



วารสารวิชาการ
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

ปีที่ 18 (2563)

CRMA Journal Vol.18 (2020)

CRMA Journal 2020

Engineering & Science Military

CRMA Journal 2020

CRMA Journal 2020

ISSN 2350-9600



วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ปีที่ 18 (2563)

CRMA Journal Vol.18 (2020)

<http://veel.crma.ac.th/Journal>

ISSN 2350-9600

จัดทำโดย

สภาคณาจารย์ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
ที่ปรึกษากิตติมศักดิ์

พลเอกหญิง ศ.ดร.สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า
กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี
ที่ปรึกษา

พลโท ญัฐวุฒิ	ชุนหะนันท์
พลตรี ศุภชัย	ศรีหอม
พันเอก ผศ.ดร.อโณทัย	สุขแสงพนมรุ้ง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่มีคุณค่าของบุคลากรภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า กองทัพบก กองทัพไทย และบุคคลทั่วไป
2. เพื่อสร้างความตระหนัก และตื่นตัวในด้านการวิจัยและพัฒนาทางวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และการทหาร

ขอบเขต

1. การวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. การวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับการทหาร การรักษาความปลอดภัย และความมั่นคงทางทหาร

กำหนดการออกวารสาร

ปีละ 1 ฉบับ ในเดือนธันวาคม

บรรณาธิการ

พันเอก รศ.ดร.ผเดิม หนังสือ

กองบรรณาธิการ

ศ.ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ
ศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
พลอากาศโท ศ.ดร.นพพล หาญกล้า
ศ.ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์
ศ.ดร.ปิติ สุคนธ์สุขกุล
รศ.ดร.อุดมเกียรติ นนทแก้ว
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์
ผศ.ดร.ยุทธพงศ์ เพียรโรจน์
ผศ.ดร.ธีรพจน์ เวศพันธุ์
ผศ.ดร.สราวุธ เวชกิจ
พันเอก ผศ.ดร.ชวน จันทวาลย์
พันเอก ผศ.ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง
พันเอก รศ.ดร.ปรีชา อภิวัฒน์ตระกูล
พันเอก ผศ.ดร.ญัฐพร นุตยะสกุล
พันเอก รศ.ดร.นราเทพ พุกขหิรัญ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
มหาวิทยาลัยมหิดล
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ (ภายนอก)

พันเอก ผศ.ดร.ประเวทย์ มงคลศิริ
พลอากาศโท ศ.ดร.นพพล หาญกล้า
นาวาอากาศโทหญิง รศ.สุภาวดี สิลายุทธ
พันเอก ดร.สมโภช ปันท้วงกูร
ศ.ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์
ศ.ดร.ปิติ สุคนธ์สุขกุล
รศ.ดร.อุดมเกียรติ นนทแก้ว

ข้าราชการบำนาญ
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
กรมแผนที่ทหาร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.ดร.เวคิน ปิยรัตน์
รศ.ดร.นวล เพ็ชรวัฒนา
รศ.ดร.ธาดาย เหลืองวรานันท์
ผศ.ดร.ยุทธพงศ์ เพียรโรจน์
ผศ.ดร.สราวุธ เวชกิจ
ผศ.ดร.พรทิพย์ แก่งอินทร์
ผศ.ดร.ภัควัฒน์ แสนเจริญ

ผศ.ดร.วราภรณ์ กลิ่นบุญ
ผศ.ดร.นิศากร สมสุข
ผศ.ดร.รัฐศักดิ์ พรหมมาต
ผศ.ดร.ชาติชาย ชุมจันทร์
ดร.ธีรพจน์ เวศพันธ์
ดร.กำพล วรดิษฐ์
ดร.จุฬารัตน์ เอี่ยมสมัย
ดร.สายสุนีย์ จำรัส
ดร.โสภิตา สังข์สุนทร
ดร.เสกสรรค์ สุทธิสงค์
ดร.ณัฐดนัย พรรณเจริญวงศ์
ดร.สาวิณี เงินพิมาย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยมหิดล
สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ (ภายใน)

พันเอก ผศ.ดร.ชวน จันทาลย์
พันเอก ผศ.ภาคภูมิ รุจิเสนีย์
พันเอก รศ.ดร.ผเดิม หนังสือ
พันเอก ผศ.ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง
พันเอก รศ.ดร.ปรีชา อภิวันท์ตระกูล
พันเอกหญิง รศ.ดร.สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา
พันโท ผศ.ดร.อมรเทพ สมราช
พันโท ผศ.ดร.การุณย์ ชัยวนิชย์
พันโทหญิง ดร.ปวีณา วัตบัว

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

คณะผู้จัดทำวารสาร

พันเอก รศ.ดร.ผเดิม หนังสือ
พันเอก รศ.ดร.นราเทพ พุกขหิรัญ
พันเอกหญิง ผศ.ดร.กฤตยาภรณ์ เจริญผล
พันเอกหญิง พัดชา เพิ่มพิพัฒน์
พันโท ผศ.กนก เจริญชัยประกิจ
พันตรีหญิง มัทวัน ชุมทอง
ร้อยโทหญิง กังสดาล อินทกุล
ร้อยโทหญิง สาริศา เขี้ยววง

พันเอก ผศ.ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง
พันเอกหญิง ผศ.วาสนา รุจิเสนีย์
พันเอกหญิง รศ.ดร.สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา
พันโทหญิง ดร.ปวีณา วัตบัว
พันโท ฐานัส มานวงศ์
ร้อยเอก สุชาติ คล้ายแก้ว
ร้อยโท ดร.ปริญญญา เกียรติภัชชัย
ร้อยโทหญิง ปิษญา พันธระ

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่มีคุณค่าของบุคลากรภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า กองทัพบก กองทัพไทย และบุคคลทั่วไป โดยมีขอบเขตการตีพิมพ์ในด้านการวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และการวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับการทหาร การรักษาความปลอดภัย และความมั่นคง วารสารฯ มีกำหนดออกในเดือนธันวาคมของแต่ละปี โดยในฉบับปัจจุบัน (ปี 2563) เป็นปีที่ 18

วารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ได้รับการคัดเลือกเข้าสู่ฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai-Journal Citation Index Centre-TCI) ในการประเมินคุณภาพรอบที่ 4 โดยได้รับการจัดอันดับให้อยู่ในกลุ่มที่ 2 และได้รับการรับรองคุณภาพจนถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2567

สำหรับ “วารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ปีที่ 18 พ.ศ. 2563” ฉบับนี้มีบทความทางวิชาการรวม 10 บทความ เป็นผลงานของอาจารย์ภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จำนวน 3 บทความ และเป็นผลงานของอาจารย์และนักวิชาการภายนอก จำนวน 7 บทความ เนื้อหาการวิจัยของบทความในปีนี้เป็นเรื่องที่กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบัน เช่นเรื่องเกี่ยวกับ พีเอ็ม 2.5 การศึกษาสภาพอากาศ วัสดุศาสตร์ และการพยากรณ์ความต้องการวัสดุ เป็นต้น

ผู้สนใจวารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า สามารถอ่านบทความทั้งในอดีตและปัจจุบันได้จาก <http://veel.crma.ac.th/Journal> สำหรับผู้ที่สนใจส่งบทความทางวิชาการเพื่อขอให้วารสารฯ ทำการเผยแพร่ สามารถใช้ URL นี้ได้เช่นเดียวกัน

พันเอก รศ.ดร.



(เพิ่มเติม หนังสือ)

บรรณาธิการ

บทความหรือข้อคิดเห็นใดๆ ที่ปรากฏในวารสารเป็นวาระกรรมของผู้เขียน
บรรณาธิการหรือโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าไม่จำเป็นต้องเห็นด้วย

The ideas and opinions expressed in the journal are those of the authors and not necessarily those of the editor or
Chulachomklao Royal Military Academy.

ติดต่อ บรรณาธิการ วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

99 ถ.สุวรรณศร ต.พรหมณี อ.เมือง จ.นครนายก 26001

โทร. 037-393-010-4 ต่อ 62749 โทรสาร 037-393-0240

สารบัญ

- | | | |
|---|--|----|
| ☆ | การศึกษาความต้องการอาวุธปล่อยนำวิถีจากพื้นสู่อากาศเพื่อสำรองสงคราม
โดยใช้เทคนิคการพยากรณ์ร่วมกับการวางแผนความต้องการวัสดุ
The Study of the Demand of Surface-to-air Missile for War Reserve Stockpile
Using Forecasting and Material Requirement Planning Techniques
นาวาอากาศเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.เกียรติกุลไชย จิตต์เอื้อ | 1 |
| ☆ | Assessment of Drought Impacts on Urban Green Areas with
the Climatic Drought Index in Nakhonratchasima City, Thailand
Colonel Dr. Pongpun Juntakut | 15 |
| ☆ | Study on Pre-Weakening Pattern and Behavior of ¼ Scale Steel Structure
under Blasting Demolition
Lieutenant Colonel Peerasak Aemlaor
Captain Kitsada Sripheon | 23 |
| ☆ | การตรวจลักษณะทางพื้นผิวและธาตุองค์ประกอบในเส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยธรรมชาติ
ที่พบในประเทศไทยโดยวิธี Scanning Electron Microscope/Energy Dispersive X-ray
Spectroscopy เพื่อประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์
The Classification of Natural and Synthetic Fibers in Thailand for
Forensic Purpose by Using Surface and Elemental Analysis from
Scanning Electron Microscope/Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พันตำรวจโท ดร.ธิติ มหาเจริญ | 32 |
| ☆ | การศึกษาระยะการยิงปืนลูกซองกับพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด
Study of Firing Distance of Shotgun with Average Distribution Area of Buckshot
ศศิธร เลิศเกียรติบัญชา
พันตำรวจโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิติ มหาเจริญ | 47 |

☆	การศึกษาการใช้วัสดุผสมของพอลิโพรพิลีนและใยมะพร้าวเป็นวัสดุทดแทนไม้ Study of Polypropylene and Coconut Fiber Powder Composite as a Wood Replacing Material นาวาอากาศเอกหญิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สันสนีย์ เหมาคม นาวาอากาศตรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โชคชัย แจ่มอำพร	58
☆	การศึกษากลศาสตร์ความเสียหายพื้นฐานในโลหะเหนียวและการทดสอบสองแกนรูปแบบใหม่ A study of fundamental damage mechanic approaches in ductile metals and new biaxial test ร้อยเอก เพ็ญพันธ์ อุดุลยศักดิ์	70
☆	การศึกษาระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง The Study of the Mixing Duration Time and Recirculation Rate Effect to Biogas Production from Sweet Corn Waste by Dry Fermentation Process ศศิธร ไสป่า ฐปน ชื่นบาล นิกราน หอมดวง จุฑาภรณ์ ชนะถาวร รจพรรณ นิธิยุศิลป์	87
☆	The Efficient Forecast of Demand Side Management for Flight Simulator Energy Management System Wing Commander Kritsana Sukdee Assistant Professor Dr. Watchara Wongpanyo	106
☆	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายเทความร้อนภายในกำแพงหลายชั้น Mathematical Model of Heat Transfer Within Multi-layered Wall เรืออากาศตรี ดร.วิศรุต คล้ายแจ้ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ โพธิ์ชัย นาวาอากาศเอก รองศาสตราจารย์ สมภูมิ มีชานนา	120

การศึกษาความต้องการอาวุธปล่อยนำวิถีจากพื้นสู่อากาศเพื่อสำรองสงคราม
โดยใช้เทคนิคการพยากรณ์ร่วมกับการวางแผนความต้องการวัสดุ
The Study of the Demand of Surface-to-air Missile for
War Reserve Stockpile Using Forecasting and Material Requirement
Planning Techniques

นาวาอากาศเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติกุลไชย จิตต์เอื้อ
Group Captain Assistant Professor Dr. Kiatkulchai Jitt-Aer

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร 10220 ประเทศไทย

Assistant Professor, Academic Division, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy,
Sai Mai, Bangkok 10220, Thailand

Corresponding Author. E-mail : kiatkulchai@yahoo.com

(Received: September 11, 2019, Accepted: January 8, 2020)

บทคัดย่อ : เนื่องจากสถานการณ์ปัจจุบันได้บ่งชี้ถึงการพัฒนาเทคโนโลยีป้องกันประเทศและการจัดหาอาวุธยุทโธปกรณ์ รวมถึงการสะสมอาวุธทางทหารในภูมิภาคต่างๆ ทั่วโลก อาจส่งผลกระทบต่อความขัดแย้งหรือการสงครามระหว่างประเทศเป็น สิ่งที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต ดังนั้นกองทัพอากาศหรือหน่วยงานด้านความมั่นคงของประเทศต่างๆ จำเป็นต้องมีการสำรอง อาวุธยุทโธปกรณ์ไว้ในภาวะสงครามจำนวนหนึ่งเพื่อให้เพียงพอต่อการทำการรบเมื่อมีภาวะสงครามเกิดขึ้นในช่วงระยะ เวลาหนึ่งๆ ตามนโยบายที่กองทัพอากาศหรือรัฐได้กำหนดไว้ นอกจากนี้ กองทัพต่างๆ ต้องมีจำนวนอาวุธยุทโธปกรณ์ที่เพียงพอ ในภารกิจการฝึกในภาวะปกติด้วย ดังนั้นหากคลังอาวุธสำรองสงครามอยู่ในระดับต่ำ อาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคง ของประเทศนั้นๆ ได้ บทความวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายศึกษาความต้องการของอาวุธยุทโธปกรณ์ทางทหารเพื่อให้ได้ระดับ คงคลังของอาวุธยุทโธปกรณ์ที่เพียงพอต่อสงครามในระยะเริ่มแรก ซึ่งบทความวิจัยนี้ได้ตั้งสถานการณ์สมมติเพื่อศึกษา ความต้องการของอาวุธปล่อยนำวิถีจากพื้นสู่อากาศ โดยได้เสนอแนวทางการกำหนดแผนในการจัดซื้ออาวุธปล่อยนำวิถี จากพื้นสู่อากาศในอนาคตเพื่อให้เพียงพอต่อการสำรองในภาวะสงครามและรวมถึงการใช้ในภารกิจการฝึกในภาวะปกติ บทความวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการพยากรณ์ร่วมกับทฤษฎีการวางแผนความต้องการวัสดุ โดยได้จำลอง ข้อมูลที่ใช้เพื่อการพยากรณ์ขึ้นมาเพื่อนำมาทดสอบการใช้ทฤษฎีดังกล่าว การวิจัยได้พบว่าตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสม ในการพยากรณ์ความต้องการอาวุธปล่อยนำวิถีจากพื้นสู่อากาศ คือ วิธีการวิเคราะห์การถดถอยแบบง่าย และได้้นำค่า การพยากรณ์ที่ได้ไปจัดทำตารางแผนการจัดซื้ออาวุธปล่อยนำวิถีจากพื้นสู่อากาศเพื่อแสดงระยะเวลาที่มีอาวุธปล่อยนำ วิถีจากพื้นสู่อากาศเพียงพอกับคลังสำรองสงครามรวมถึงสามารถนำไปใช้ในการฝึกได้โดยไม่กระทบกระเทือน ต่อคลังสำรองสงครามที่กำหนด ซึ่งเหล่าทัพหรือกองทัพไทยสามารถนำรูปแบบของการประยุกต์ใช้ทฤษฎีที่นำเสนอไป ปรับใช้ในการวางแผนการจัดซื้อจัดหาอาวุธยุทโธปกรณ์ที่จำเป็นได้ในอนาคต

คำสำคัญ : อาวุธสำรองสงคราม การจัดซื้ออาวุธ การพยากรณ์ การวางแผนความต้องการวัสดุ

Abstract : Arms procurement in many regions across the world is estimated to have increased in recent years. The literature shows that defense budgets in several countries are spent for munitions and equipment by military services. This can cause international security concerns and regional territorial disputes which are key drivers for wars or international conflicts in the future. As a result, more countries put more emphasis on the security aspect by stocking ammunition for utilising during the initial month as war reserve and also for military exercise during peacetime. However, due to a lack of specific capabilities, purchasing and procuring military arms from the global markets must be well-planned for those in the regions vulnerable for international conflicts. To this end, the purpose of this research is to study the demand of surface-to-air missile (SAM) for both war reserve stockpile and military exercise during peacetime. This study applies forecasting and material requirement planning techniques to achieve the research objectives. A military scenario of a country and its initial data are set up and simulated respectively for describing the research methodologies. Based on the randomised data, the result shows that simple linear regression is suitable for implementing in this research. By manipulating the dataset obtained from the forecast model, a material requirement planning is established and then illustrated a time duration to accomplish the SAM stock sufficiency to meet the war reserve policy and also serving the military exercise missions of the forecast-based scenario.

