114.26          | 56  | 14.00         | 14.28           |
| 18  | 56.00         | 57.13           | 57  | 56.00         | 57.13           |
| 19  | 56.00         | 57.13           | 59  | 56.00         | 57.13           |
| 20  | 35.28         | 35.99           | 60  | 56.00         | 57.13           |
| 21  | 35.28         | 35.99           | 61  | 56.00         | 57.13           |
| 22  | 35.28         | 35.99           | 62  | 56.00         | 57.13           |
| 23  | 56.00         | 57.13           | 63  | 14.00         | 14.28           |
| 24  | 35.28         | 35.99           | 66  | 56.00         | 57.13           |

ตารางที่ AI ข้อมูลโหลดของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 85 บัส (ต่อ)

| บัส | $P_L$<br>(kW) | $Q_L$<br>(kVAr) | บัส | $P_L$<br>(kW) | $Q_L$<br>(kVAr) |
|-----|---------------|-----------------|-----|---------------|-----------------|
| 25  | 35.28         | 35.99           | 69  | 56.00         | 57.13           |
| 26  | 56.00         | 57.13           | 71  | 35.28         | 35.99           |
| 28  | 56.00         | 57.13           | 72  | 56.00         | 57.13           |
| 30  | 35.28         | 35.99           | 74  | 56.00         | 57.13           |
| 31  | 35.28         | 35.99           | 75  | 35.28         | 35.99           |
| 33  | 14.00         | 14.28           | 76  | 56.00         | 57.13           |
| 36  | 35.28         | 35.99           | 77  | 14.00         | 14.28           |
| 37  | 56.00         | 57.13           | 78  | 56.00         | 57.13           |
| 38  | 56.00         | 57.13           | 79  | 35.28         | 35.99           |
| 39  | 56.00         | 57.13           | 80  | 56.00         | 57.13           |
| 40  | 35.28         | 35.99           | 82  | 56.00         | 57.13           |
| 42  | 35.28         | 35.99           | 83  | 35.28         | 35.99           |
| 43  | 35.28         | 35.99           | 84  | 14.00         | 14.28           |
| 44  | 35.28         | 35.99           | 85  | 35.28         | 35.99           |
| 45  | 35.28         | 35.99           |     |               |                 |

ตารางที่ All ข้อมูลสายส่งของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 85 บัส

| หมายเลข | จากบัส | สู่บัส | $R (\Omega)$ | $X (\Omega)$ |
|---------|--------|--------|--------------|--------------|
| 1       | 1      | 2      | 0.108        | 0.075        |
| 2       | 2      | 3      | 0.163        | 0.112        |
| 3       | 3      | 4      | 0.217        | 0.149        |
| 4       | 4      | 5      | 0.108        | 0.074        |
| 5       | 5      | 6      | 0.435        | 0.298        |
| 6       | 6      | 7      | 0.272        | 0.186        |
| 7       | 7      | 8      | 1.197        | 0.820        |
| 8       | 8      | 9      | 0.108        | 0.074        |
| 9       | 9      | 10     | 0.598        | 0.410        |
| 10      | 10     | 11     | 0.544        | 0.373        |
| 11      | 11     | 12     | 0.544        | 0.373        |
| 12      | 12     | 13     | 0.598        | 0.410        |
| 13      | 13     | 14     | 0.272        | 0.186        |
| 14      | 14     | 15     | 0.326        | 0.223        |
| 15      | 2      | 16     | 0.728        | 0.302        |
| 16      | 3      | 17     | 0.455        | 0.189        |
| 17      | 5      | 18     | 0.820        | 0.340        |

ตารางที่ All ข้อมูลสายส่งของแบบจำลอง  
ระบบจำหน่ายไฟฟ้า 85 บัส (ต่อ)

| หมายเลข | จากบัส | สู่บัส | R ( $\Omega$ ) | X ( $\Omega$ ) |
|---------|--------|--------|----------------|----------------|
| 18      | 18     | 19     | 0.637          | 0.264          |
| 19      | 19     | 20     | 0.455          | 0.189          |
| 20      | 20     | 21     | 0.819          | 0.340          |
| 21      | 21     | 22     | 1.548          | 0.642          |
| 22      | 19     | 23     | 0.182          | 0.075          |
| 23      | 7      | 24     | 0.910          | 0.378          |
| 24      | 8      | 25     | 0.455          | 0.189          |
| 25      | 25     | 26     | 0.364          | 0.151          |
| 26      | 26     | 27     | 0.546          | 0.226          |
| 27      | 27     | 28     | 0.273          | 0.113          |
| 28      | 28     | 29     | 0.546          | 0.226          |
| 29      | 29     | 30     | 0.546          | 0.226          |
| 30      | 30     | 31     | 0.273          | 0.113          |
| 31      | 31     | 32     | 0.182          | 0.075          |
| 32      | 32     | 33     | 0.182          | 0.075          |
| 33      | 33     | 34     | 0.819          | 0.340          |
| 34      | 34     | 35     | 0.637          | 0.264          |
| 35      | 35     | 36     | 0.182          | 0.075          |
| 36      | 26     | 37     | 0.364          | 0.151          |
| 37      | 27     | 38     | 1.002          | 0.416          |
| 38      | 29     | 39     | 0.546          | 0.226          |
| 39      | 32     | 40     | 0.455          | 0.189          |
| 40      | 40     | 41     | 1.002          | 0.416          |
| 41      | 41     | 42     | 0.273          | 0.113          |
| 42      | 41     | 43     | 0.455          | 0.189          |
| 43      | 34     | 44     | 1.002          | 0.416          |
| 44      | 44     | 45     | 0.911          | 0.378          |
| 45      | 45     | 46     | 0.911          | 0.378          |
| 46      | 46     | 47     | 0.546          | 0.226          |
| 47      | 35     | 48     | 0.637          | 0.264          |
| 48      | 48     | 49     | 0.182          | 0.075          |
| 49      | 49     | 50     | 0.364          | 0.151          |
| 50      | 50     | 51     | 0.455          | 0.189          |
| 51      | 48     | 52     | 1.366          | 0.567          |