Keywords : War Reserve, Arms Procurement, Forecasting, Material Requirement Planning

1. บทนำ

บทเรียนจากสงครามในอดีตมากมายย้ำเตือนทุกประเทศอยู่เสมอว่า การจะสร้างมิตรประเทศไม่ว่าด้านทาง การทูตหรือทางเศรษฐกิจไม่อาจสร้างความมั่นใจได้ว่าจะไม่เกิดความขัดแย้งระหว่างกันเกิดขึ้น [1] เพราะสุดท้ายทุกประเทศก็ต้องยึดผลประโยชน์ของชาติตนก่อน และสงครามในปัจจุบันมีความซับซ้อนมากกว่าในอดีต ไม่เพียงแต่เกิดขึ้นจากคู่ขัดแย้งโดยตรง แต่อาจอยู่ในรูปแบบของสงครามตัวแทน (Proxy war) และสงครามต่อต้านการก่อการร้าย (War on terror) ดังนั้นแต่ละประเทศจึงต้องมีการเตรียมพร้อมทางด้านการทหารในระดับที่ต่างๆ กัน ตามนโยบาย สภาพแวดล้อมและสถานการณ์ที่เกิดขึ้นในอดีตและปัจจุบัน

เนื่องจากปัจจัยสำคัญในการทำสงครามนั้นประกอบไปด้วย 3 ประการคือ กำลังพล ยุทธศาสตร์และยุทธวิธี และสุดท้ายคือเทคโนโลยีหรืออาวุธยุทโธปกรณ์ [1] ดังนั้นในยุคแห่งโลกาภิวัตน์นี้ กองทัพของแต่ละประเทศจึงสามารถที่จะศึกษาเรียนรู้ พัฒนากำลังพล พัฒนากลยุทธ์ ยุทธวิธี และยุทธศาสตร์ ให้มีระดับใกล้เคียงกันทั้งด้วยกำลังทหารสมัยใหม่นั้นจะต้องสามารถปฏิบัติการได้สามมิติ (บก เรือ และอากาศ) หรือบางครั้งอาจถึงมิติที่สี่ (อวกาศ) [2] จึงนำมาสู่บทสรุปที่ว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดในสงครามยุคใหม่คือ เทคโนโลยีป้องกันประเทศหรืออาวุธยุทโธปกรณ์ [1] จากปัจจัยดังกล่าวนี้ จึงอาจนำไปสู่สถานการณ์การพัฒนาเทคโนโลยีป้องกันประเทศและการแข่งขันสะสมอาวุธยุทโธปกรณ์เพื่อพัฒนากองทัพของประเทศต่างๆ [3]

ทั้งนี้ได้เริ่มมีการสัญญาณด้านการแข่งขันการสะสมอาวุธในภูมิภาคต่างๆ เช่น ประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ระหว่างปี ค.ศ. 2008 - 2017 มีการใช้งบประมาณทางทหารเพิ่มขึ้นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น กัมพูชาใช้งบประมาณด้านการทหารเพิ่มขึ้น 332% อินโดนีเซีย 122% ส่วนประเทศอื่นๆ เช่น เวียดนาม ฟิลิปปินส์ และเมียนมา ใช้งบประมาณมากขึ้น 40 - 100%

เพื่อจัดซื้ออาวุธยุทโธปกรณ์ทางทหาร [4] ดังนั้น เพื่อสร้างขีดความสามารถทางการทหารให้เทียบเท่ากับประเทศดังกล่าว กองทัพของประเทศอื่นๆ ในภูมิภาคนี้จึงอาจจำเป็นต้องจัดหาปัจจัยทางเทคโนโลยีและอาวุธยุทโธปกรณ์ที่ทันสมัยเพื่อสำรองไว้ในภาวะสงคราม และทั้งนี้ยังต้องเพียงพอในการกิจการฝึกในภาวะปกติด้วย ซึ่งได้สอดคล้องตามที่ [5] ได้กล่าวไว้ว่า เทคโนโลยีและอาวุธยุทโธปกรณ์ทางทหารนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการทำการรบในยามสงครามและการเตรียมกำลังรบในยามสงบ ซึ่งจะต้องมีการจัดซื้อจัดหาเพื่อใช้ในการฝึกและรวมถึงต้องรักษาระดับคลังสำรองของอาวุธยุทโธปกรณ์ (War reserve stockpile) ไว้ให้เพียงพอต่อช่วงระยะเริ่มแรกของสงครามอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม การคลังสำรองอาวุธยุทโธปกรณ์อาจทำให้อาวุธยุทโธปกรณ์เสื่อมสภาพหรือชำรุดจากปัจจัยทางสภาพแวดล้อมได้ เช่น อุณหภูมิ และความชื้นอากาศ [6] ดังนั้น กองทัพจึงมีความจำเป็นในการใช้อาวุธยุทโธปกรณ์จำพวกกระสุนหรืออาวุธนำวิถีต่างๆ (Ammunitions) ในทางการฝึกการรบเพื่อตอบสนองภารกิจการฝึกและยังเป็นการป้องกันไม่ให้อาวุธยุทโธปกรณ์เหล่านั้นชำรุดเสียหายเนื่องจากการจัดเก็บไว้นานๆ ดังที่กล่าวไปแล้ว จึงต้องนำอาวุธยุทโธปกรณ์เหล่านั้นจากคลังมาใช้ จากปัญหาดังกล่าวอาจส่งผลให้จำนวนอาวุธยุทโธปกรณ์ในคลังสำรองไม่อยู่ในระดับที่กำหนดได้ 100% [7]

นอกจากนี้ในด้านงบประมาณ นอกจากงบประมาณในการจัดซื้อจัดหาอาวุธยุทโธปกรณ์แล้ว การคลังสำรองอาวุธยุทโธปกรณ์ไว้เป็นจำนวนมากอาจต้องเสียค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาด้วย ดังนั้น งบประมาณในการสำรองอาวุธยุทโธปกรณ์ไว้ในภาวะสงครามอาจถูกจำกัดเนื่องจากกองทัพต้องใช้งบประมาณไปในด้านอื่นๆ ที่มีความสำคัญและเร่งด่วนมากกว่า [8], [9], [10] ดังนั้น กองทัพจึงต้องมีการจัดซื้อจัดหาเพื่อรักษาระดับคลังสำรองอาวุธยุทโธปกรณ์ที่จำเป็นต่อการใช้งานในระยะช่วงเวลาหนึ่ง

ตามสถานการณ์ของโลกหรือภูมิภาค หรือตามนโยบายของกองทัพหรือรัฐบาลของประเทศนั้นๆ

บทความวิจัยนี้เป่าหมายเพื่อศึกษาความต้องการอาวุธยุทโธปกรณ์ โดยกำหนดเป็นกรณีศึกษาของอาวุธปล่อยนำวิถีจากพื้นสู่อากาศของประเทศหนึ่ง เพื่อคงคลังไว้สำหรับภาวะสงครามรวมทั้งเพื่อตอบสนองต่ออัตราการใช้ฝึกประจำปีด้วย เพื่อให้มีจำนวนอาวุธปล่อยนำวิถีจากพื้นสู่อากาศที่เพียงพอต่อการสำรองในภาวะสงครามและการฝึกในยามปกติ และเพื่อลดความเสี่ยงของการขาดแคลนอาวุธปล่อยนำวิถีจากพื้นสู่อากาศ โดยในบทความวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการพยากรณ์ร่วมกับการวางแผนความต้องการวัสดุ และสร้างสถานการณ์สมมติ (Military scenario) และใช้แบบจำลองข้อมูล (Data simulation) ทางสถิติมาใช้กับทฤษฎีดังกล่าวในการหาข้อมูลผลลัพธ์ในรูปแบบของตารางวางแผนความต้องการวัสดุ

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อหาตัวแบบการพยากรณ์ที่เหมาะสมและพยากรณ์ความต้องการใช้อาวุธปล่อยนำวิถีจากพื้นสู่อากาศในอนาคต
- 2) เพื่อประยุกต์ใช้ตารางแผนความต้องการวัสดุในการวางแผนการจัดซื้อจัดหาอาวุธปล่อยนำวิถีจากพื้นสู่อากาศให้เพียงพอต่อคงคลังของอาวุธยุทโธปกรณ์สำรองสงคราม

3. สถานการณ์สมมติ

เนื่องจากสถานการณ์การสะสมเครื่องบินรบสมรรถนะดีของประเทศต่างๆ ในภูมิภาคหนึ่งของโลก ดังนั้น กองทัพของประเทศ ก. ที่อยู่ในบริเวณภูมิภาคดังกล่าว ได้มีนโยบายการปรับเปลี่ยนอัตราอาวุธคงคลังของอาวุธสำรองสงครามจากเดิม 20 วัน เป็น 30 วัน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องสำรองอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ (SAM: Surface to air missile) ไว้ในภาวะสงครามเป็น

จำนวน 400 นัด เพื่อให้เพียงพอต่อการทำการรบเมื่อมีภาวะสงครามเกิดขึ้นในระยะเวลา 30 วัน โดยได้สมมติสถานการณ์เพิ่มเติมดังนี้ คือ กองทัพของประเทศ ก. ในปีปัจจุบัน (ต่อไปจะกำหนดให้ p : present คือ ปีปัจจุบัน) มีอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM อยู่ในคลังสำรองจำนวน 375 นัด และมีความจำเป็นใช้ในการฝึกการฝึก 29 นัด แต่เนื่องจากประเทศ ก. ไม่สามารถผลิตอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ได้ด้วยตนเอง จึงต้องจัดซื้อจากประเทศ ข. ซึ่งมีข้อจำกัดดังนี้คือ ประเทศ ข. สามารถผลิตและจัดส่งอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ให้ประเทศ ก. ได้ครั้งละ 50 นัด และมีเวลานำ (Lead time) ในการผลิตและจัดส่งนาน 4 ปี โดยในปีปัจจุบัน p กองทัพของประเทศ ก. จะได้รับอาวุธดังกล่าวจำนวน 50 นัด พอติจากการสั่งซื้อเมื่อ 4 ปีที่แล้ว ($p - 4$) ดังนั้น กองทัพของประเทศ ก. จึงมีอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM จำนวน 425 นัด ($375 + 50$ นัด) แต่มีความต้องการใช้การฝึกการฝึกจริง 29 นัด จึงจำเป็นที่จะต้องเบิกอาวุธในคลังสำรองสงคราม ทำให้มีความต้องการเบิกจากคลังสำรองอีก 4 นัด อาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ที่สำรองสงครามจึงเหลือเพียง 396 นัด ซึ่งไม่เพียงพอต่ออัตราอาวุธคงคลังของอาวุธสำรองสงครามที่ประเทศ ก. ได้กำหนดไว้ กองทัพของประเทศ ก. จึงต้องการศึกษาความต้องการอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM เพื่อใช้ฝึกในภาวะปกติ และยังคงรักษ้อัตราอาวุธคงคลังของอาวุธสำรองสงครามตามที่กำหนดด้วย

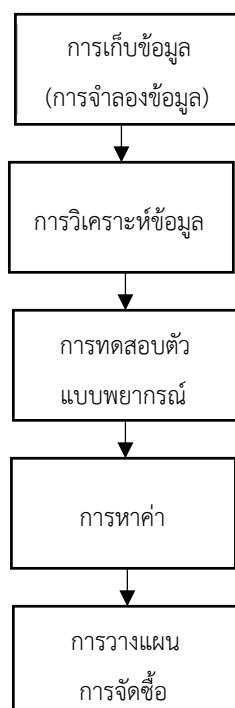
4. ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยนี้พิจารณาข้อมูลตามสถานการณ์สมมติที่ระบุในหัวข้อที่ 3 และกำหนดให้ประเทศ ข. สามารถขายอาวุธให้ประเทศ ก. ตลอดระยะเวลาที่ประเทศ ก. ต้องการซื้อ รวมทั้งกำหนดให้ระยะเวลานำในการส่งมอบอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM คงที่ 4 ปี ในทุกๆ ครั้งที่มีการสั่งซื้อ ซึ่งการส่งมอบแต่ละครั้งให้มีจำนวนคงที่ครั้งละ 50 นัด พอติ

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MS Excel เพื่อให้หารูปแบบของการกระจายของข้อมูลอัตราการใช้งานอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ของประเทศ ก. ในอดีต โดยการจำลองข้อมูลแบบสุ่ม (Random) และงานวิจัยนี้ได้ใช้เฉพาะค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute percentage error: MAPE) เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุด

5. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังแสดงตามภาพที่ 1 ประกอบไปด้วยการจำลองข้อมูลทางสถิติโดยวิธีการแบบสุ่ม การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาแบบจำลองการพยากรณ์ที่เหมาะสม การกำหนดตัวแบบพยากรณ์ที่ดีที่สุดเพื่อใช้ในการใช้ในการพยากรณ์ความต้องการอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ในอนาคต และสุดท้ายคือการวางแผนการจัดซื้ออาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ตามทฤษฎีการวางแผนความต้องการวัสดุ เพื่อให้ได้จำนวนพัสดุคงคลังของอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ที่เพียงพอต่ออัตราอาวุธคงคลังของอาวุธสำรองสงครามตามสถานการณ์ที่สมมติตามหัวข้อที่ 3



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการวิจัย

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำลองจำนวนความต้องการของอาวุธในการฝึก

ปี	p-9	p-8	p-7	p-6	p-5	p-4	p-3	p-2	p-1	p
จำนวน	3	2	2	2	2	2	2	3	3	2
	3	3	9	8	6	0	5	2	7	9

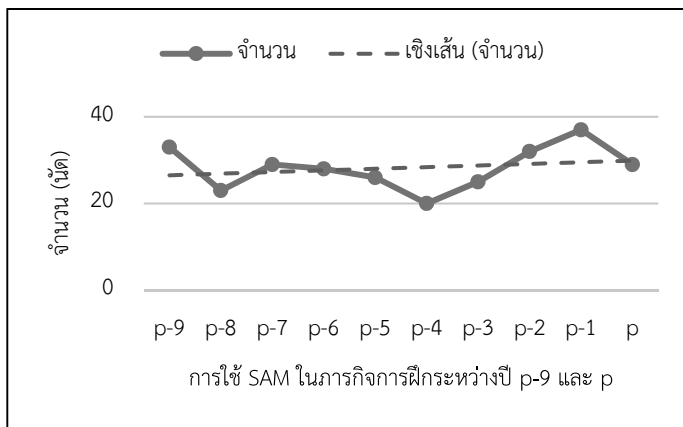
*หน่วยเป็นนัด

5.1 การจำลองข้อมูลทางสถิติ

การวิจัยนี้มีเริ่มต้นจากการจำลองข้อมูลทางสถิติของความต้องการใช้อาวุธยุทธโศปกรณ์ในการฝึกประจำปี โดยบทความวิจัยนี้ได้ทดลองสุ่มข้อมูลความต้องการใช้อาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ในการฝึกในปีปัจจุบันและย้อนหลังไปรวม 10 ปี เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพยากรณ์ต่อไปในอนาคต ดังนั้น ข้อมูลความต้องการในปีปัจจุบัน p และในอดีต p - 1, p - 2, p - 3, p - 4, p - 5, p - 6, p - 7, p - 8 และ p - 9 โดยมีข้อมูลที่สุ่มขึ้นโดยใช้ฟังก์ชัน RAND() ในโปรแกรม MS Excel ซึ่งได้ผลการสุ่มแสดงได้ตามตารางที่ 1

5.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อกำหนดตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสม โดยการนำข้อมูลในตารางที่ 1 นำมาเขียนแผนภูมิการกระจายของข้อมูลจำนวนอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ที่เบิกใช้ในการฝึกการฝึกโดยใช้โปรแกรม MS Excel เพื่อให้ทราบรูปแบบของการกระจายของข้อมูลการใช้อาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ในอดีตว่าเป็นประเภทใด รูปแบบการกระจายของข้อมูลสามารถแสดงได้ตามภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนภูมิแสดงสถิติจำนวน SAM ที่ใช้ในการฝึกการฝึก

จากรูปแบบการกระจายของข้อมูลจำลองการใช้ฝึกของอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM แนวโน้มของข้อมูลมีการเคลื่อนไหวแบบแนวโน้มเชิงเส้นตรง (Linear trend data) ไม่มีอิทธิพลฤดูกาล ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมกับการใช้ในการพยากรณ์รูปแบบอนุกรมเวลา [11] ผู้วิจัยจึงได้เลือกเทคนิคการพยากรณ์ค่าเฉลี่ยแบบตรงตัว (Naïve approach) การพยากรณ์ด้วยวิธีการปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential smoothing) และการพยากรณ์แบบการวิเคราะห์การถดถอยแบบง่าย (Simple regression analysis) มาใช้เป็นตัวแบบพยากรณ์ และนำตัวแบบพยากรณ์ทั้งสามนี้มาทดสอบเพื่อกำหนดตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในงานวิจัยนี้

5.3 การทดสอบตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุด

การกำหนดตัวแบบพยากรณ์นั้น ผู้วิจัยได้นำข้อมูลตามตารางที่ 1 มาหาค่าพยากรณ์ด้วยวิธีการพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยแบบตรงตัว โดยตัวแบบพยากรณ์แบบค่าเฉลี่ยแบบตรงตัวนี้เป็นวิธีการพยากรณ์ที่ง่ายที่สุด โดยอาศัยข้อสมมติที่ว่าข้อมูลในช่วงปัจจุบันล่าสุดเป็นค่าพยากรณ์ที่ดีที่สุดสำหรับอนาคต ซึ่งมีสมการการคำนวณค่าพยากรณ์ดังนี้

$$F_{t+1} = \sum_{t=1}^n \frac{Y_t}{N} \quad (1)$$

โดยที่ F_{t+1} = ค่าพยากรณ์ ณ เวลา $t + 1$

Y_t = ข้อมูลในอดีต โดยที่ $t = 1, 2, \dots, n$

$N = 1$ (Naïve method)

ต่อจากนั้น ผู้วิจัยได้นำข้อมูลชุดเดียวกันมาใช้ในการคำนวณหาค่าพยากรณ์ด้วยวิธีการปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งวิธีนี้จะมีการให้น้ำหนักกับข้อมูลในอดีตแบบไม่เท่ากัน โดยจะให้ความสำคัญของข้อมูลล่าสุดจะมากที่สุด และความสำคัญจะลดลงเรื่อยๆ สำหรับข้อมูลทีระยะเวลาห่างออกไป หรือเรียกอีกอย่างคือ การหาค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก (Weight average) ซึ่งมีตัวน้ำหนักที่ใช้ถ่วง เรียกว่า ค่าคงที่ปรับเรียบ (Smoothing constant: α) โดยตัวแบบการปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล มีสมการการหาค่าพยากรณ์ดังนี้

$$F_{t+1} = \alpha Y_t + (1 - \alpha) F_t \quad (2)$$

โดยที่ F_{t+1} = ค่าพยากรณ์ ณ เวลา $t + 1$

Y_t = ข้อมูลในอดีต โดยที่ $t = 1, 2, \dots, n$

α = ค่าปรับน้ำหนักระหว่าง 0 - 1

และสุดท้ายเป็นการใช้เทคนิคการพยากรณ์โดยวิธีวิเคราะห์การถดถอยแบบง่าย ซึ่งตัวแบบพยากรณ์นี้ใช้วิธีการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลซึ่งเป็นตัวแปรตาม (Dependent variable) กับระยะเวลาซึ่งเป็นตัวแปรอิสระ (Independent variable) โดยการวิเคราะห์

ความสัมพันธ์แบบถดถอยนี้เหมาะสมสำหรับข้อมูลที่มีการเคลื่อนไหวแบบแนวโน้มเชิงเส้น ซึ่งสมการการคำนวณค่าพยากรณ์สามารถแสดงได้ดังนี้

$$F_t = a + b \cdot t \quad (3) \quad \text{และ}$$

$$b = \frac{n \sum_{t=1}^n ty_t - \sum_{t=1}^n t \sum_{t=1}^n y_t}{n \sum_{t=1}^n t^2 - (\sum_{t=1}^n t)^2}$$

$$a = \sum_{t=1}^n \frac{Y_t}{n} - b \left(\sum_{t=1}^n \frac{t}{n} \right)$$

โดยที่ F_t = ค่าพยากรณ์ ณ เวลา t

t = ปีที่ต้องการพยากรณ์

n = จำนวนปีของข้อมูล

Y_t = ค่าของข้อมูล ณ เวลา t

a และ b เป็นค่าคงที่

หลังจากได้ผลการคำนวณหาค่าการพยากรณ์จากตัวแบบพยากรณ์ทั้งสามแบบแล้ว ผู้วิจัยได้คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) ของผลการพยากรณ์ในแต่ละวิธี เนื่องจากค่า MAPE แสดงออกมาในรูปของเปอร์เซ็นต์ซึ่งง่ายต่อการตีความ [12] คือค่าความคลาดเคลื่อนของวิธีใดมีค่าน้อยที่สุด ถือว่าตัวแบบนั้นมีประสิทธิภาพมากที่สุด [13] ในทางกลับกันตัวแบบที่ไม่เหมาะสมกับการพยากรณ์ก็จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูง [12] ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสมบูรณ์นี้ไม่มีหน่วย และมีค่าเป็นบวกเสมอ [14] ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$MAPE = \sum_{t=1}^n [|e_t/Y_t|] \cdot \frac{100}{n} \quad (4)$$

$$e_t = Y_t - F_t$$

โดยที่ Y_t = ค่าข้อมูลที่ระยะเวลา t

F_t = ค่าการพยากรณ์ระยะเวลา t

e_t = ค่าความคลาดเคลื่อนที่ระยะเวลา t

$t = 1, 2, 3, \dots, n$

เมื่อได้ค่า MAPE ของแต่ละตัวแบบพยากรณ์แล้ว จึงเปรียบเทียบอัตราความแม่นยำของการพยากรณ์ โดยใช้เกณฑ์การพิจารณาระดับความแม่นยำจากค่า MAPE ซึ่งพัฒนาโดย [15] โดยความสัมพันธ์ระหว่าง MAPE กับระดับความแม่นยำแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งอ้างอิงจาก [16] เพื่อหาตัวแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง MAPE กับระดับความแม่นยำ

เกณฑ์การพิจารณา	ระดับความแม่นยำ
MAPE < 10%	สูง
10% < MAPE < 20%	ดี
20% < MAPE < 50%	สมเหตุสมผล
MAPE > 50%	ไม่มีความแม่นยำ

5.4 การวางแผนความต้องการอาวุธ SAM

หลังจากทราบจำนวนความต้องการของอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM แล้ว ขั้นตอนต่อมาคือ การวางแผนการจัดซื้ออาวุธด้วยเทคนิคการวางแผนความต้องการวัสดุ (MRP) ซึ่งเป็นกระบวนการการวางแผนความต้องการวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงเวลา เพื่อให้มีปริมาณผลิตภัณฑ์คงคลังอยู่ในระดับที่ต้องการ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์เทคนิคการวางแผนความต้องการวัสดุเพื่อบริหารจัดการการจัดซื้อจัดหาอาวุธ โดยประเทศ ก. เป็นผู้จัดซื้อจัดหาอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM จากประเทศ ข. ซึ่งเป็นผู้ผลิตและผู้ส่งมอบ และประเทศ ก. จะใช้ตาราง MRP เพื่อวางแผนการจัดซื้อจัดหา และใช้ในการบริหารจัดการให้อาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM มีปริมาณสำรองสงครามตามที่กำหนด และสามารถมีใช้เพียงพอในการฝึกด้วย

โดยการจัดซื้อแต่ละครั้งกำหนดให้เวลาการส่งมอบหรือเวลานำใช้เวลา 4 ปี คือเริ่มตั้งแต่เสนอความต้องการจนกระทั่งได้รับอาวุธจะใช้เวลาดำเนินงาน 4 ปี โดยบทความวิจัยนี้ได้จำลองข้อมูลตามที่ระบุในสถานการณ์สมมติในหัวข้อที่ 3 และสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาแสดงได้ ตามตารางที่ 3 เพื่อเป็นข้อมูลตั้งต้นในการสร้างแผนความต้องการอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM อีก 10 ปีถัดไป ($p + 10$)

ตารางที่ 3 ชุดข้อมูลตั้งต้นในปีปัจจุบัน p

จำนวน คงคลัง ปัจจุบัน	จำนวนที่ ต้อง สำรองไว้	ชนิด อาวุธ นำวิถี	รายการ	ปี p
375	400	SAM	จำนวนที่ ต้องสำรองไว้	400
			ความ ต้องการขั้นต่ำ	29
			จำนวนที่ได้รับ ตามกำหนดเวลา	50
			จำนวนที่ นำไปใช้ฝึกได้	25
			ความ ต้องการเบิกจาก คลังสำรอง	4
			แผนกำหนด การรับของ	-

6. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้จะแสดงผลแสดงผลลัพธ์แบบพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุด และจะแสดงผลของตาราง MRP ที่แสดงแผนการจัดซื้ออาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ในอนาคต ซึ่งมีผลการวิจัยดังนี้

การหาค่าการพยากรณ์โดยวิธีค่าเฉลี่ยแบบตรงตัวนั้น จะเป็นวิธีที่มีแนวคิดที่ความต้องการของอาวุธในอนาคตจะเท่ากับความต้องการในปัจจุบัน เช่น ในปีปัจจุบัน p มีความต้องการใช้อาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ในการฝึกจำนวน 29 นัด จะสามารถทำการพยากรณ์ความต้องการในปีถัดไป ($p + 1$) ได้เท่ากับ 29 นัดด้วย

ในส่วนการใช้ตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีการปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลนั้น สามารถนำข้อมูลในอดีตมาพยากรณ์โดยใช้ฟังก์ชัน Data analysis ใน MS Excel แก่สมการที่ (2) และกำหนดค่า Damping factor หรือ $1-\alpha$ เป็น 0.2 (ค่าคงที่ปรับเรียบ $\alpha = 0.8$) เพื่อหาค่าพยากรณ์ เนื่องจากเป็นการให้ความสำคัญกับข้อมูลปีล่าสุดมากกว่าข้อมูลในปีที่ห่างออกไป และค่าคงที่ปรับเรียบดังกล่าวทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนพยากรณ์ (MAPE) ต่ำที่สุด จึงเหมาะกับการนำมาใช้ในตัวแบบพยากรณ์นี้ [16]

ต่อมาคือการใช้ตัวแบบวิเคราะห์การถดถอยแบบง่ายนั้น ก็สามารถแก้ปัญหาโดยใช้ฟังก์ชัน Data analysis ใน MS Excel เช่นกัน โดยใช้ข้อมูลในอดีตตามตารางที่ 1 จะได้ผลลัพธ์ค่าคงที่ a และ b คือ 26.133 และ 0.376 ตามลำดับ ดังนั้น แทนค่า a และ b ในสมการที่ (3) แล้วจะได้ตัวแบบที่ใช้ในการพยากรณ์ดังแสดงในสมการที่ (5)

$$F_t = 26.133 + 0.376 \cdot t \quad (5)$$

โดยจากสมการตัวแบบพยากรณ์ที่ได้นั้น ถ้าต้องการหาค่าพยากรณ์ในปีต่างๆ ก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่า $t \in I; I = \{1, 2, 3, \dots, n\}$

และจากการใช้ตัวแบบพยากรณ์ทั้งสามหาค่าพยากรณ์จากข้อมูลในตารางที่ 1 จะได้ผลลัพธ์การพยากรณ์ดังแสดงในตารางที่ 4

ค่าพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบพยากรณ์ทั้งสามแบบนี้ เมื่อนำมาคำนวณค่า MAPE (ตามสมการที่ 4) ของตัวแบบพยากรณ์แต่ละตัวแล้ว ปรากฏว่าได้ผลเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 5

จะเห็นว่าค่าพยากรณ์ที่อยู่ในเกณฑ์ดี (MAPE อยู่ระหว่าง 10-20%) มี 2 วิธี คือ วิธีการปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและวิธีวิเคราะห์การถดถอยแบบง่าย แต่ทั้งสองวิธีนี้ได้ให้ค่า MAPE ที่ใกล้เคียงกัน โดยวิธีวิเคราะห์การถดถอยแบบง่ายมีค่า MAPE น้อยกว่า แต่วิธีการปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเหมาะกับการพยากรณ์ระยะสั้น ดังนั้นการใช้วิธีปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในระยะยาวอาจส่งผลให้การพยากรณ์อาจเกิดความคลาดเคลื่อนมากขึ้นได้ และจากงานวิจัยของ [14] ได้ชี้ว่าในการพยากรณ์ระยะยาว วิเคราะห์การถดถอยแบบง่ายจะมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์การพยากรณ์

t	Y _t	ตัวแบบพยากรณ์		
		วิธีค่าเฉลี่ย แบบตรงตัว	วิธีการ ปรับเรียบแบบ เอ็กซ์โพเนนเชียล	วิธีวิเคราะห์ การถดถอย แบบง่าย
1	33	-	-	27
2	23	33	33	27
3	29	23	25	27
4	28	29	28	28
5	26	28	28	28
6	20	26	26	28
7	25	20	21	29
8	32	25	24	29
9	37	32	30	30
10	29	37	36	30

ตารางที่ 5 ค่า MAPE ของแต่ละตัวแบบพยากรณ์

ตัวแบบพยากรณ์	MAPE
ค่าเฉลี่ยแบบตรงตัว	21%
ปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล	20%
วิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย	14%

ตารางที่ 6 ผลการพยากรณ์ความต้องการอาวุธ SAM

ปีที่	ค่าพยากรณ์ความต้องการอาวุธ SAM (นัด)
$p + 1$	30
$p + 2$	31
$p + 3$	31
$p + 4$	31
$p + 5$	32
$p + 6$	32
$p + 7$	33
$p + 8$	33
$p + 9$	33
$p + 10$	34

จากเหตุผลดังกล่าว ผู้วิจัยจึงเลือกวิธีวิเคราะห์การถดถอยแบบง่ายซึ่งมีค่า MAPE น้อยกว่า และสามารถทำการพยากรณ์ล่วงหน้าได้ในระยะกลางถึงยาว โดยขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่า t (ค่า t คือ จำนวนปีล่วงหน้าที่ต้องการพยากรณ์) โดยตารางที่ 6 ได้แสดงผลการพยากรณ์ความต้องการอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยแบบง่าย โดยเป็นการพยากรณ์ในอีก 10 ปี นับจากปีปัจจุบัน p ซึ่งจะได้ว่าค่าพยากรณ์ในการที่จะจัดซื้ออาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM มาเตรียมไว้ใช้ในการตอบสนองภารกิจการฝึกของกองทัพบกประเทศข. และเพื่อให้จำนวนอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM สำหรับสำรองสงครามเป็นไปตามนโยบายของกองทัพบกตามที่กำหนดไว้ในสถานการณ์สมมติ

ตารางที่ 7 แผนความต้องการอุปถัมภ์นำวิธีผ่านสู่ภาค SAM

จำนวน คงคลัง ปัจจุบัน	จำนวนที่ ต้อง สำรองไว้	ชนิดของ อาวุธนำ วิถี	รายการ	ปี										
				p	p + 1	p + 2	p + 3	p + 4	p + 5	p + 6	p + 7	p + 8	p + 9	p + 10
375	400	SAM	จำนวนที่ ต้องสำรอง ไว้	400	396	366	335	304	323	341	359	376	393	400
ความ														
			ต้องการ ขั้นต้น	29	30	31	31	31	31	32	32	33	33	34
จำนวนที่														
			ได้รับตาม กำหนดเวลา	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
จำนวนที่														
			นำไปใช้ ฝึกได้	25	-	-	-	-	-	-	-	-	10	16
ความ														
			ต้องการจาก เบิกจากคลัง สำรอง	4	34	65	96	77	59	41	24	7	0	0
แผนกำหนด														
			การรับ ของที่ส่ง	-	-	-	-	50	50	50	50	50	50	50
แผนกำหนด														
			การส่งของ	50	50	50	50	50	50	50	-	-	-	-