ตารางที่ All ข้อมูลสายส่งของแบบจำลอง  
ระบบจำหน่ายไฟฟ้า 85 บัส (ต่อ)

| หมายเลข | จากบัส | สู่บัส | R ( $\Omega$ ) | X ( $\Omega$ ) |
|---------|--------|--------|----------------|----------------|
| 52      | 52     | 53     | 0.455          | 0.189          |
| 53      | 53     | 54     | 0.546          | 0.226          |
| 54      | 52     | 55     | 0.546          | 0.226          |
| 55      | 49     | 56     | 0.546          | 0.226          |
| 56      | 9      | 57     | 0.273          | 0.113          |
| 57      | 57     | 58     | 0.819          | 0.340          |
| 58      | 58     | 59     | 0.182          | 0.075          |
| 59      | 58     | 60     | 0.546          | 0.226          |
| 60      | 60     | 61     | 0.728          | 0.302          |
| 61      | 61     | 62     | 1.002          | 0.415          |
| 62      | 60     | 63     | 0.182          | 0.075          |
| 63      | 63     | 64     | 0.728          | 0.302          |
| 64      | 64     | 65     | 0.182          | 0.075          |
| 65      | 65     | 66     | 0.182          | 0.075          |
| 66      | 64     | 67     | 0.455          | 0.189          |
| 67      | 67     | 68     | 0.910          | 0.378          |
| 68      | 68     | 69     | 1.092          | 0.453          |
| 69      | 69     | 70     | 0.455          | 0.189          |
| 70      | 70     | 71     | 0.546          | 0.226          |
| 71      | 67     | 72     | 0.182          | 0.075          |
| 72      | 68     | 73     | 1.184          | 0.491          |
| 73      | 73     | 74     | 0.273          | 0.113          |
| 74      | 73     | 75     | 1.002          | 0.416          |
| 75      | 70     | 76     | 0.546          | 0.226          |
| 76      | 65     | 77     | 0.091          | 0.037          |
| 77      | 10     | 78     | 0.637          | 0.264          |
| 78      | 67     | 79     | 0.546          | 0.226          |
| 79      | 12     | 80     | 0.728          | 0.302          |
| 80      | 80     | 81     | 0.364          | 0.151          |
| 81      | 81     | 82     | 0.091          | 0.037          |
| 82      | 81     | 83     | 1.092          | 0.453          |
| 83      | 83     | 84     | 1.002          | 0.416          |
| 84      | 13     | 85     | 0.819          | 0.340          |

## เครื่องคัดแยกน้ำหนักและสีมะม่วงอัตโนมัติด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Automatic mango weight and color sorting machine equipped with microcontroller

สุรเทพ แป้นเกิด<sup>1\*</sup>, นรินทร์ จีระนันตสิน<sup>2</sup>, ปิติวัฒน์ จุลเกษมศักดิ์<sup>2</sup>, รุ่งทิพย์ โคบาล<sup>1</sup>, วาสนา ด่วงเหมือน<sup>1</sup>  
Suratep Pangerd<sup>1\*</sup>, Narin Jeeranantasin<sup>2</sup>, Pitiwat Julakasemsak<sup>2</sup>, Rungthip Cobal<sup>1</sup>,  
Wassana Duangmeun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศและธุรกิจดิจิทัล คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ  
<sup>2</sup>วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และระบบไอโอที คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

\*Corresponding Author. Tel. 08 7325 2469 E-mail: wassana.d@mail.rmutk.com

### บทคัดย่อภาษาไทย

มะม่วงเป็นผลไม้เศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทยและมีการส่งออกเป็นจำนวนมาก ส่วนใหญ่การคัดแยกจะเน้นคุณภาพและขนาด ซึ่งโดยทั่วไปการคัดแยกจะใช้มนุษย์เข้ามามีบทบาทในการคัดแยกเกรดผลไม้ชนิดต่าง ๆ โดยจะต้องมีต้นทุนสำหรับการจ้างงานดังกล่าวและข้อจำกัดสำหรับการคัดแยกผลไม้โดยมนุษย์ นั่นคือระยะเวลาและความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ทางผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและสร้างเครื่องมือคัดแยกมะม่วงอัตโนมัติด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ทั้งยังสามารถคัดแยกผลไม้อื่น ๆ ได้อีกทางด้วย โดยเครื่องสามารถคัดแยกได้ 2 ส่วน คือน้ำหนักและสีของผลไม้ โดยการใช้สายพานในการลำเลียงและตรวจจับน้ำหนักด้วยโหลดเซลล์ ต่อมาสายพานจะลำเลียงต่อมาเพื่อวัดค่าสีหาความสุก ดิบของมะม่วง หลังจากนั้นจะส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Mega2506 จะทำหน้าที่ประมวลผลและสั่งเปิดช่องรับสำหรับคัดแยกมะม่วงตามที่กำหนดไว้ ผลการทดลองคัดแยกมะม่วงโดยวัดเป็นค่าความผิดพลาดโดยใช้ตัวอย่างมะม่วงพันธุ์เขียวเสวยจำนวน 100 ลูก โดยมีผลการทดสอบคัดเกรดมะม่วงมีความผิดพลาด เท่ากับ 0.00% และการคัดแยกความสุก ดิบ มีความผิดพลาด เท่ากับ 0.00% ส่วนมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองจำนวน 100 ลูก โดยมีผลการทดสอบคัดเกรดมะม่วงมีความผิดพลาด เท่ากับ 3% และการคัดแยกความสุก ดิบ มีความผิดพลาด เท่ากับ 3%

**คำสำคัญ :** ไมโครคอนโทรลเลอร์ โหลดเซลล์ สายพานในการลำเลียง

### ABSTRACT

Mangoes are essential to Thailand's economy and most of them for exporting. The sorting is mostly based on size and quality. The process of mango grading is usually undertaken by humans, which leads to administration costs, time constraints, and errors. The researcher designed and constructed an automatic microcontroller-based machine to classify mangoes and other fruits. The machine can sort mangoes into two categories based on weight and color, utilizing a conveyor belt to transport the mangoes and load cells to measure weight. The mangoes were moved along a conveyor, and their color and ripeness were determined. The data was transmitted to the Mega2506 microcontroller, and the mangoes were sent straight to their proper classification. The experimental results reported in term of

inaccuracies, revealed that 100 Keow Savoy mangoes had a 0.00% error in quality sorting and ripeness. Meanwhile, 100 Nam dok Mai Si Thong mangoes had a quality sorting error of 3% and a ripeness error of 3%, respectively.

**Keyword:** Microcontroller, load cell, conveyor belt

## 1. บทนำ

มะม่วงเป็นพืชที่ปลูกได้ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย มีการเจริญเติบโตเร็ว ทนต่อโรคและแมลงศัตรูพืช นิยมปลูกเพื่อรับประทานผลสามารถรับประทานได้ทั้งผลดิบและผลสุก มีหลากหลายสายพันธุ์ การปลูกมะม่วงในภูมิภาคตะวันออก ถือเป็นต้นแบบของเกษตรกรทั่วประเทศ เนื่องจากการผลิตมะม่วงประสบความสำเร็จ และมีความเข้มแข็งมานานทั้งในด้านการจัดการและเทคโนโลยีในการผลิต การบังคับให้มะม่วงออกผลผลิตได้ตามต้องการ และสามารถส่งออกมะม่วงไปยังต่างประเทศและสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรเป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้เกษตรกรจึงนิยมปลูกมะม่วงเพิ่มมากขึ้นเพื่อผลิตมะม่วงคุณภาพดีที่มีความต้องการทางตลาดสูงทั้งในและต่างประเทศ การผลิตมะม่วงเพื่อการส่งออกมีหลากหลายสายพันธุ์ มะม่วงที่ได้รับความนิยมและส่งออกมากที่สุดคือ มะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง และมะม่วงพันธุ์เขียวเสวย ก็เป็นอีกพันธุ์ที่นิยมปลูกกันมากเพราะเป็นที่ต้องการของตลาด มีรสชาติมันเหมาะสำหรับรับประทานผลดิบในระยะผลแก่จัดเป็นพันธุ์ที่ให้ผลดก ขอบที่แข็ง แต่การเจริญเติบโตและการแตกกิ่งค่อนข้างช้า มีความต้านทานต่อโรคและแมลงได้ดี แต่ไม่ทนต่อโรคน้ำไหล ลักษณะผลค่อนข้างกลมเรียวยาว ปลายงอนเล็กน้อย ผลดิบเปลือกมีสีเขียวเข้มและออกนวลเมื่อแก่ รสชาติมันเนื้อมีสีขาว ละเอียด กรอบ มีเสี้ยนค่อนข้างน้อย เมล็ดลีบ ผลอ่อนมีรสเปรี้ยว เมื่อผลสุก เปลือกมีสีเขียวปนเหลือง เนื้อสีเหลือง รสหวาน

ต้นทุนด้านแรงงานในการใช้แรงงานคนในการคัดแยกเกรดของมะม่วงย่อมมีผลต่อหลายปัจจัยไม่ว่าด้านประสิทธิภาพของตัวคนทำการคัดแยกซึ่งแรงงานคนต้องใช้ประสิทธิภาพและความชำนาญ

อย่างมากจึงจะสามารถคัดแยกได้ตามเกรดที่ต้องการซึ่งคนหากทำงานเป็นระยะเวลายาวนานอาจจะมีความเมื่อยล้าซึ่งอาจจะทำให้การคัดแยกเกรดมะม่วงผิดพลาดได้ง่ายทำให้สูญเสียมูลค่า เนื่องจากแต่ละเกรดมีราคาที่แตกต่างกัน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงพัฒนาเครื่องคัดแยกมะม่วงแบบอัตโนมัติด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้สามารถคัดแยกเกรดมะม่วงได้ตามเกรดมาตรฐาน และการซื้อขายตามท้องตลาด ลดการใช้แรงงานคนลดการสูญเสียมูลค่า พร้อมทั้งยังสร้างความมั่นใจในการซื้อขายแก่ผู้บริโภค [1]

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในการคัดแยกมะม่วงแบบอัตโนมัติออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือคัดแยกขนาด ส่วนที่สองเป็นการคัดแยกความสุก ดิบของมะม่วง โดยการทดลองจะใช้มะม่วง 2 สายพันธุ์ในการทดลองได้แก่มะม่วงเขียวเสวย และมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง แบบคละสีและขนาด โดยผู้วิจัยได้หาข้อมูลเกี่ยวกับสายพันธุ์มะม่วง ข้อมูลเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ ข้อมูลเกี่ยวกับเซ็นเซอร์และโมดูลการแยกสี รวมถึงข้อมูลเกี่ยวกับสายพานลำเลียง [2]

2.1 ขั้นตอนการสร้างเครื่องคัดแยกมะม่วงอัตโนมัติด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และการเตรียมมะม่วง

2.1.1) ผู้วิจัยได้หาข้อมูลเกี่ยวกับสายพันธุ์มะม่วงโดยพบว่าการแบ่งเกรดสำหรับการซื้อขายมะม่วงตามท้องตลาดจะถูก แบ่งเป็น 3 เกรดมาตรฐาน โดยผู้วิจัยอ้างอิงการออกแบบระบบ การคัดแยกเกรดของมะม่วงดังกล่าวโดยใช้ค่ามาตรฐานเทียบกับ

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ  
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ [3] ดังตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** เกณฑ์การคัดแยกเรื่องขนาดของมะม่วง

| เกรดมะม่วง | น้ำหนักจริง<br>(กรัม/ผล) | ขนาด     |
|------------|--------------------------|----------|
| A          | 360 – 420                | ขนาดใหญ่ |
| B          | 301 – 359                | ขนาดกลาง |
| C          | 200 - 300                | ขนาดเล็ก |