หลังจากทราบจำนวนความต้องการของอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM แล้ว ผู้วิจัยได้นำข้อมูลการพยากรณ์ไปวางแผนการจัดซื้ออาวุธได้ โดยมีเงื่อนไขการจัดซื้อว่าเริ่มตั้งแต่เสนอความต้องการจนกระทั่งได้รับอาวุธจะต้องใช้เวลาดำเนินการ 4 ปี ซึ่งสามารถแสดงเป็นตารางความต้องการวัสดุ (MRP) ซึ่งเป็นแผนการจัดซื้ออาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ตามที่แสดงในตารางที่ 7 ซึ่งแผนการจัดซื้อนั้น จะเห็นว่าในปี p ถึง $p + 3$ มีความจำเป็นที่จะต้องนำอาวุธสำรองสงครามมาใช้ทุกปี จนกระทั่งในปี $p + 4$ จะได้รับอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM และจะต้องทำการสั่งในทุกปี ปีละ 50 นัด ดังจะเห็นได้ว่าในแต่ละปีความต้องการเบิกอาวุธจากคลังสำรองจะเพิ่มขึ้น เพราะมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ในการฝึกทุกปี ไม่สามารถที่จะงดการฝึกได้ ทำให้อาวุธสำรองสงครามที่คงคลังไว้มีจำนวนลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งปี $p + 4$ อัตราสำรองสงครามจะเพิ่มขึ้นจากการสั่งอาวุธเข้ามาและได้รับเข้ามาในแต่ละปี และกระทั่งปี $p + 10$ อาวุธสำรองสงครามก็จะคงที่ที่จำนวน 400 นัด เนื่องจากเมื่ออาวุธสำรองสงครามอยู่ที่ 400 นัดแล้ว จะมีอาวุธที่เหลือจากการใช้ในความต้องกัณฑ์ขึ้นต้น เป็นปริมาณที่สามารถนำมาใช้ได้ในปี $p + 10$ ทำให้ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องนำอาวุธในคลังสำรองสงครามมาใช้หลังจากปี $p + 10$ เป็นต้นไป ทำให้อัตราสำรองสงครามนั้นไม่ขาดแคลนอีกต่อไป

7. อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

งานวิจัยทำให้ทราบถึงจำนวนความต้องการใช้ในการฝึกและการสามารถวางแผนการจัดซื้ออาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้งาน และสามารถรักษ้อัตราสำรองสงครามตามที่กองทัพของประเทศ ก. ได้กำหนดเอาไว้ 30 วัน เป็นจำนวน 400 นัด ซึ่งผลการวิจัยสรุปดังต่อไปนี้

ตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 คือเพื่อหาตัวแบบการพยากรณ์ที่เหมาะสมและพยากรณ์ความต้องการการใช้อาวุธปล่อยนำวิถีจากพื้นสู่อากาศในอนาคต สรุปได้ว่า

ในขั้นการพยากรณ์ความต้องการอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ของกองทัพประเทศ ก. ในอีก 10 ปีข้างหน้า นั้น จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่จำลองขึ้น โดยใช้ตัวแบบการพยากรณ์ 3 แบบ คือ การพยากรณ์ค่าเฉลี่ยแบบตรงตัว การพยากรณ์ด้วยวิธีการปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และการพยากรณ์แบบการวิเคราะห์การถดถอยแบบง่าย ผลจากการดำเนินงานวิจัยได้พบว่าตัวแบบพยากรณ์การวิเคราะห์การถดถอยแบบง่ายมีคุณสมบัติในการพยากรณ์ระยะยาว และจากการทดลองมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ยที่อยู่ในระดับดี จึงนำผลการพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบพยากรณ์การวิเคราะห์การถดถอยแบบง่าย ไปใช้ในการสร้างตาราง MRP เพื่อสร้างแผนการจัดซื้ออาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM

ตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 คือเพื่อประยุกต์ใช้ตารางการวางแผนความต้องการวัสดุในการวางแผนการจัดซื้อจัดหาอาวุธปล่อยนำวิถีจากพื้นสู่อากาศ SAM ให้เพียงพอต่อนโยบายคงคลังอาวุธยุทธโปกรณ์สำรองสงครามของประเทศ ก. ซึ่งได้ผลสรุปว่า จากค่าพยากรณ์จำนวนความต้องการอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ตั้งแต่ปีปัจจุบัน p จนถึงปี $p + 10$ ทำให้ประเทศ ก. สามารถวางแผนการจัดซื้ออาวุธปล่อยนำวิถีจากพื้นสู่อากาศ SAM ในรูปแบบของตาราง MRP ซึ่งตารางการวางแผนความต้องการวัสดุ อาวุธปล่อยนำวิถีจากพื้นสู่อากาศ SAM ที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ปีปัจจุบัน p มีความต้องการอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM จำนวน 29 นัด และนำผลการพยากรณ์ความต้องการอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ในอนาคต (ดังแสดงตามตารางที่ 6) มาวางแผนการจัดซื้ออาวุธเพื่อใช้ในการฝึกและให้เพียงพอต่ออัตราสำรองสงคราม 30 วัน เป็นจำนวน 400 นัด โดยในปี p ถึง $p + 6$ ทำการสั่งซื้ออาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ปีละ 50 จะทำให้ได้อาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM มาในปี $p + 4$ ถึง $p + 10$ ปีละ 50 นัด ดังนั้นจะใช้ระยะเวลา 10 ปี คือ ตั้งแต่ปี p ถึง $p + 9$ กองทัพประเทศ ก. ถึงจะมี

อาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM เพียงพอที่จะนำไปใช้ในการกิจการฝึก โดยไม่กระทบจำนวนสำรองสงครามตามกำหนด นั่นหมายถึงกองทัพดังกล่าวจะมีอาวุธเพียงพอกับอัตราสำรองสงคราม 30 วัน เป็นจำนวน 400 นัด และสามารถที่จะนำอาวุธปล่อยนำวิถีพื้นสู่อากาศ SAM ไปใช้ในการกิจการฝึกได้โดยไม่กระทบกระเทือนต่ออัตราสำรองสงครามอีกด้วย

8. ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาในสถานการณ์สมมติทางทหารนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนการจัดซื้อจัดหาอาวุธยุทโธปกรณ์ของเหล่าทัพหรือกองทัพไทยเพื่อคงคลังอัตราสำรองสงครามของอาวุธยุทโธปกรณ์ที่อาจมีการปรับเปลี่ยนตามนโยบายในอนาคตที่ขึ้นอยู่กับสถานการณ์โลกหรือภูมิภาค โดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการพยากรณ์ร่วมกับเทคนิคการวางแผนความต้องการวัสดุ โดยอาจเปลี่ยนตัวแปรในกระบวนการวิจัย เช่น การหาตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสม หรือตัวแปรเงื่อนไขในการจัดซื้อจัดหาอาวุธยุทโธปกรณ์ประเภทอื่นๆ

ข้อเสนอแนะในงานวิจัยครั้งต่อไปคือ แนะนำควรต้องมีการพิจารณาสัมประสิทธิ์สหพันธ์ (Correlation coefficient) ระหว่างตัวแปรความต้องการอาวุธยุทโธปกรณ์กับตัวแปรระยะเวลา เพื่อหาระดับความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองว่ามีความสัมพันธ์กันมากหรือน้อยเพียงใด เพื่อนำมาร่วมใช้ในการหาตัวแบบการพยากรณ์ที่เหมาะสมต่อไป

9. บรรณานุกรม

- (1) สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน). (2558). บทบาทของเทคโนโลยีในการป้องกันประเทศ 1 (Online). Available: <http://www.dti.or.th/download/file/710ff4eb.pdf>
- (2) พลตรี ยุทธนาสินธุ์ ศรีนัฐนเดชา, "ยุทธศาสตร์ทหาร & ยุทธศาสตร์ปฏิบัติการ," วารสารสถาบันวิชาการป้องกันประเทศ, 2557, 1-10.
- (3) บดินทร์ สันทัด, "การประยุกต์แนวคิดการแข่งขันสะสมอาวุธของ Samuel Huntington เพื่อวิเคราะห์ความมั่นคงระหว่างประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้," วารสารสถาบันวิชาการป้องกันประเทศ, 2560, 1-18.
- (4) A. Salikha. (2018). Latest: Southeast Asian Countries' Military Expenditure (Online). Available: <https://seasia.co/2018/05/04/latest-southeast-asian-countries-military-expenditure>
- (5) สมกมล เดิมวิวัฒน์, ดร.พัชร์ ลวงกุล, ดร.สุภูมิรัฐ สาริบุตร, ดร.มานวิภา อินทรทัต, "ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกซื้อเครื่องบินรบสมรรถนะสูง กริฟเพน ยาส-39 ซี/ดี ของกองทัพอากาศไทย," วารสารคณาภิวัตน์ทางสังคมศาสตร์ (ฉบับมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์), 2558, 2-30.
- (6) U.S. Department of Defence. (2018). Management of Army and Marine Corps Prepositioned Stocks in U.S. European Command, Report Number DODIG-2018-152. Virginia: Department of Defence (Online). Available: <https://media.defense.gov/2018/Sep/20/2002043032/-1/-1/1/DODIG-2018-152.PDF>
- (7) R. J. Lieberman. (1994). U.S. Army, Europe Pre-Positioning Requirements for War Reserve Material, Report Number 94-189. Virginia: Department of Defence (Online). Available: <https://media.defense.gov/1994/Sep/12/2001714994/-1/-1/1/94-189.pdf>
- (8) K. J. Girardini, C. E. Fan, C. Miller. (2011). What Should Be Stocked in War Reserve? A New Method for Allocating Resources. California: Rand Arroyo Center (Online). Available: https://www.rand.org/pubs/research_briefs/RB9624/index1.html
- (9) Logistics Management Institute. (1972). Identification of War Reserve Stock. Washington D.C.: Department of Defence (Online). Available: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/744712.pdf>
- (10) C. L. Sides. (2004). Overcoming the Sustainment Gap in the Marine Corps War Reserve System. Newport: Joint Military Operations Department (Online). Available: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a422730.pdf>
- (11) รุ่งนภา ศรีประโค. (2557). "การลดปริมาณการขาดแคลนสินค้าโดยใช้เทคนิคการพยากรณ์ กรณีศึกษา บริษัทไอเซิล (ประเทศไทย) จำกัด" วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, 2557.
- (12) กรินทร์ กาญจนานนท์, "การพยากรณ์ทางสถิติ," กรุงเทพฯ: บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2561.
- (13) ปิยะกิจ กิจติตุลาภานนท์, "วิธีการการพยากรณ์ความต้องการปุ๋ยเคมี กรณีศึกษา สหกรณ์การเกษตรชุมตาบง จังหวัดนครสวรรค์" วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำปาง, 2560, 1-89.

- (14) ลักษณะ ฤกษ์เกษม, “การพยากรณ์ความต้องการสินค้าสำหรับการวางแผนการผลิต: กรณีศึกษาการผลิตชุดเสอาด” วารสารปริชาต มหาวิทยาลัยทักษิณ, 2558, 3-291.
- (15) L. Beck, M.S. & Rice, T., “Presidential Popularity and Presidential Vote” Public Opinion, 1982, 4: 53.
- (16) สุกพล ดุรงค์วัฒนา, “การพยากรณ์ทางธุรกิจ,” กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

Assessment of Drought Impacts on Urban Green Areas with the Climatic Drought Index in Nakhonratchasima City, Thailand

Colonel Dr. Pongpun Juntakut

Instructor, Department of Chemistry, Academic Division,

Chulachomklao Royal Military Academy

Prommanee Subdistrict, Mueang District, Nakhon Nayok Province, 26001, Thailand

Corresponding Author. E-mail : Pongpun.ju@crma.ac.th

(Received: August 30, 2019, Accepted: February 3, 2020)

Abstract : The study aimed to assess drought impacts on urban green areas with the climatic drought index in Nakhonratchasima City, Thailand. The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) was used as the climatic drought index in this study. The study investigated and quantified the different responses of urban tree growth to drought events. The results revealed that the frequency of severe drought increased in 2017 and 2018 with the drying trend occurring in most of the study area. These results are useful for ecological assessments and planning management to mitigate the impact of drought on urban green areas. Significantly, this study is helpful to take care of urban trees growth and reduce potential damage to human health caused by air pollution e.g. PM 2.5 in urban areas.

Keywords : Drought, SPEI, Urban green area, Nakhonratchasima

1. Introduction

Droughts are recognized as a complex natural phenomena that impacts on water resources, agriculture, natural ecosystems, and society [1-4]. Recently, due to the change in climate, drought is expected to increase in frequency and severity. Additionally, drought impacts on urban tree and crop development and the yield. As a result, urban trees currently must face on a large range of additional stresses that are less strong or non-existent. This is because climate variabilities and environmental conditions within a city are overall more extreme and harmful to trees and can cause vitality loss and increase mortality risk.

Although many efforts have been made to develop methodologies to assess the drought, it is very difficult to isolate the beginning of a drought, as drought development is slow and very often the drought is not recognized until human activities, or the environment, are affected. Moreover, the effects of a drought can persist over many years after it has ended. In contrast to other extreme events such as floods, which are typically restricted to small regions and well-defined temporal intervals, droughts are difficult to pinpoint in time and space, affecting wide areas over long periods of time.

There are several climatic drought indices that have been developed to monitor, predict, and assess the severity of drought, such as the Palmer Drought Severity Index (PDSI) [5], Standardized Precipitation Index (SPI) [6], Standardized Precipitation Evapotranspiration

Index (SPEI) [7], Vegetation Condition Index (VCI) [8], Effective Drought Index (EDI) [9], Reconnaissance Drought Index (RDI) [10], Soil Moisture Index (SMI) [11], Integrated Surface Drought Index (ISDI) [12], and Multivariate Standardized Drought Index (MSDI) [13] etc. Among these, the PDSI and SPI are the most popular one. The PDSI is based on a simplified water balance equation and requirements are precipitation, moisture supply, runoff and evaporation demand at the surface level. The SPI is based on precipitation anomalies, is easy to estimate and identify different types of drought [6-13]. Currently, the SPEI combines the multi-scalar features and simple calculation of the SPI with the PDSI's sensitivity to changes in evaporation demand caused by temperature fluctuations and trends [7]. The SPEI was developed by Vicente-Serrano et al. [7] and is based on a monthly or weekly climatic water balance (i.e., the difference between precipitation and evapotranspiration). The main advantage of the SPEI is its ability to identify the variability of evapotranspiration and temperature in the drought assessments. It is applicable for monitoring and exploring drought characteristics which reflects the water deficits at different time scales in a global warming context.

The objective of this study is to assess drought impacts on urban green areas with the climatic drought index such as the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) in Nakhonratchasima City, Thailand. The drought disaster risk assessment is provided for the

identification of drought events including duration, intensity, and frequency.

2. Study Area, Data and Methods

2.1 Study Area

The study area is Nakhonratchasima City (NC) as shown Fig. 1. NC site is located in Muang district of Nakhonratchasima province at 14° to 16°N and 101° to 103°E and occupies a total area of 37.5 km² (4.96 and 0.18 percent of Muang district and Nakhonratchasima province) with sea level 174-206 m. NC is far from Bangkok by vehicles about 255 km., by rails about 264 km. NC topography is characterized by most plain, a little slope in eastern direction, low land in the NC north and high land in the southern west. Most of soils are loamy sand. The main river is Lum Ta Klong (the major of Mun river) where flows through the NC north with length about 12 km. Authority of NC comprises of the north adjacent to 3-subdistrict administrative organization (SAO): Muen Wai, Nongkratum and Bankoh, the south adjoining 2- subdistrict municipality and 1 SAO: Nong Phailom, Pho Klang and Nong chabok, the east close to Hau Thale subdistrict municipality, and the west next to 2- SAO and 1 subdistrict municipality: Ban Mai, Suranari and Pru Yai.

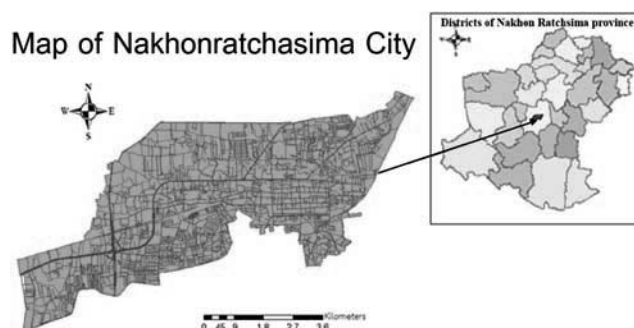


Fig. 1 Area of Nakhonratchasima City

2.2 Data Collection

For this study, climate data including temperature, precipitation, wind speed, specific humidity, and net long-wave surface radiation from Nakhonratchasima Meteorological Observation Station and The Thai Meteorological Department were collected during 2008-2018. Although, the study only used climate data from one weather station in the study area, it is good enough for the assessment of drought impacts because the study area is not large (the total area of 37.5 km²).