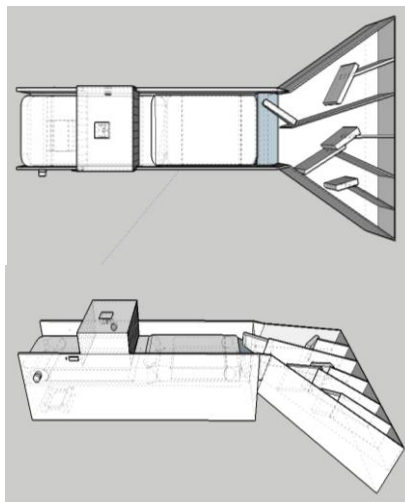
2.2.2) การคัดแยกมะม่วงตามสายพันธุ์และ  
ขนาดน้ำหนัก จำนวน 200 ลูก แยกเป็นมะม่วง  
เขียวเสวย 100 ลูก มะม่วงน้ำดอกไม้สีทองจำนวน  
100 ลูก จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง  
น้ำหนักมาตรฐานแบบตัวเลข เพื่อให้ได้น้ำหนักของ  
มะม่วงที่ถูกต้องแม่นยำที่สุดลูก หลังจากนั้นทำติด  
สติ๊กเกอร์พร้อมเขียนน้ำหนักในแต่ละลูก ตามภาพที่  
1



**ภาพที่ 1** ผลการชั่งน้ำหนักมาตรฐานแบบตัวเลข

2.2.3) การออกแบบเครื่องคัดแยก จะใช้  
โปรแกรม SketchUp ในการแบบจำลอง ดังภาพที่ 2  
และนำแบบที่ได้มาสร้างเป็นเครื่องจริง ดังภาพที่ 3  
โดยโครงสร้างของเครื่องคัดแยกมะม่วงแบบอัตโนมัติ  
ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ มีขนาดความสูง 30 cm  
ความยาว 140 cm ความกว้าง 50 cm เมื่อได้เครื่อง  
ตามที่ต้องการ ขั้นตอนถัดไปจะเป็นการติดตั้งอุปกรณ์  
และเซนเซอร์ภายในเครื่องคัดแยกขนาดและความสูง  
ของมะม่วงแบบอัตโนมัติ ดังภาพที่ 5 โดยการใช้  
อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino mega 2506  
เป็นตัวควบคุมโดยการเขียนด้วยภาษาซี ผ่าน

โปรแกรม Arduino IDE โดยมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนสายพาน  
เป็นแบบเซอร์โวมอเตอร์เกียร์ 180 องศา มีความเร็วใน  
การทำงาน 0.17 วินาที / 60 องศา



**ภาพที่ 2** แบบจำลองเครื่องแยกมะม่วง  
ด้วยโปรแกรม SketchUp



**ภาพที่ 3** เครื่องแยกมะม่วง

2.2.4) หลักการทำงานของเครื่อง

โดยการออกแบบผังการทำงานของเครื่อง  
ตามลำดับขั้น โดยกำหนดตัวแปรของโค้ดดังนี้

M1 = Motor, M2 = Motor, Load = Loadcell, S1  
= Sensor, S2 = Sensor ดังภาพที่ 6

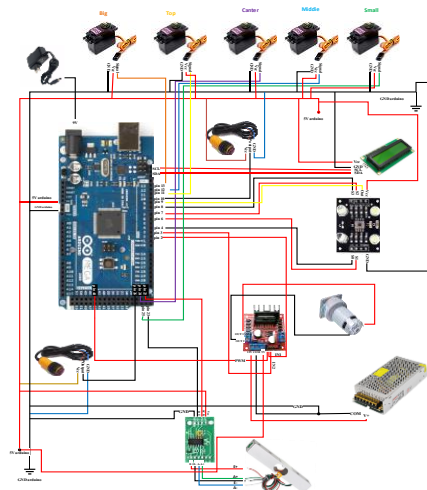
2.2.5) ทดลองการทำงานของเครื่องนำมะม่วง มาวางบนสายพานตรงจุดซึ่งน้ำหนักที่กำหนด sensor loadcell จะทำการชั่งน้ำหนัก ต่อจากนั้น สายพานจะเลื่อนนำมะม่วงมายังจุดเช็คสี ด้วย sensor color โมดูลแยกสีแบบ RGB เพื่อเช็คพันธุ์ ความสุก ดิบของมะม่วง เมื่อเช็คค่าน้ำหนักและสีของ มะม่วงเรียบร้อยแล้ว สายพานจะเริ่มทำงานนำมะม่วงไป ยังช่องคัดแยก จะใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุผ่าน สายพานจะทำการหยุดมะม่วงเป็นเวลา 1 วินาที เพื่อ รอการเปิดช่องในการคัดแยกกล่องที่ต้องการ ดัง ภาพที่ 4

2.2.6) การประเมินประสิทธิภาพของเครื่อง คัดแยกมะม่วงแบบอัตโนมัติบนสายพานลำเลียง โดย ทดสอบการทำงานการจำแนกมะม่วง จำนวน 60 ครั้ง และบันทึกผลการจำแนกมะม่วงที่ถูกต้องและ ตำแหน่งที่ต้องการได้ถูกต้อง เพื่อหาประสิทธิภาพ ซึ่ง หาได้จาก

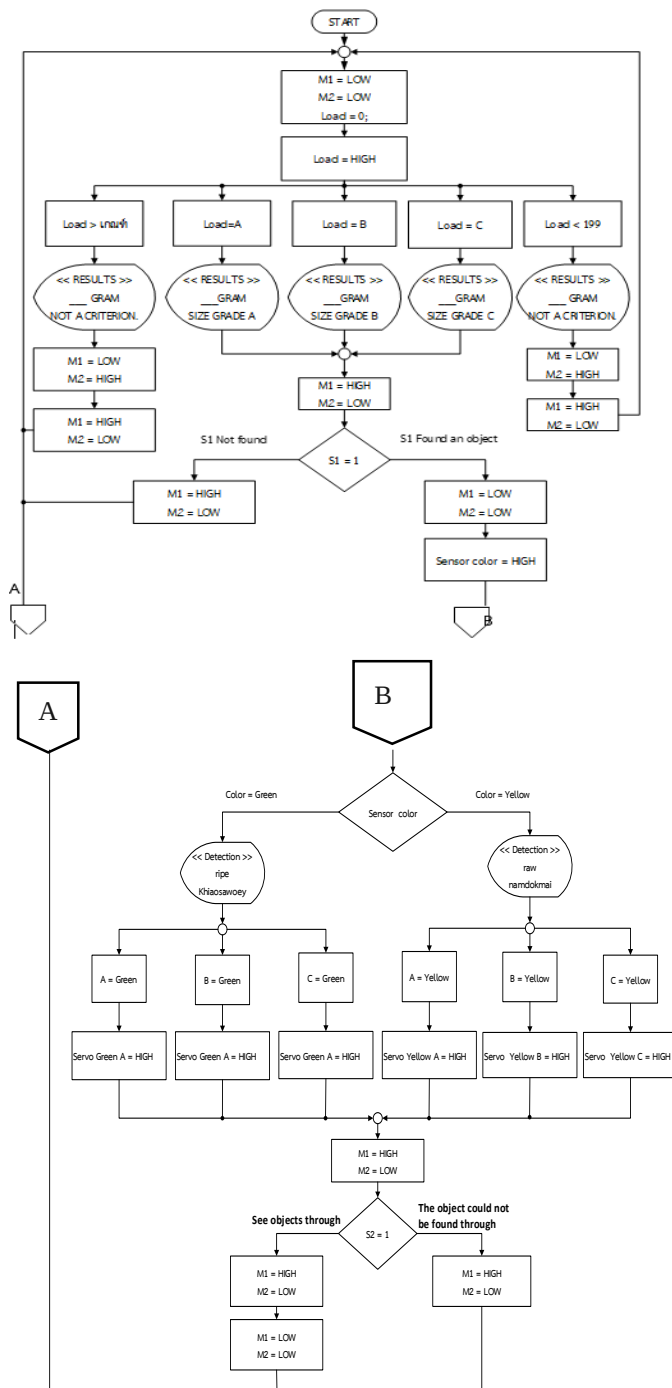
$$\text{ร้อยละของความถูกต้อง} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ถูกต้อง}}{\text{จำนวนครั้งที่ทดสอบ}} \times 100$$



ภาพที่ 4 การทำงานของเครื่อง



ภาพที่ 5 การเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์และเซนเซอร์



ภาพที่ 6 ผังการทำงานของเครื่องคัดแยกมะม่วงอัตโนมัติด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการทดลองเครื่องคัดแยกมะม่วงอัตโนมัติด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ พบว่ามะม่วงพันธุ์เขียวเสวยจำนวน 100 ลูก โดยมีผลการทดสอบคัดเกรดมะม่วงมีความผิดพลาด เท่ากับ 0.00% และการคัดแยกความสุก ดิบ มีความผิดพลาด เท่ากับ 0.00% ส่วนมะม่วงพันธุ์น้ำดอกไม้สีทองจำนวน 100 ลูก โดยมีผลการทดสอบคัดเกรดมะม่วงมีความผิดพลาด เท่ากับ 3% และการคัดแยกความสุก ดิบ มีความผิดพลาด เท่ากับ 3% ด้วย โดยมีการคัดเกรดมะม่วงผิดพลาดจำนวน 3 ลูก และความสุก – ดิบ ก็มีความผิดพลาดจำนวน 3 ลูกเช่นกัน เป็นไปตามการทดลองของธนชาติ และคณะ [4] กล่าวว่า สถานะความสุกในระดับที่ 1 “เขียว” อุปกรณ์ต้นแบบที่ทำจาก NIR มีค่าเท่ากับ 0.000 ค่าความ ผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 0.000 และ สถานะความสุกในระดับที่ 5 “เหลือง” ความยาวคลื่น 760 nm มีค่าความผิดพลาด 0.035

ผลการทดลองดังกล่าวสามารถ นำไปขยายผล ศึกษา ค้นคว้าเพิ่มเติมกับผลไม้ชนิดอื่นๆ ได้ และยังสามารถพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบให้มีความทันสมัย สามารถลดต้นทุนให้เกษตรกรและเหมาะแก่การใช้ในทางการเกษตรได้ ในส่วนเวลาในการทำงานของสายพาน พบว่าการคัดแยกมะม่วงใน 1 ลูกจะใช้เวลาประมาณ 9 -13 วินาที สอดคล้องกับผลการทดลองของ สุนทร และคณะ [5] ทดสอบได้ดังนี้

วัตถุดิบแดง 9.75 วินาที วัตถุดิบเขียว 9.96 วินาที วัตถุดิบน้ำเงิน 9.95 วินาที และยังสามารถลดต้นทุนของ กันตมณ [6] ทดสอบได้ดังนี้สามารถคัดแยกวัตถุดิบแดง สีเขียว สีน้ำเงินและสีอื่น ๆ โดยเวลาเฉลี่ยของวัตถุที่ทดสอบปรากฏว่าวัตถุดิบแดง 9.96 วินาทีวัตถุดิบเขียว 13.47 วินาที วัตถุดิบน้ำเงิน 16.58 วินาทีและวัตถุดิบอื่น ๆ 9.04 วินาที และสามารถหมุน ถาดเพื่อรับวัตถุในตำแหน่งที่ต้องการได้ถูกต้อง ดังตารางการทดลองที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดลอง

| พันธุ์มะม่วง   | จำนวน<br>มะม่วง | เกรดมะม่วง<br>ทดสอบที่<br>ผิดพลาด | ร้อยละความ<br>ผิดพลาด | ความสุก – ดิบ<br>ทดสอบ<br>ที่ผิดพลาด | ร้อยละความ<br>ผิดพลาด |
|----------------|-----------------|-----------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| เขียวเสวย      | 100 ลูก         | 0                                 | 0.00%                 | 0                                    | 0.00%                 |
| น้ำดอกไม้สีทอง | 100 ลูก         | 3                                 | 3%                    | 3                                    | 3%                    |