2.3 Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

The calculation of the SPEI parameter is a time-series of total monthly precipitation (P) and monthly potential evapotranspiration (PET). Monthly PET is estimated by the Thornthwaite equation [14] that only relies on monthly mean temperature (T) and latitude (L) to calculate the monthly average day length. Of these methods, the Thornthwaite is unique because it is based on an empirical relationship between average monthly temperature and potential evapotranspiration. The details of the SPEI computation,

more thoroughly described in Vicente-Serrano et al. [7], are as follows:

Climate Water Balance

A simple climate water balance was calculated as the differences between precipitation (P) and evapotranspiration (PET) for month j according to:

$$D_j = P_j - PET_j \quad (1)$$

where monthly PET is calculated by:

$$PET = 16K \left(\frac{10T}{I} \right)^m \quad (2)$$

where T is monthly mean temperature ($^{\circ}\text{C}$); I is heat index calculated as the sum of 12 monthly index values; m is the coefficient dependent on I : $m = (6.75 \times 10^{-7} \cdot I^3) - (7.71 \times 10^{-7} \cdot I^2) + (1.79 \times 10^{-2} \cdot I) + 0.492$; and K is a correction coefficient computed as a function of the latitude and month.

The calculated D_j values are aggregated at different time scales, following the same procedure as used for the SPI. The difference $D_{i,j}^k$ in month j and year i depends on the chosen time scale k . For example, the accumulated difference for one month in a particular year i with a 12-month time scale is calculated using:

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=13-k+j}^{12} D_{i-1,l} + \sum_{l=1}^j D_{i,l} \quad \text{for } j < k \quad (3)$$

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=j-k+1}^j D_{i,l} \quad \text{for } j \geq k \quad (4)$$

where $D_{i,l}$ is the $P - PET$ difference in month l and year i , in millimeters.

Normalize the Water Balance

The log-logistic distribution was used for normalizing the D series to obtain the SPEI. The probability density function of a three-parameter log-logistic distributed variable is expressed as:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (5)$$

where α , β , and γ are scale, shape, and origin parameters respective, for D values in the range $(\gamma > D > \infty)$. The parameters of the Pearson III distribution can be obtained from Singh et al. [15]. Thus, the probability distribution function of the D series, according to the log-logistic distribution, is given by:

$$f(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (6)$$

Calculate the SPEI Series

The SPEI can easily be obtained as the standardized values of $F(x)$. Following the classical approximation of Abramowitz and Stegun [16]:

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (7)$$

$$W = \sqrt{-2 \ln(P)} \text{ for } P \leq 0.5 \quad (8)$$

where P is the probability of exceeding a determined D value, $P = 1 - F(x)$. If $P > 0.5$, then P is replaced by $1 - P$ and the sign of the resultant SPEI is reversed. The constants are $C_0 = 2.515517$, $C_1 = 0.8022853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, and $d_3 = 0.001308$.

2.4 Drought Assessments

In this section, the study discusses the method commonly used for assessment and identification of drought properties based on drought indices. Fig. 2 presents a simple plot of a drought variable included: (a) drought magnitude and (b) drought duration. A drought event from the SPEI plot can additionally be identified as drought with the highest severity, drought with the longest duration, and drought with the highest intensity.

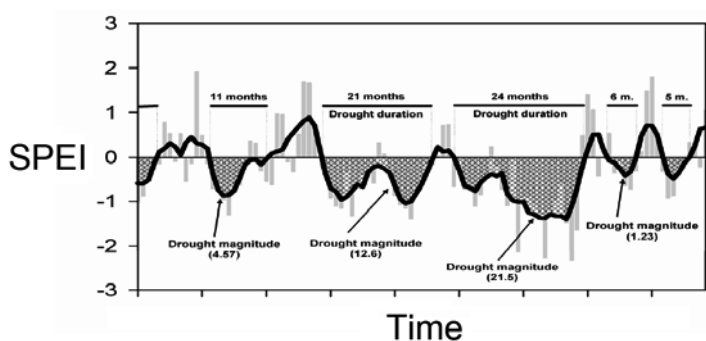


Fig. 2 The characteristics of drought magnitude and duration, modified from [7]

Tab. 1 The classification of drought events based on the SPEI values

Level	Drought Category	SPEI Values
0	Non-drought	$0 \leq \text{Index}$
1	Mild drought	$-1.0 < \text{Index} < 0$
2	Moderate drought	$-1.5 < \text{Index} \leq -1.0$
3	Severe drought	$-2.0 < \text{Index} \leq -1.5$
4	Extreme drought	$\text{Index} \leq -2.0$

2.4.1 Drought Classification

In this study, the goal is to provide some basic data for drought disaster risk assessment. Thus, monthly SPEI values at the variable time scale are used to identify drought events and their related indicators including duration, intensity, and frequency. Tab. 1 presents the classification of drought events based on the SPEI values.

2.4.2 Drought Duration and Intensity

The duration (m) of a drought event equals the number of months between its start and end month [17]. Severity (S_e) is the absolute value of the sum of all SPEI values during a drought event. Intensity (DI_e) of a drought event refers to severity divided by duration. The larger the DI_e value is, the more severe the drought. The formulas are:

$$S_e = \left| \sum_{j=1}^m \text{Index}_j \right|_e \quad (9)$$

$$DI_e = \frac{S_e}{m} \quad (10)$$

where e is a drought event; j is a month; $Index_j$ is the SPEI value in month j ; m , S_e and DI_e are the duration, severity, and intensity of a drought event e , respectively.

2.4.3 Drought Frequency

Drought frequency (F_s) was used to assess the drought liability during a study period [3]. It is calculated by:

$$F_s = \frac{n_s}{N_s} \times 100\% \quad (11)$$

where n_s is number of drought events, N_s is total number of years for the study period, and s is a station.

3. Results

3.1 Evapotranspiration

Fig. 3 shows the result of evapotranspiration (ET) during 2008 to 2018 in NC based on Thornthwaite equation. From last 3 years (2016-2018), there was a higher trend of ET. In 2010, 2011, 2013, and 2015, it was lower ET in the study area.

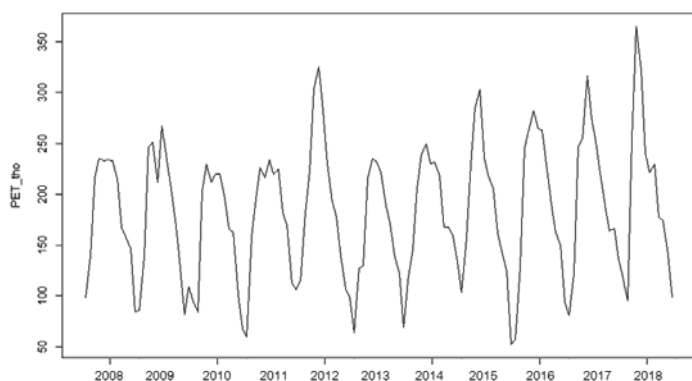


Fig. 3 Estimated ET values during 2008-2018 based on Thornthwaite equation

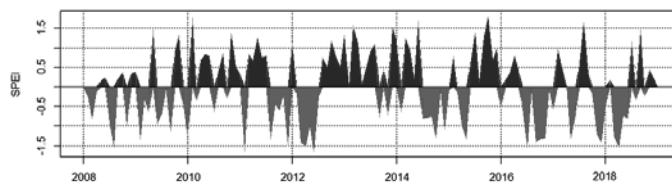


Fig. 4 Estimated SPEI values at the 1-month time scale

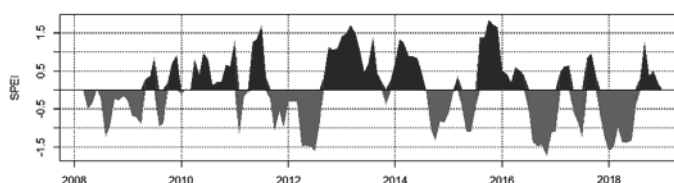


Fig. 5 Estimated SPEI values at the 3-month time scale

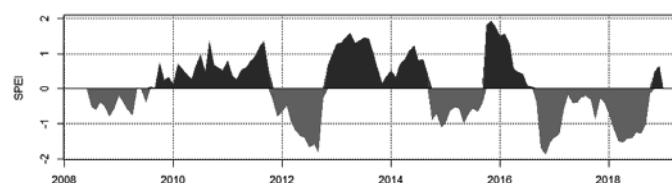


Fig. 6 Estimated SPEI values at the 6-month time scale

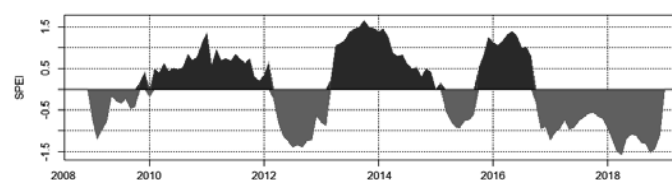


Fig. 7 Estimated SPEI values at the 12-month time scale

Tab. 2 The results of SPEI calculation at 12-month time scale

Year	Month	Max. SPEI	Drought Category
2008	November	-1.2	Moderate
2009	May	-0.5	drought
2010	October	+0.7	Mild drought
2011	February	+1.4	Non-drought
2012	June	-1.4	Non-drought
2013	October	+1.7	Moderate
2014	February	+1.5	drought
2015	June	-1.0	Non-drought
2016	May	+1.5	Non-drought
2017	January	-1.2	Moderate
2018	April	-1.6	drought
			Non-drought
			Moderate
			drought
			Severe drought

3.2 SPEI for Drought Assessment

Fig. 4-7 show the annual SPEI values at the variation of time scale including 1, 3, 6, and 12 months, respectively. From Fig. 7 (at 12-month time scale), the results briefly show that severe drought ($-2.0 < \text{Index} \leq -1.5$) occurred in year 2013 and 2018. For moderate drought ($-1.5 < \text{Index} \leq -1.0$), it was found in year 2009, 2015 and 2017. Non-drought or wet condition occurred for 3 years included 2011, 2014 and 2016. Tab.

2 also more clearly presents the results of SPEI calculation at 12-month time scale. For Fig. 4-6, it identified more details of drought events depended on the time scale.

4. Conclusions and Recommendations

The SPEI was used as the climatic drought index in this study. The results revealed that the frequency and extension of severe drought has recently increased in 2017 and 2018 with the drying trend occurring in the study area. These results informed for NC people to realize the impact of intensive drought on urban green areas.

For further research, the study will collect and run a model with longer period data of 30-50 years. Additionally, the study will run the model in more similar study areas for the comparison of the results and predict a future drought trending.

5. Acknowledgements

This study was an extension of the project of Applied Geo-Informatics Technology to Urban Green Space Management on Role of Stormwater Runoff Reducing and Increasing of Subsurface Water in Nakhonratchasima City Municipality supported and published by the Rajamangala University of Technology in 2017. The author was a co-researcher of this project.

6. References

- (1) T. Chen, W. G. R. Van Der Werf, R. A. M. De Jeu, G. Wang, A. J. Dolman, "A global analysis of the impact of drought on net primary productivity," *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, pp. 3885–3894, 2013.
- (2) Z. X. Zhang, X. Chen, C. Y. Xu, Y. Hong, J. Hardy, Z. H. Sun, "Examining the influence of river-lake interaction on the drought and water resources in the Poyang Lake basin," *J. Hydrol.* vol. 522, pp. 510–521, 2015.
- (3) Q. F. Wang, J. J. Wu, T. J. Lei, B. He, Z. T. Wu, M. Liu, X. Y. Mo, G. P. Geng, X. H. Li, H. K. Zhou, "Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale," *Quat. Int.* vol. 349, pp. 10–21, 2014.
- (4) J. J. Wang, Y. B. Meng, "An analysis of the drought in Yunnan, China, from a perspective of society drought severity," *Nat. Hazards*, vol. 67, pp. 431–458, 2013.
- (5) W. C. Palmer, "Meteorological Drought" White R.M., Ed.; U.S. Weather Bureau, Washington, DC, USA, 1965.
- (6) T. B. McKee, N. J. Doesken, J. Kleist, "The relationship of drought frequency and duration to time scales," In *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Boston, MA, USA, 17–22 January, 17–22, 1993, pp. 179–184.
- (7) S. M. Vicente-Serrano, S. Begueria, J. I. Lopez-Moreno, (2010). "A multiscalar drought index sensitive to global warming," *The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. J. Clim.* Vol. 23, pp. 1696–1718, 2010.
- (8) F. N. Kogan, "Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data," *Am. Meteorol. Soc.*, vol. 76, pp. 655–668, 1995.
- (9) H. R. Byun, D. A. Wilhite, "Daily quantification of drought severity and duration," *J. Clim.* Vol. 5, pp. 1181–1201, 1996.
- (10) G. Tsakiris, D. Pangalou, H. Vangelis, "Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI)," *Water Resour. Manag.*, vol. 21, pp. 821–833, 2007.
- (11) W. H. Nam, J. Y. Choi, S. H. Yoo, M. W. Jang, "A decision support system for agricultural drought management using risk assessment," *Paddy Water Environ.*, Vol. 10, pp. 197–207, 2012.
- (12) J. J. Wu, L. Zhou, M. Liu, J. Zhang, S. Leng, C. Y. Diao, "Establishing and assessing the Integrated Surface Drought Index (ISDI) for agricultural drought monitoring in mid-eastern China," *Int. J. Appl. Earth Obs.*, Vol. 23, pp. 397–410, 2013.
- (13) Z. C. Hao, A. AghaKouchak, "Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model. *Adv. Water Resour.* Vol. 57, pp. 12–18, 2013.
- (14) C. W. Thornthwaite, "An approach toward a rational classification of climate," *Geogr. Rev.*, vol. 38, pp. 55–94, 1948.
- (15) V. P. Singh, H. Guo, F. X. Yu, "Parameter estimation for 3-parameter log-logistic distribution (LLD3) by Pome," *Stoch. Hydrol. Hydraul.* vol. 7, pp. 163–177, 1993.
- (16) M. Abramowitz, I. A. Stegun, "Handbook of Mathematical Functions" With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables; Dover Publications: Mineola, NY, USA, 1965.
- (17) J. Spinoni, G. Naumann, H. Carrao, P. Barbosa, J. Vogt, "World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010," *Int. J. Climatol.* Vol. 34, pp. 2792–2804, 2014.

Study on Pre-Weakening Pattern and Behavior of $\frac{1}{4}$ Scale Steel Structure under Blasting Demolition

Lieutenant Colonel Peerasak Aemlaor*
Captain Kitsada Sripheon

*Instructor, Department of Civil Engineering, Education Section, Academic Division,
Chulachomklao Royal Military Academy, Prommanee Subdistrict, Mueang District, Nakhon
Nayok Province, 26001, Thailand*

**Corresponding Author: peerasak.ae@crma.ac.th*

(Received: August 30, 2020, Accepted: February 7, 2020)

Abstract : Blasting demolition which is the method to raze buildings with small amount of explosive is one of the most efficient methods to take down high rise structures. However, only limited research information is available at the moment while the demand for demolition is rising. Therefore, this study is aims to point out proper patterns of pre-weakening structural steel members and amount of C-4 and also study the behaviour of steel structures under blasting demolition. In the study, firstly several candidate plastic hinge sections are tested and compared to efficiently reduce structural strength in order to minimize the amount of the explosive consumption in the demolition. Then secondly, the appropriate amount of C-4 explosive is determined through blasting test. Finally, a purpose-build $\frac{1}{4}$ scale steel structure is applied the method. The collapse of the structure is designed using analysis program and actual tests are carried out. The results show that the steel structure can be demolished by C-4 explosive through appropriate pre-weakening pattern, amount of C-4 explosive and structure collapse design.

Keywords : Blasting Demolition, Steel Structure, Pre-weakening, Pre-treatment, C-4 Explosive

1. Introduction

During these recent years, demand for building demolition has been increasing due to end of service lifetime, change of purposes, etc. [1]. Blasting demolition, the method to initiate collapse of building using small amount of explosive, has become a popular method in many countries in Europe and America [2] because of its short period of operation, less required number of heavy machines, cost and time savings [1], [3].

However, there is only limited research on blasting demolition of steel frame structure which is one of most difficult structures to demolish [4]. This study therefore, aims at establishing basic data required in steel structure demolition. Concretely, the objectives are to find proper amount of C-4 explosive for H-beam, to propose proper preweakening pattern for H-beam and finally to propose the method to design structure collapse and demolish ¼ scale steel structure.

2. Test Program

2.1 Test Specimen

Sections and dimension of SS400 steel H-beams tested in this study are shown in Fig. 1 and Table 1.