ตารางที่ 2 เป็นการนำเสนอการทดลองคัดแยกมะม่วงจำนวน 200 ลูกเป็นเขียวเสวย 100 ลูก และน้ำดอกไม้สีทอง 100 ลูก มีความผิดพลาด เท่ากับ 3% เนื่องจากมะม่วงน้ำดอกไม้สีทอง บางลูกมีจุดสีดำ ทำให้มีการทดลองเช็คสีที่ผิดพลาด

### 4. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองเครื่องคัดแยกมะม่วงอัตโนมัติด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถทำตามวัตถุประสงค์ ขอบเขตที่กำหนดไว้ สามารถชั่งน้ำหนัก ได้ตามเกณฑ์การกำหนดตามขนาดเกรด A B และ C สามารถแยกความสุก ความดิบ และพันธุ์ของมะม่วงตามขอบเขตได้ และกระบวนการทดลองต่างๆ อุปกรณ์ที่ใช้ไม่มีข้อผิดพลาดในการทำงาน หาก

นำไปใช้กับงานเกษตร จะยังสามารถช่วยให้ลดต้นทุนการใช้แรงงานคนในการคัดแยกมะม่วงได้ และยังสามารถต่อยอดเครื่องคัดแยกน้ำหนักรวมและสีมะม่วงอัตโนมัติด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ นำไปประยุกต์ใช้งานให้สามารถนำเทคนิคเกี่ยวกับเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ที่ช่วยในการวิเคราะห์และตัดสินใจของผลไม้ชนิดอื่นๆ ได้ เพื่อให้เกิดความแม่นยำและถูกต้องมากยิ่งขึ้น

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ให้การสนับสนุนสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย ในครั้งนี้

## 6. อ้างอิง

- [1] วรุดิ กังหัน และคณะ.เครื่องคัดแยกเกรดแตงโมอัตโนมัติโดยใช้การตรวจวัดน้ำหนัก. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 2563; 26(2):15-20.
- [2] ปฐมพงศ์ พรหมบุญ และคณะ.การออกแบบและสร้างระบบสายพานลำเลียง. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง.2559; 9(1):14-21.
- [3] สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติกระทรวงเกษตรและสหกรณ์. [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ:2565 [เข้าถึงเมื่อ 6 มกราคม 2565]. จาก: <http://www.acfs.go.th>
- [4] ธนชาติ ศรีเปารยะ, อภิเดช บุรณวงศ์ และคณิต เจริญพัฒนานนท์.วิธีการทดสอบคุณภาพของกล้วยหอมทองโดยวิธีไม่ทำลายตัวอย่าง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 2563; 39(5):560-571.
- [5] สุนทร ก้องสินธุ และคณะ. การออกแบบชุดทดลองคัดแยกสีอัตโนมัติบนระบบสายพานลำเลียง โดยโมดูลแยกสีอัตโนมัติ. วารสารวิจัยและนวัตกรรมสถาบันการอาชีวศึกษากรุงเทพ มหานคร. 2561;1(2):56-68.
- [6] กันตภณ พลวิไลสง.เครื่องคัดแยกสีอัตโนมัติบนระบบสายพานลำเลียงควบคุมด้วยอะแดปเตอร์. วารสารสมาคมสถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทย. 2559;5(1):15-21.

## คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ รับบทความทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ต้องเป็นต้นฉบับ ไม่เคยตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน มีจุดประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ และผลงานวิชาการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และมีการตรวจสอบคุณภาพอย่างเคร่งครัด

### 1. หลักเกณฑ์การส่งบทความ

1.1 บทความเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

1.2 บทความมีรูปแบบการเขียนตามที่กำหนดไว้

1.3 บทความวิชาการต้องมีความยาวประมาณ 12-20 หน้า ในรูปแบบ 1 คอลัมน์

บทความวิจัย ต้องมีความยาวประมาณ 10-15 หน้า ในรูปแบบ 1 คอลัมน์

1.4 การส่งบทความ เพื่อผ่านการพิจารณาก่อนกรองและประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องผ่าน รูปแบบ Online

โดยจัดส่งไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ผ่าน <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> เริ่มจากการกรอกข้อมูลตามแบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาให้สมบูรณ์ บทความจะได้รับการพิจารณาก่อนกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนจะต้องส่งบทความเข้ามายัง <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> เพื่อดำเนินการในส่วนอื่นต่อไป

### 2. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารมี 2 ประเภท คือ

2.1 บทความวิจัย (Research Paper) เป็นบทความที่มีลักษณะและรูปแบบการวิจัยตามหลักวิชาการ เช่น ตั้งสมมติฐาน โดยระบุวัตถุประสงค์ที่ชัดเจน ได้ค้นคว้าทดลองอย่างมีระบบ และสรุปผลการวิจัยที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

2.2 บทความวิชาการ (Academic Paper) เป็นบทความที่มีลักษณะเชิงวิเคราะห์หรือวิจารณ์ จากการทบทวนเอกสาร จากประสบการณ์หรือความชำนาญของผู้เขียน และเสนอแนวคิดใหม่บนพื้นฐานวิชาการ อันก่อให้เกิดองค์ความรู้หรือสามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์

### 3. รูปแบบการพิมพ์บทความ

#### 3.1 ระยะขอบ

ขอบบน (Top Margin) 1 นิ้ว หรือ 2.54 ซม.

ขอบล่าง (Bottom Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

ขอบขวา (Right Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

ขอบซ้าย (Left Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

#### 3.2 กระดาษ

ขนาด B5 (JIS) 18.2 x 25.7 ซม.