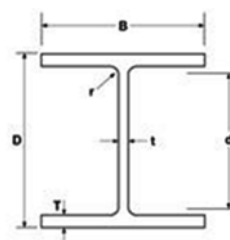


Fig. 1 H-Beam cross section

Table 1 Dimensions of H-beams

Section (mmxmm)	D (mm)	B (mm)	t (mm)	T (mm)	r (mm)
H 100 x 50	100	50	5	7	8

2.2 Explosive

Despite the popularity of commercial explosives such as dynamites and water-gels [4], C-4 explosive has been used in this study because of its stability, safety as C-4 is very stable to many sorts of physical impacts and barely explodes without explosive shocks. Another advantage of C-4 is its ease of forming as C-4 can be formed into required shapes easily. To sever steel structural members, the size of C4 explosive ribbon charge can be determined using the following equation. However, its thickness should not be less than half an inch [5].

$$C_T = 0.5S_T \quad (1)$$

$$C_W = kC_T \quad (2)$$

$$C_L = S_L \quad (3)$$

where CT : charge thickness (mm), ST : target steel thickness (mm), CW : charge width (mm), k : Coefficient, CL : charge Length (mm), SL : target length (mm). The coefficient k is recommended by US Army Engineering School to be equal to 3 [5].

2.3 Blasting Test and Bending

Test In blasting test, Coefficient k was the varied from 1 to 3 with the same density of approximately 1.57 g/cm^3 as shown in Table 2. C-4 explosive charges were installed on one side in contact with Hbeam. The beam's flanges on blasting side were cut off and ones on the other side were performed slit cuts in order to decline explosive amount. Fig. 2 shows the beam blasting test setup.

Table 2 Blasting Test Case Details

Case	Coeff. k	Explosive Thickness (mm)	Explosive Length (mm)	Explosive Width (mm)	Density (g/cm^3)
1	1	13	152	12.7	1.57
2	2	13	152	25.4	1.57

To reduce the amount of explosive in blasting demolition, which leads to decreasing disturbance to surroundings, proper pre-weakening patterns should be employed. Therefore here, 2 types of pre-weakening are applied on the beams to compare their effectiveness. Firstly, type 1 has V- cut on one side of its flange and slit cuts on the flanges on the other side. The V-cut has 90 degree with its trench bottom on beam web. V-cut height is 22.5 mm. Slit cut on

the other side of beam flange is 22.5 mm long as shown in Fig. 3 (a). Moreover, in type 2 to further reduce beam strength, a 6.5 mm slit cut was placed on beam web in between above two cuts as shown in Fig. 3 (b).

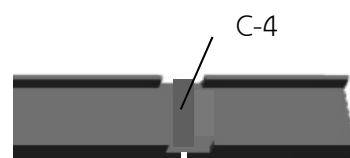
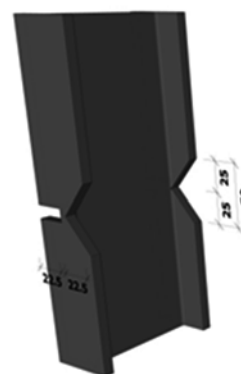
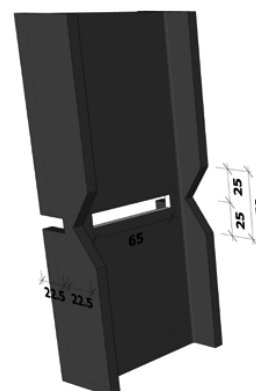


Fig. 2 Blasting test setup



(a) Type 1 V-cut on one side and slit cut on the other side of the beam



(b) Type 2 V-cut on one side, slit cut on the other side of beam and slit cut on web

Fig. 3 Pre-weakened Sections of H-beams

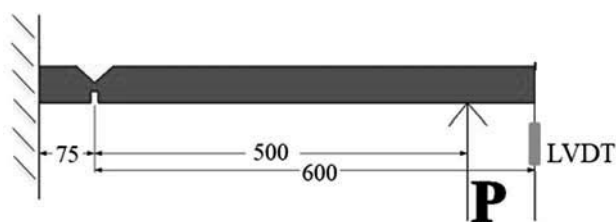


Fig. 4 Cantilever bending test (Unit: mm)

To evaluate patterns of pre-weakening assuming actual conditions, each pattern was performed cantilever bending test as depicted in Fig. 4. Then the bending strength of each pattern was compared to select the most appropriate pre-weakening pattern for structure blasting test.

3. Test result and discussion

3.1 Minimum Required Explosive Amount

Figure 5 shows the damage of the H-beams with coefficient k value of 1 and 2. When the k equaled to 1, the beam had a dent on it without severe damage as shown in Fig. 5 (a). However, when k equaled to 2 the beam was severed into 2 pieces completely. The damage when k equaled to 2 is shown in Figure 5 (b). As a result, it could be concluded that the coefficient k can be reduced to 2 to reduced required amount of C-4 explosive.



(a) When $k=1$



(b) When $k=2$

Fig. 5 Damage of H-Beams with different k Values

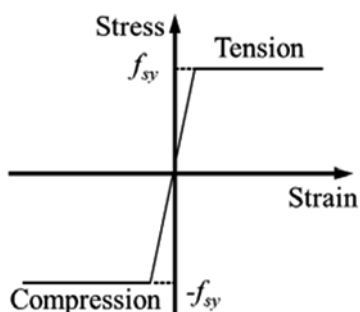
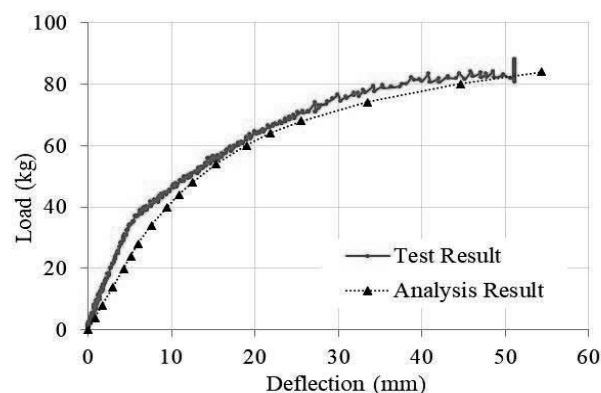
3.2 Pre-weakened section analytic estimation

Table 3 shows flexural resistance of each preweakening pattern and non-weakening one. Preweakening Type-1 and Type-2 had flexural resistance of 41.6 and 35.1 kN.m, respectively. It can be seen that both Type-1 and 2 of pre-weakening pattern could reduce flexural resistance of H-beam from none pre-weakening significantly to 21.3% and 18.0% as shown in Table 3.

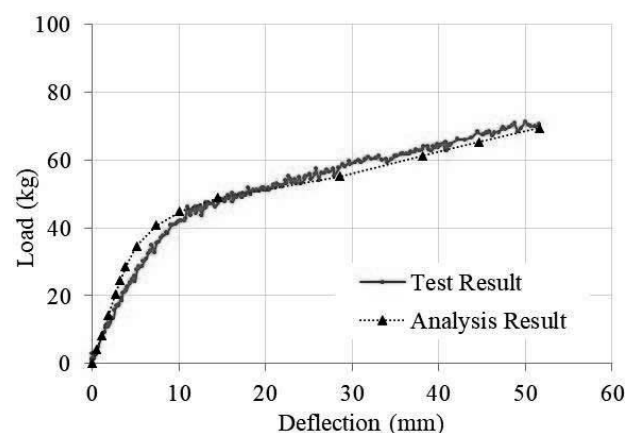
Table 3 Flexural resistance of each pre-weakening pattern

Type	Flexural Resistance (kN.m)	Residual Flexural Resistance Ratio (%)
Control	195	100
1	41.6	21.3
2	35.1	18.0

As estimation of residual flexural resistance is essential when designing blasting collapse of steel structure, the ultimate flexural resistance of each pre-weakening pattern was analyzed through FEM. In the analysis, an elastic perfectly plastic model was used in stress-strain relationship of steel beam. The picture of the relationship is shown in Fig. 6. Here, the nominate yield strength of SS400 steel was used in the calculation. Calculation results and test results for each pre-weakening pattern are shown in Fig. 7 in Load-Displacement curves. The analysis results appear to have good agreement with the test results. Thus, it could be said that the flexural resistance of pre-weakened H-beam can be estimated using elastic perfectly plastic model.

**Fig. 6** Stress-strain relationship of SS400 H-beam

(a) Type-1



(b) Type-2

Fig. 7 Comparison of analysis results and test results

3.3 Steel Structure Blasting

To study the behavior of steel structure under blasting demolition, a ¼ scale steel structure was built of SS400 steel H-beams with the same section as blasting test specimens. The structure was threestory steel structure with 1 m width, 1 m length and 0.8 m height in each story. Each floor slab thickness was 10 cm. The picture of the purpose-build structure was as shown in Fig. 8. During determining of collapse pattern and locations of charge and pre-weakening, the design steps shown in Fig. 9 were followed.

Collapse pattern adopted in this study was a pancake type which is a straight down collapsing one. In calculation of required bending moments to initiate razing of the structure after blasting SAP2000 was used. Three candidate points of charging locations on columns, upper end, middle and lower end were compared.

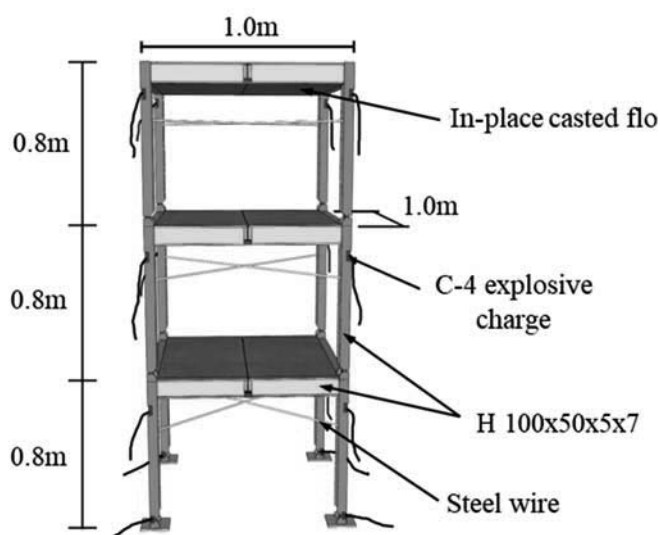


Fig. 8 Structure Blasting Setup

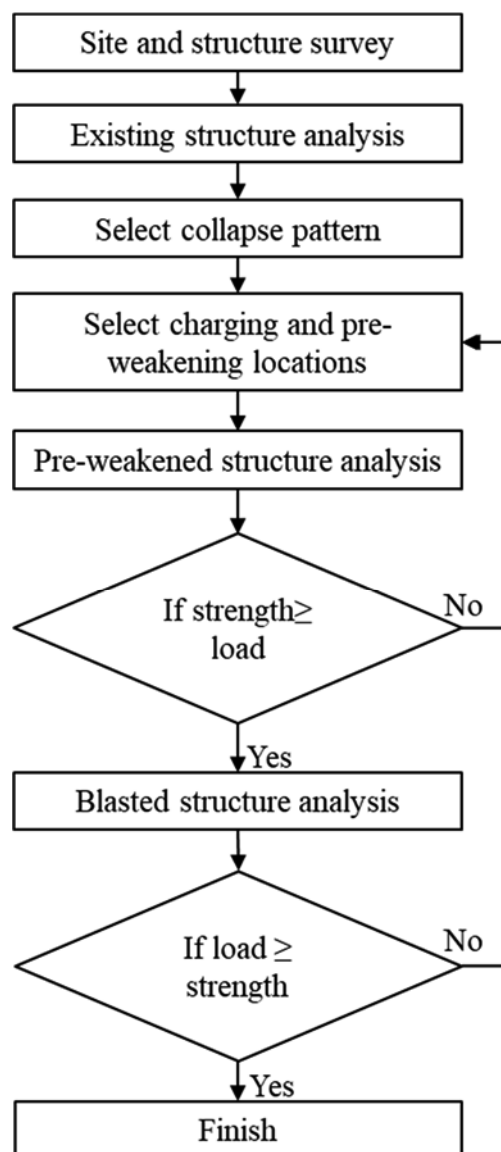
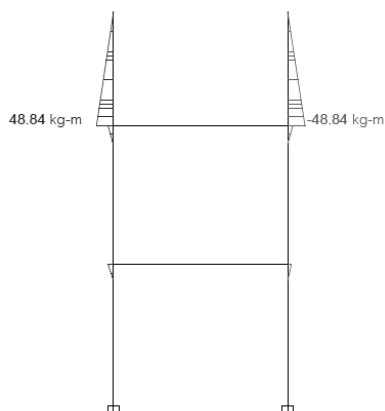
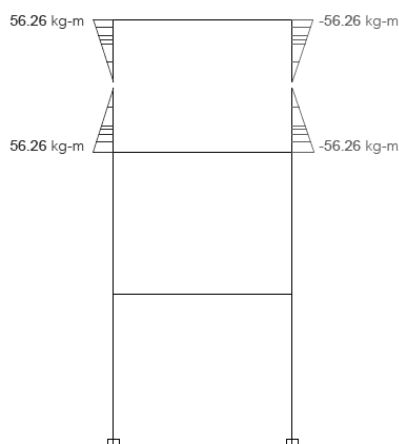


Fig. 9 Blasting demolition design procedure

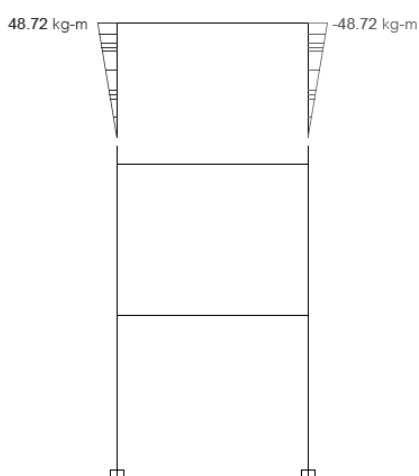
Pre-weakening pattern used in the analysis was the Type-2, the weakest one. V-cuts on inner side, slit cut on outer side and web at column lower ends were applied on each level to allow bending of columns. The analysis results shown in Fig. 10 elucidated that blasting at upper or lower ends of columns required similarly small bending moment of around 49 kgf.m to bend each columns.



(a) When blasting at the upper ends



(b) When blasting at the middle



(c) When blasting at the lower ends

Fig. 10 Analytic results of each blasting point

Nonetheless, blasting at the middle of columns needs more than two times larger force to bend columns. In $\frac{1}{4}$ scale steel structure blasting here, beside applying Type-2 of pre-weakening pattern on the structure, the upper end of each column was cut its flanges at outer side, the same pattern as blasting test. Moreover, steel wires were installed at the upper end of columns in each level and floor slabs were cut into two pieces at the middle to utilize floor slab weight in generating sufficient bending moments. To initiate collapse of the structure, a dozen of C-4 explosive charges are placed on column upper ends in each level. However, the lower ends of columns at level 1 are also placed the charges to ensure the collapse of the structure. In order to create sufficient bending moments on columns lower ends, additional 6 charges are placed at the middle of each front and back beam to release the potential energy of floor weight to pull the steel wires.

The blasting setup is already shown in Fig. 8. After placing 22 C-4 explosive charges at each location, the charges were fired in three steps from top level down to ground level with detonation caps. Firstly, upper ends of columns in level 3 and both front and back upper ceiling beams were fired. Then the same pattern was repeated in level 2. Finally, in level 1 addition to the same pattern as level 2 and 3 the charges at lower ends of 4 columns were also detonated at the same time.



(a) Level 3 detonation



(b) Level 1 detonation



(c) Steel structure after blasting demolition

Fig. 11 Steel structure blasting demolition

Detonation interval time between each level was set at 0.3 second. Fig. 11 (a) to (c) shows detonation in level 3, level 1 and the result after blasting demolition. Although all charges in level 2 and some other charges were not detonated due to malfunction of the detonators, the structure toppled down and the columns that had been blasted were severed from the ground completely with plastic hinges created at pre-weakened point as shown in Fig. 12.



Fig. 12 Bended column with a plastic hinge at lower end

4. Conclusion

1. Pre-weakening of H-beam steel structure with Vcut on inner side, slit cut on outer side with or without beam web slit cut can significantly reduce beam's flexural resistance.

2. Proper amount of C-4 explosive ribbon charge to sever SS400 steel beam completely can be derived by equation (1)-(3) in which k value can be reduced to 2 in case of relatively thin steel plate.

3. Residual flexural resistance of steel columns using H-beams can be calculated using FEM and elastic perfectly plastic model.

4. H-beam steel structure collapse designing procedures were proposed in 3.3 and the steel structure can be demolished using C-4 explosives charges placed in contact to its members along with pre-weakening pattern mentioned in 2.

5. Reference

- (1) K. Uenishi, H. Takahashi, H. Yamachi, S. Sakurai, "PC-based simulations of blasting demolition of RC structures," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 12, pp. 2401-2410, 2010.
- (2) K. Fujikake, P. Aemlaor, "Damage of reinforced concrete columns under demolition blasting," *Engineering Structures*, vol. 55, pp. 116-125, 2013.
- (3) E. K. Lauritzen, J. Schneider, "The role of blasting techniques in the demolition industry," In: Holmberg, editor. *Explosive & Blasting Technique*, Balkema, Rotterdam: pp. 377-87, 2000.
- (4) M. Loizeaux, A. E. N. Osborn, "Progressive collapse-an implosion contractor's stock in trade, *Journal of Performance Constructed Facilities*," ASCE, vol. 20, no. 4, pp. 391-402, 2006.
- (5) US Army Engineer School, FM3-34.214, USA: US Army, pp. 3-14, 2007.

การตรวจลักษณะทางพื้นผิวและธาตุองค์ประกอบในเส้นใยสังเคราะห์และเส้นใยธรรมชาติ
ที่พบในประเทศไทยโดยวิธี Scanning Electron Microscope/
Energy Dispersive X-ray Spectroscopy เพื่อประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์
The Classification of Natural and Synthetic Fibers in Thailand for
Forensic Purpose by Using Surface and Elemental Analysis from Scanning
Electron Microscope/Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พันตำรวจโท ดร.ธิติ มหาเจริญ

Police Lieutenant Colonel Assistant Professor Dr.Thiti Mahacharoen

คณะนิติวิทยาศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยตำรวจ ต.สามพราน อ.สามพราน จ.นครปฐม 73110 ประเทศไทย
Forensic Science faculty, Royal Police Cadet Academy, Nakorn Pathom, 73110, Thailand.

Corresponding Author. E-mail: m_thiti@yahoo.com

(Received: November 12, 2019, Accepted: February 26, 2020)

บทคัดย่อ : การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและจำแนกคุณสมบัติทางเคมีแบบเฉพาะเจาะจงของเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ที่พบในประเทศไทย และนำองค์ประกอบทางเคมีไปใช้ในการเปรียบเทียบคุณลักษณะเฉพาะทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ รวมถึงนำเสนอแนวทางในการพัฒนาการตรวจเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำในงานนิติวิทยาศาสตร์ โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและเครื่องตรวจเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงาน เป็นตัวจำแนกคุณสมบัติทางแสงของเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ เส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ ฝ้าย, ไหม, กัญชง และขนสัตว์ และเส้นใยสังเคราะห์ ได้แก่ ไนลอน, โพลีเอสเตอร์, โมดาไครลิก, อะคริลิก และเรยอน ผลการวิจัยพบว่า เส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ตัวอย่างนั้นมีคุณลักษณะทางพื้นผิวและองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของเส้นใยแต่ละชนิด สามารถนำไปจำแนกและใช้ประโยชน์ในการตรวจพิสูจน์วัตถุพยานประเภทเส้นใยในคดีได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้ในการระบุประเภทของเส้นใยที่พบในสถานที่เกิดเหตุได้

คำสำคัญ : เส้นใยธรรมชาติ เส้นใยสังเคราะห์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด/เครื่องแผ่กระจายรังสีเอ็กซ์

Abstract : This research intend to study the specific classification of natural and synthetic fibers mostly found in Thailand and apply elemental components for comparison of chemical properties of each type of fiber. The development of examination method is proposed in this study as an effective and rapid tool for fiber analysis for forensic purpose. By using Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy as a classification method. Nine fibers are included in this study. The natural fibers are cotton, silk, hemp, wool and synthetic fibers are nylon, polyester, modacrylic, acrylic and rayon. The results show that both natural and synthetic fiber has a unique surface and chemical components which can be applied for forensic examination to identify the type of each fiber. This technique is able to be applied for fiber found in a crime scene and compare the unknown to the known one.

Keywords : Natural Fiber, Synthetic Fiber, SEM/EDS

1. บทนำ

ในปัจจุบันเกิดปัญหาทางด้านอาชญากรรมขึ้นมากมาย การที่จะนำตัวผู้กระทำความผิดมาลงโทษตามกระบวนการยุติธรรมนั้นเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะจะต้องมีการรวบรวมพยานหลักฐานมายืนยันให้สามารถพิสูจน์ความผิดได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกาและประเทศในทวีปยุโรป จึงมีการนำเอาความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีต่างๆ มาพัฒนาใช้ในการตรวจพิสูจน์หลักฐานต่างๆ ให้ได้ผลที่ถูกต้องตามหลักวิทยาศาสตร์ ซึ่งจะเป็นผลอย่างยิ่งในการสืบสวนติดตามหาคนร้ายต่างๆ โดยเฉพาะประเทศญี่ปุ่น เมื่อมีคดีฆาตกรรมเกิดขึ้น สามารถจับกุมคนร้ายได้ถึงร้อยละ 90 โดยการใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี

นิติวิทยาศาสตร์เป็นการนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์ทุกสาขามาประยุกต์ใช้ เพื่อพิสูจน์ข้อเท็จจริงในคดีความเพื่อผลในการบังคับใช้กฎหมายและการลงโทษ เช่น การตรวจสถานที่เกิดเหตุ และการถ่ายรูป (Crime Scene Investigation and Forensic) การตรวจลายนิ้วมือ ฝ่ามือ ฝ่าเท้า (Fingerprint, Palmprint, Footprint) การตรวจเอกสาร (Document) การตรวจอาวุธปืน และกระสุนปืนของกลาง (Forensic Ballistics) การตรวจทางเคมี (Forensic Chemistry) การตรวจทางฟิสิกส์ (Forensic Physics) การตรวจทางชีววิทยา (Biological Trace Evidence) และการตรวจทางนิติเวช (Forensic Medicine) ได้แก่ งานนิติพยาธิ งานนิติวิทยา งานชีวเคมี งานพิสูจน์บุคคล งานภาพทางการแพทย์

การตรวจวัตถุพยานประเภทเส้นใยนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะสามารถพบได้ทั่วไปในที่เกิดเหตุ ซึ่งเส้นใยมีลักษณะที่เล็ก และสามารถถ่ายทอดจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งได้ง่าย แต่ทว่าการนำความรู้ทางด้านจุลทรรศน์วิทยามาใช้กับเส้นใยในงานนิติวิทยาศาสตร์ยังไม่แพร่หลายและยังไม่มีการศึกษาในประเทศไทย ผู้วิจัยจึงให้ความสนใจที่จะได้ศึกษาและทำการทดลองเพื่อสามารถ

นำคุณสมบัติทางแสงและทางเคมีมาใช้ในการระบุประเภทเส้นใยธรรมชาติประเภทต่างๆ ได้

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาและจำแนกคุณสมบัติทางเคมีแบบเฉพาะเจาะจงของเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ที่พบในประเทศไทย

2.2 เพื่อนำองค์ประกอบทางเคมีที่พบในเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ไปใช้ในการตรวจคุณลักษณะเฉพาะทางเคมี เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์

2.3 เพื่อนำเสนอแนวทางในการพัฒนาการตรวจเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำในงานนิติวิทยาศาสตร์

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สายพิน สืบสันติกุล (2549) [1] ศึกษาเรื่อง การศึกษาองค์ประกอบและชนิดของเส้นใยในผ้าเบรกรถยนต์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ประกอบกับ Energy Dispersive Spectrometer เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากภาพถ่ายลักษณะเส้นใยและสเปกตรัมของตัวอย่างกับภาพถ่ายและสเปกตรัมของเส้นใยแอสเบสตอสหลักแต่ละชนิด จากการวิเคราะห์ทดสอบเส้นใยในผ้าเบรกรถยนต์ จำนวน 7 ตัวอย่าง พบว่า มีลักษณะแบนยาวและเป็นท่อนคล้ายท่อซึ่งไม่เหมือนเส้นใยแอสเบสตอสที่เป็นส่วนประกอบของผ้าเบรกรถยนต์โดยทั่วไป เส้นใยเหล่านี้มีธาตุหลักที่เป็นองค์ประกอบ คือ แมกนีเซียม อะลูมิเนียม ซิลิคอน แคลเซียม และเหล็ก คล้ายองค์ประกอบของเส้นใยแอสเบสตอส แต่อัตราส่วนความสูงของพีก (Peak Height) ของธาตุแต่ละธาตุแตกต่างจากเส้นใยแอสเบสตอส และจากการวิเคราะห์ด้วย X-ray Diffraction ไม่พบพีกที่ตรงกับพีกของแอสเบสตอส จึงสรุปได้ว่าเส้นใยที่พบในผ้าเบรกรถยนต์ที่ได้วิเคราะห์ทดสอบไม่ใช่แอสเบสตอส

ส่วนใหญ่เป็นเส้นใยที่มีธาตุเหล็กและไทเทเนียมเป็นองค์ประกอบหลัก ผลจากการศึกษาองค์ประกอบและชนิดของเส้นใยในผ้าเบรกรถยนต์สามารถนำไปเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ทดสอบองค์ประกอบและชนิดของเส้นใยในผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น ผลิตภัณฑ์กระเบื้องมุงหลังคา แผ่นผ้าเตทานเก็บเสียงกันความร้อน ผนึ่งกันห้อง เส้นเชือกฉนวนกันความร้อน และแป้งเด็ก ได้อีกด้วย

จารุวรรณ อัมพฤกษ์ (2555) [2] ศึกษาเรื่อง การวิเคราะห์เส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยสังเคราะห์ในงานทางนิติวิทยาศาสตร์ โดยใช้ผ้าฝ้าย เส้นใยขนุน ผ้าลูกไม้ทำจากผ้าฝ้าย ผ้าป่าน ผ้าลินิน ผ้าโซลอน ผ้าชีฟอง ผ้าเครปซาติน และผ้าไหม ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Attenuated Total Reflectance (ATR-FTIR) จากผลการทดลองพบว่า หมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏใน Spectrum สามารถจำแนกและแบ่งเส้นใยออกได้เป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืช ได้แก่ เส้นใยฝ้าย ป่าน ขุน และลินิน ซึ่ง Spectrum ที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับเซลลูโลส กลุ่มที่สองคือ ผ้าไหม โดย Spectrum ของผ้าไหมตัวอย่างมีพิกของกลุ่มเอไมด์ที่เลขคลื่น 1650 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากสัตว์ และในกลุ่มสุดท้ายเป็นตัวอย่งที่ทำจากเส้นใยสังเคราะห์ซึ่งเห็นได้จากพิกของหมู่เอสเตอร์ที่เลขคลื่น 1735 cm^{-1} ใน Spectrum ของตัวอย่าง ผ้าในกลุ่มนี้คือ ผ้าชีฟอง ผ้าโซลอน และผ้าเครปซาติน ในการศึกษาี้แสดงให้เห็นว่าเทคนิค ATR-FTIR เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบผ้าและเส้นใยทางนิติวิทยาศาสตร์ได้

กรชูลี พนาพิทักษ์กุล และคณะ (2557) [3] ได้ศึกษาการเตรียมและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิสไตรีน/พอลิอะนิลีนโดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต พบว่าจากการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิตของพอลิสไตรีนและพอลิสไตรีน/พอลิอะนิลีนในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟูราน (THF) ที่ความเข้มข้นของพอลิสไตรีน 30% w/w และพอลิสไตรีน 30% w/w ผสมด้วยพอลิอะนิลีน 3, 5 และ 7% w/w โดยใช้ความต่างศักย์ 10 kV ระยะห่างระหว่างปลายเข็ม

และแผ่นรองรับ 20-25 เซนติเมตร อัตราเร็วในการปล่อยสาร 1-2 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง นำเส้นใยที่ผลิตได้ไปสังเกตลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเส้นใยที่ได้ของพอลิสไตรีนมีลักษณะแบนเรียบสม่ำเสมอขนาด 10-20 ไมโครเมตร ส่วนเส้นใยของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน/พอลิอะนิลีนลักษณะเส้นใยที่มีปมผสมอยู่ ขนาดของเส้นใยเล็กลง ปริมาณปมที่เกิดขึ้นอยู่กับร้อยละของพอลิอะนิลีนที่ผสมและเวลาที่ใช้ในการผสมสาร ถ้าใช้เวลาในการผสมพอลิอะนิลีนในสารละลายพอลิสไตรีนนานขึ้นจะทำให้เส้นใยที่ได้มีปมน้อยลงไปมาก แต่ถ้าใช้เวลาในการผสมนานเกินไปสารละลายจะมีความเข้มข้นสูงจนไม่สามารถปั่นเป็นเส้นใยได้

Wanagho และคณะ (1989) [4] ได้ทำการศึกษากการกระจายของอนุภาคดินโดยใช้เทคนิคทางจุลทรรศน์ ซึ่งการวิเคราะห์การกระจายของอนุภาคเป็นเทคนิคที่ต้องใช้ความชำนาญและความเชี่ยวชาญเป็นอย่างสูง แต่สามารถที่จะนำเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยภาพเข้ามาช่วยเพื่อทำให้ขั้นตอนง่ายและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งตัวอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือ ส่วนที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณภาพเป็นสัญญาณไฟฟ้าและส่วนที่ใช้เป็นสัญญาณภาพในเชิงปริมาณได้ซึ่งขนาดของอนุภาคที่ใช้ในการวิเคราะห์จะอยู่ระหว่าง 0.4-150 ไมโครเมตร

Cho และคณะ (2001) [5] ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค ATR เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์เส้นใยโดยเฉพาะเมื่อเส้นใยที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้ทราบสมิซชันสเปคตรัมที่อ่านค่าได้ยาก เทคนิคนี้ สามารถใช้ในการวิเคราะห์เส้นใยเพื่อให้สามารถทราบค่าของเส้นใย เช่น ค่าสปินแอนโทสเดติก หรือ เพอร์มาเนนท์เพรสของเส้นใย ซึ่งพบว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการตรวจเอกลักษณ์ของเส้นใยที่มีประสิทธิภาพ

Houck (2003) [6] ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบวัตถุดิบประเภทเส้นใย ซึ่งได้จากของเพียงหนึ่งชิ้นจากทั้งหมด 20 คติโดยแบ่งเป็น คติปล้นทรัพย์ คติฆาตกรรม

และคดีลักพาตัว โดยใช้เทคนิคทางกล้องจุลทรรศน์ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนส์ และไมโครสเปกโตรมิเตอร์ โดยพบว่าสามารถจำแนกไฟเบอร์ได้โดยแบ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ และใช้คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น สีย้อมและลักษณะทางโพลิมอร์ โดยพบว่าสามารถนำเส้นใยมาใช้ในการจำแนกวัตถุพยานที่แตกต่างกันในแต่ละกรณีได้

Li-Ling Cho (2007) [7] ทำการศึกษา เรื่องการจำแนกชนิดเส้นใยด้วยเทคนิควิธี Raman Microspectroscopy โดยใช้กลุ่มตัวอย่างเส้นใยฝ้าย เรยอน ขนสัตว์ เส้นใยไหม โพลีเอสเตอร์ ไนลอน อะคริลิก และโมดาคไรลิก ซึ่ง วิธี Raman Microspectroscopy ใช้วิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของเส้นใยและสามารถใช้ตรวจวิเคราะห์วัตถุพยานที่มีขนาดเล็กได้ จากผลการทดลองพบว่า เส้นใยแต่ละชนิดจะมี Spectrum แตกต่างกัน โดยเส้นใยที่มีโพลิมอร์ชนิดเดียวกันจะมี Spectrum เป็นแบบเดียวกันถึงแม้ว่าจะมีวิธีการผลิตที่แตกต่างกัน