#### 3.3 รูปแบบตัวอักษร

บทความภาษาไทย ใช้ TH SarabunPSK

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ Time New Roman

### 3.4 ชื่อเรื่อง

บทความภาษาไทย ใช้ชื่อเรื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษควรเป็นชื่อที่สั้น กระทัดรัด ได้ใจความตรงกับวัตถุประสงค์และเนื้อเรื่อง)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ชื่อเรื่อง ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

### 3.5 ชื่อผู้เขียนและชื่อผู้ร่วมงาน

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

### 3.6 สถานที่ทำงาน เบอร์โทรศัพท์ และ E-mail

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 12 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 10 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

### 3.7 คำว่า บทคัดย่อ/Abstract

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวหนา

### 3.8 เนื้อความใน บทคัดย่อ/Abstract

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 11 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)

### 3.9 เนื้อความทั้งหมด (แบ่งเป็น 2 คอลัมน์ ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.3 นิ้ว หรือ 0.7 ซม.)

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 11 ตัวปกติ

### 3.10 ชื่อหัวเรื่องใหญ่

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

### 3.11 ชื่อหัวเรื่องย่อย

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 11 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

### 3.12 คำว่า กิตติกรรมประกาศ/Acknowledgement และคำว่า เอกสารอ้างอิง/Reference (ใส่หมายเลขลำดับหัวเรื่องด้วย)

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวหนา

### 3.13 สมการหรือพจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

ควรเขียนโดยใช้ Equation Editor โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับอยู่ในวงเล็บเล็ก จัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word

## 4. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

### 4.1 บทความวิจัย

#### A. ส่วนปก

1. **ชื่อบทความ (Title)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกระทัดรัด ไม่ยาวเกินไป ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

2. **ชื่อผู้เขียน (Authors)** ชื่อเต็ม นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน สำหรับผู้เขียน  
ประสานงานให้ใส่ที่อยู่ให้ละเอียด พร้อมทั้งหมายเลขโทรศัพท์/โทรสาร และ E-mail  
address ที่สามารถติดต่อได้
3. **ตัวเลขยก** ให้เขียนไว้บนนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน
4. **บทคัดย่อ (ABSTRACT)** ควรจัดทำเป็นร้อยแก้วย่อหน้าเดียว สั้น ตรงประเด็น  
ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัยและการ  
อภิปรายผล เป็นต้น ถ้าบทความเป็นภาษาไทยจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและ  
ภาษาอังกฤษ โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน มีความยาวไม่เกิน 1,000 คำ
5. **คำสำคัญ (keywords)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ เป็นคำสำคัญที่สามารถใช้ในการ  
สืบค้น ในระบบฐานข้อมูล

หมายเหตุ : เนื้อหาส่วนปกจะต้องเขียนให้อยู่ในกระดาษ จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

#### B. ส่วนเนื้อหา

1. **บทนำ (INTRODUCTION)** เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์  
ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง
2. **วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ (MATERIALS AND METHODS)/วิธีดำเนินการวิจัย  
(RESEARCH METHODOLOGY)** อธิบายเครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัยให้  
ชัดเจน
  - บทความวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ ควรอธิบายเกี่ยวกับเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี  
และวิธีการที่ใช้ในการวิจัย
3. **ผลการวิจัยและอภิปรายผล/ ผลการทดลองและอภิปรายผล (RESULT AND  
DISCUSSION)** เสนอผลการทดลอง อย่างชัดเจน และตรงประเด็น ควรมีรูปภาพ/  
หรือตารางประกอบ การอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพ  
และตารางของบทความที่เป็นภาษาไทย ให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและ  
ตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ
  - เป็นการอภิปรายผลการวิจัยว่าเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้หรือไม่เพียงใด และควร  
อ้างอิงทฤษฎีหรือเปรียบเทียบการทดลองของผู้อื่นที่เกี่ยวข้องประกอบ เพื่อให้  
ผู้อ่านเห็นด้วยตามหลักการหรือคัดค้านทฤษฎีที่มีอยู่เดิม รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงการ  
นำไปใช้ประโยชน์ และการให้ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต
  - รูปภาพ/กราฟ ให้อยู่ในเนื้อเรื่องของบทความ ขนาดตัวอักษรสามารถอ่านได้ชัดเจน  
เหมาะสมกับขนาดของรูปภาพ/กราฟ โดยบันทึกเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล JPG มีความ  
ละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi เท่านั้น ถ้าเป็นภาพถ่ายกรุณาส่งภาพต้นฉบับ และใน  
กรณีที่เป็นรูปถ่ายเส้นไหวดโดยใช้หมึกสีดำที่มีความคมชัด หมายเลขรูปภาพ/  
กราฟให้เป็นเลขอารบิก และอยู่ด้านล่างของรูปภาพ/กราฟ
  - ตาราง ให้อยู่ในเนื้อเรื่องของบทความ หมายเลขตารางให้เป็นเลขอารบิก และอยู่  
ด้านบนของตาราง
4. **บทสรุป (CONCLUSION)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการวิจัย

5. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพียงสั้นๆ (อาจมีหรือไม่มีก็ได้)
6. **เอกสารอ้างอิง (REFERENCES)** เป็นรายการเอกสารอ้างอิงที่ใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัยที่ได้รับการตรวจสอบเพื่อนำมาเตรียมรายงาน และมีการอ้างอิงถึงเฉพาะเอกสารที่ปรากฏในบทความเท่านั้น การอ้างอิงให้จัดเรียงตามลำดับที่อ้างอิงเป็นตัวเลขในเครื่องหมาย [x] และให้เริ่มต้นเรียงลำดับเอกสารจากที่พบในเนื้อหา ก่อนเป็น [1] หากผู้เขียนมีมากกว่า 3 คน ให้ใส่ชื่อ 3 คนแรก แล้วตามด้วย และคณะหรือ et al.

**การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องบทความ (In-text Citations)** การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่อง ให้ใช้ระบบแวนคูเวอร์ (Vancouver style) สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่

<http://library.md.chula.ac.th/guide/vancouver2011.pdf>

#### ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง

##### หนังสือหรือตำรา

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง (Author)./ชื่อหนังสือ (Title of the book)./ครั้งที่พิมพ์ (Edition)./เมืองที่พิมพ์ (Place of Publication):สำนักพิมพ์ (Publisher);ปี (Year).

- Janeway CA, Travers P, Walport M, Shlomchik M. Immunobiology. 5<sup>th</sup> ed. New York: Garland Publishing; 2001.
- รังสรรค์ ปัญญาญะ. โรคติดเชื้อของระบบประสาทกลางในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์; 2536.

##### บทความจากวารสาร (Articles in Journals)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง (Author)./ชื่อบทความ (Title of the article)./ชื่อวารสาร (Title of the Journal)./ปีที่พิมพ์ (Year);เล่มที่ของวารสาร (Volume):หน้า (Pages).

- ขนิษฐา ดำรงกิจ, ใหม่ น้อยพิทักษ์, วิบูลย์ ตั้งโรตมณกุล และคณะ. การศึกษาสมบัติทางกลและส่วนผสมทาง เคมีของรอยเชื่อมเหล็กแรงสูงไฟ. วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ. 2561;12(1):119-31.
- White AR, Treenate D, Kiatgungwalgrai A, et al. The effects of accent familiarity on english as a foreign language students' word recognition and comprehension of the english language. UTK Res J. 2559;10(2):21-30.

##### เอกสารอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Material)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง (Author)./ชื่อบทความ (Title of the article) [ประเภทของสื่อ/วัสดุ]./สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์; ปีพิมพ์ (Year) [เข้าถึงเมื่อ/cited ปี เดือน วันที่]./จาก (Available from): <http://.....>

- Foley KM, Gelband H, editors. Improving palliative care for cancer [Internet]. Washington: National Academy Press; 2001 [cited 2002 Jul 9]. Available from: <https://www.nap.edu/catalog/10149/improving-palliative-care-for-cancer>.
- “กำเนิด ” ระบบหลักประกันสุขภาพถ้วนหน้า มิติใหม่แห่งการบริการด้านสาธารณสุขเพื่อคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นของคนไทย [อินเทอร์เน็ต]. นนทบุรี: สปสช.; 2552. [เข้าถึงเมื่อ 25 มีนาคม 2554]. จาก: [www.localfund.in.th/files/NHSO-intro1-6.pdf](http://www.localfund.in.th/files/NHSO-intro1-6.pdf)

#### การอ้างอิงบทความที่นำเสนอในการประชุม หรือสรุปผลการประชุม (Conference paper)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้เขียน./ชื่อเรื่อง./ใน(In):/ชื่อบรรณาธิการ./บรรณาธิการ./ชื่อหนังสือ./ชื่อการประชุม./วัน เดือน ปีที่ประชุม./สถานที่จัดประชุม./สถานที่พิมพ์./สำนักพิมพ์./ปีที่พิมพ์./น./เลขหน้าเริ่มต้น-เลขหน้าสุดท้ายของบทที่อ้าง.

- ชีระ ฤชตระกูล. Coagulopathy in liver diseases. ใน: ปิยะวัฒน์ โกมลมิศร์, ทวีศักดิ์ แทนวันดี, อนุชิต จุฑาทุทธิ, บรรณาธิการ. Vascular diseases of the liver. การประชุมวิชาการประจำปี ครั้งที่ 4 Vascular diseases of the liver; วันที่ 12-14 มีนาคม 2552; เพชรบุรี.กรุงเทพฯ: สมาคมโรคตับ (ประเทศไทย); 2552. น.1-13.

## 4.2 บทความวิชาการ

### A. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย

### B. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (INTRODUCTION) เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ
2. วิธีการศึกษา/วิธีดำเนินการ (METHOD) (ถ้ามี) เป็นการอธิบายวิธีการศึกษา หรือ การดำเนินการตามประเภทของบทความวิชาการ
3. ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (RESULT AND DISCUSSION) เป็นการเสนอผล อย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ
4. สรุป (CONCLUSION) สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
5. เอกสารอ้างอิง (REFERENCES) ใช้ตามที่วารสารกำหนด

## รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review)

|                                              |                          |
|----------------------------------------------|--------------------------|
| รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ดอนเจดีย์            | ดร.กฤษฎา เหล็กดี         |
| รองศาสตราจารย์ ดร.เรืองฤทธิ์ ชีระโรจน์       | ดร.สุวัฒน์ กิจเจริญวัฒน์ |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนียบบุณิ รัตนวิไลสกุล | ดร.ชลากร อุดมรักษาสกุล   |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง   | ดร.คชพงศ์ สุमानนท์       |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต       | ดร.กมลพงศ์ แจ่มกมล       |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญมี ชินนาบุญ         | ดร.สามารถ ยะเชียงคำ      |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญยุทธ์ กาญจนพิบูลย์  | ดร.อนิวรรต หาสุข         |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรพงษ์ จิตตะโคตร      | ดร.กวีวัชร ทัตติวงศ์     |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิษณุ ทองขาว           | ดร.สันติ ไทยยืนวงษ์      |
| ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ ฝอยทอง          |                          |

แบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ลงในวารสารวิจัย มทร.กรุงทพ

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)..... นามสกุล.....

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

เรื่อง (ภาษาไทย).....

เรื่อง (ภาษาอังกฤษ).....

ชื่อผู้เขียนรวม (ภาษาไทย)

1. ....
2. ....
3. ....

ชื่อผู้เขียนรวม (ภาษาอังกฤษ)

1. ....
2. ....
3. ....

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก..... หมู่ที่..... ซอย.....

ถนน..... ตำบล/แขวง..... อำเภอ/เขต..... จังหวัด.....

รหัสไปรษณีย์..... E-mail..... โทรศัพท์.....

โทรสาร..... โทรศัพท์ (มือถือ).....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ ☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าแต่เพียงผู้เดียว

☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุในบทความจริง

โดยขอรับรองว่ารูปภาพและข้อความทั้งหมดในบทความนี้ ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ใด ๆ และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำบทความนี้ส่งไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นอีกเป็นการซ้ำซ้อนการละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนบทความโดยตรง ทั้งนี้ผู้เขียนเข้าใจในนโยบายการรับบทความของวารสารวิจัย มทร.กรุงทพแล้ว และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิจัย มทร. กรุงทพ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงทพ

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ  
วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง .....  
.....  
โดย .....  
.....

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่าน  
และตีพิมพ์ในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ  
ปีที่..... ฉบับที่ ..... (..... - ..... พ.ศ. ....)

(.....)

บรรณาธิการวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขั้นตอนการจัดทำวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