D. A. Stoney และ P. L. Stoney (2012) [8] ทำการตรวจวิเคราะห์อนุภาคที่มีขนาดเล็ก (Very Small Particles: VSP) ที่ติดอยู่บนพื้นผิวของพรม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเส้นใยไนลอนและมีรูปร่างตัดของเส้นใยเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยใช้ตัวอย่างพรมจำนวน 120 ตัวอย่าง นำมาจากบ้านเรือนที่อยู่อาศัย ที่ทำงาน และรถยนต์ ใช้เทคนิค SEM ในการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา และใช้เทคนิค EDS ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบว่า สามารถจำแนกชนิดของอนุภาคขนาดเล็กที่ติดอยู่บนพรมได้ด้วยเทคนิค SEM/EDS โดยใช้การสกัดตัวอย่างด้วยเอทานอลและกรองด้วย โพลีคาร์บอนเนต ซึ่งการตรวจวิเคราะห์อนุภาคขนาดเล็กบนพรม นั้นได้ถูกนำมาใช้เป็นแนวทางในการตรวจวิเคราะห์วัตถุพยานในกระบวนการยุติธรรม การวิจัยนี้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาการตรวจวัตถุพยานประเภทอื่นๆ ฐานข้อมูลที่ได้จากการตรวจอนุภาคขนาดเล็กบนพรมนั้นสามารถนำไปใช้เปรียบเทียบกับวัตถุพยานที่พบในสถานที่เกิดเหตุได้

4. วิธีดำเนินการศึกษา

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาและจำแนกคุณสมบัติทางเคมีแบบเฉพาะเจาะจงของเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ที่พบในประเทศไทย และนำองค์ประกอบทางเคมีที่พบในเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ไปใช้ในการตรวจคุณลักษณะเฉพาะทางเคมีรวมทั้งนำเสนอแนวทางในการพัฒนาการตรวจเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำในงานนิติวิทยาศาสตร์ โดยใช้ Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDS) รุ่น SU 8230 กลุ่มตัวอย่างเส้นใยที่นำมาวิจัยในครั้งนี้มีทั้งหมด 9 ชนิด ได้แก่ ฝ้าย (Cotton) กัญชง (Hemp) ไหม (Silk) ขนสัตว์ (Wool) ไนลอน (Nylon) โพลีเอสเตอร์ (Polyester) โมดาคไรลิก (Modacrylic) อะคริลิก (Acrylic) และเรยอน (Rayon)

4.1 วิธีการวิจัย

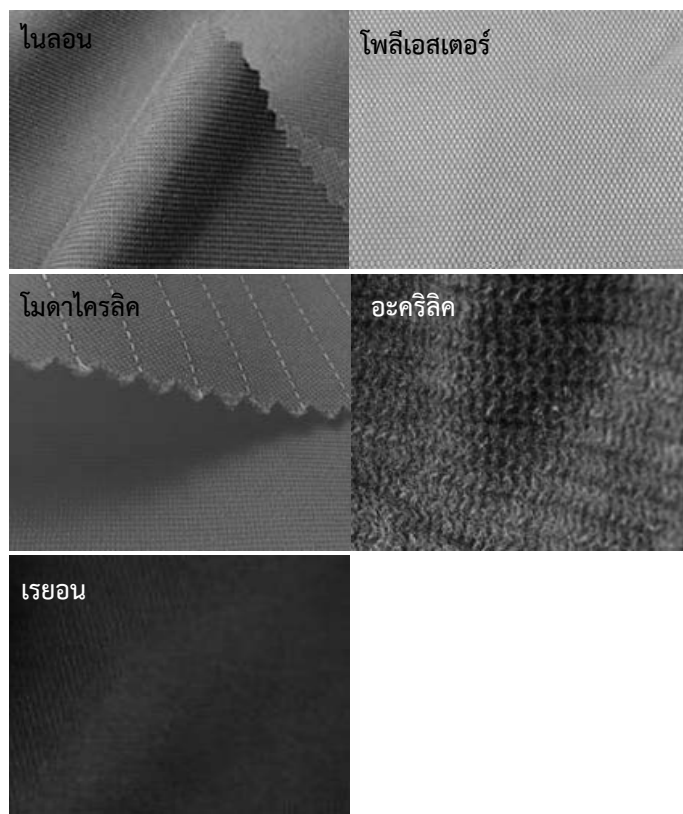
เตรียมตัวอย่างขึ้นทดสอบ โดยตัดชิ้นทดสอบจากผ้าตัวอย่างทั้ง 9 ชนิด ได้แก่ ผ้าที่ผลิตจากเส้นใยฝ้าย ไหม กัญชง ขนสัตว์ ไนลอน โพลีเอสเตอร์ โมดาคไรลิก อะคริลิก และเรยอน ให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 5x5 เซนติเมตร ใช้ปากคีบดึงเส้นใยตัวอย่างออก จำนวน 1 เส้นแล้วติดลงบนแผ่น stub จากนั้นนำไปศึกษาวิเคราะห์ลักษณะเส้นใย ขนาดเส้นใย ชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ และวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบ ด้วยเครื่อง SEM/EDS โดยทำการวัดตัวอย่างละ 5 ซ้ำ



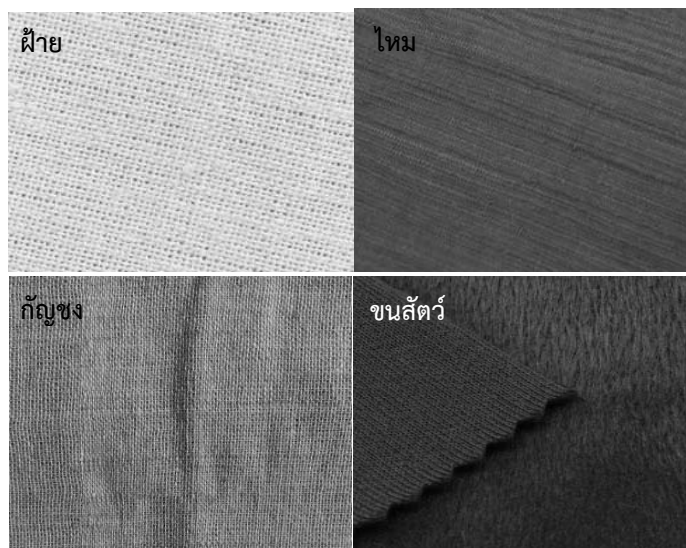
ภาพที่ 1 เครื่อง SEM รุ่น SU 8230

4.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

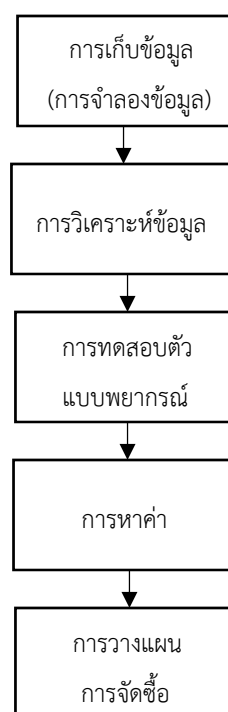
สถิติที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ การวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistic) ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าร้อยละ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เพื่อเปรียบเทียบชนิดและปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยแต่ละชนิด



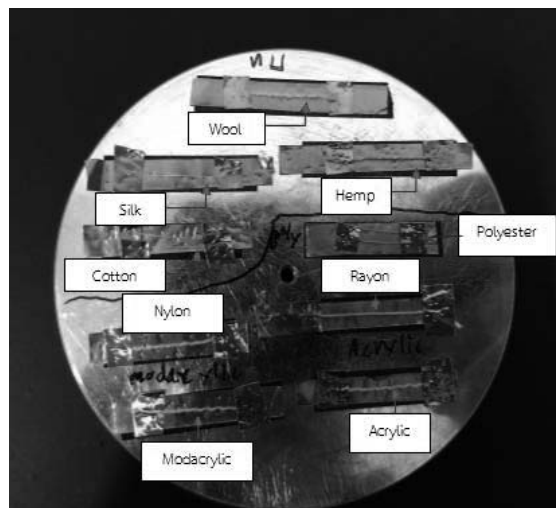
ภาพที่ 3 ตัวอย่างผ้าที่ผลิตจากเส้นใยสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 2 ตัวอย่างผ้าที่ผลิตจากเส้นใยธรรมชาติที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการวิจัย



ภาพที่ 4 การเตรียมเส้นใยตัวอย่างทดสอบ

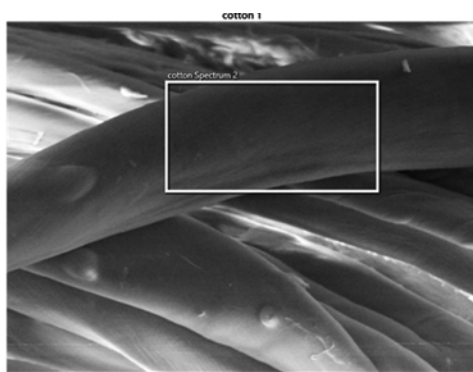
5. ผลการศึกษา

5.1 เส้นใยธรรมชาติ

ในการวิจัยนี้ใช้กลุ่มตัวอย่างเส้นใยธรรมชาติ จำนวน 4 ชนิด ได้แก่ ฝ้าย (Cotton) กัญชง (Hemp) ไหม (Silk) และขนสัตว์ (Wool) เมื่อนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติตัวอย่าง ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope/Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM/EDS) ได้ผลการทดลองดังนี้

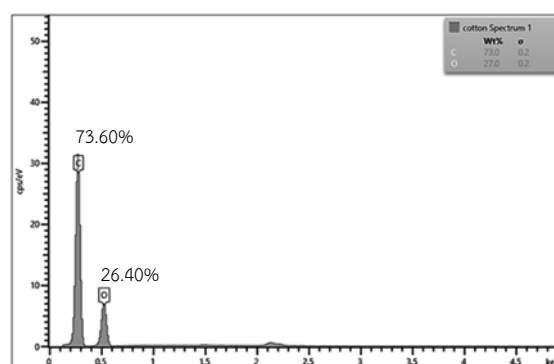
5.1.1 ฝ้าย (Cotton)

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยฝ้าย ด้วยวิธี SEM ได้ผลดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยฝ้ายด้วยวิธี SEM

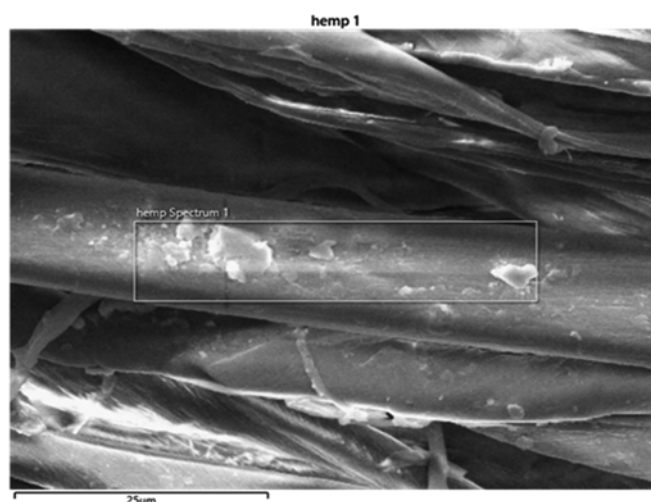
เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้ายตัวอย่างด้วยวิธี EDS พบว่า มีธาตุองค์ประกอบหลัก 2 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) โดยมีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 73.60% และ 26.40% ตามลำดับ และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 1.17 ของทั้ง 2 ธาตุองค์ประกอบ



ภาพที่ 6 สเปกตรัมของธาตุองค์ประกอบของเส้นใยฝ้าย

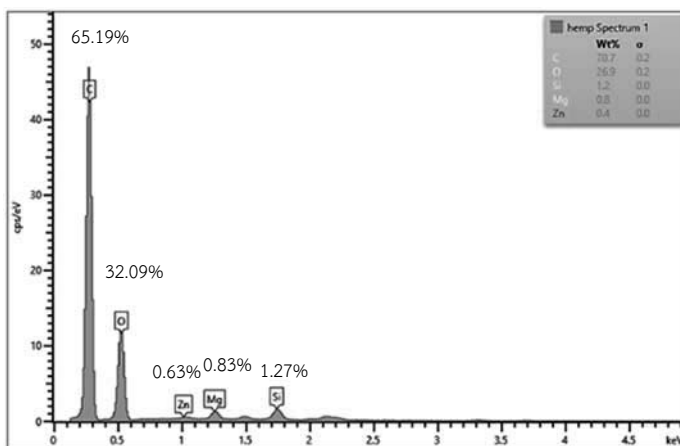
5.1.2 กัญชง (Hemp)

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยกัญชง ด้วยวิธี SEM ได้ผลดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยกัญชงด้วยวิธี SEM

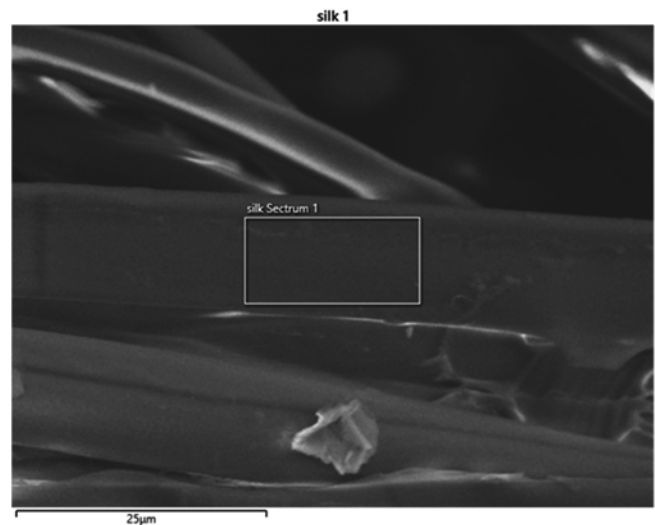
เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยกล้วยตัวอย่างด้วยวิธี EDS พบว่า มีธาตุองค์ประกอบหลัก 5 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 65.19% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 6.76 ออกซิเจน (O) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 32.09% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 6.77 แมกนีเซียม (Mg) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 0.83% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.09 ซิลิกอน (Si) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 1.27% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.07 และสังกะสี (Zn) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 0.63% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.27



ภาพที่ 8 สเปกตรัมของธาตุองค์ประกอบของเส้นใยกล้วย

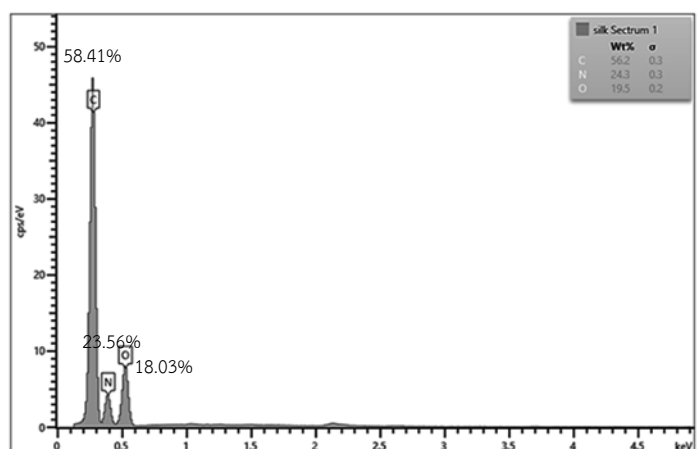
5.1.3 ไหม (Silk)

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นไหมด้วยวิธี SEM ได้ผลดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ลักษณะพื้นผิวของเส้นไหมด้วยวิธี SEM

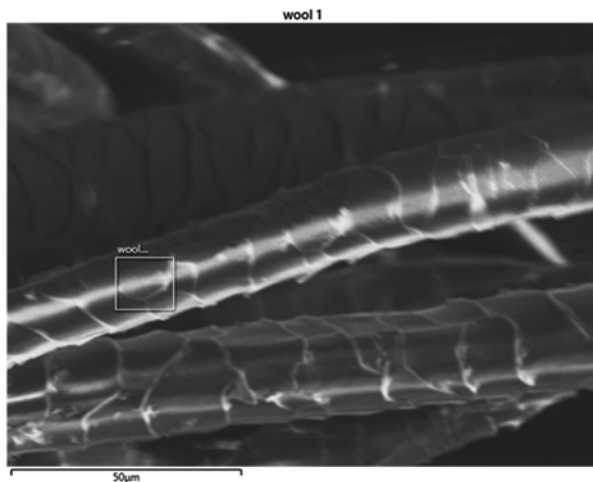
เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นไหมตัวอย่างด้วยวิธี EDS พบว่า มีธาตุองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 58.41% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 6.72 ไนโตรเจน (N) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 23.56% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 4.18 และออกซิเจน (O) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 18.03% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 2.64



ภาพที่ 10 สเปกตรัมของธาตุองค์ประกอบของเส้นไหม

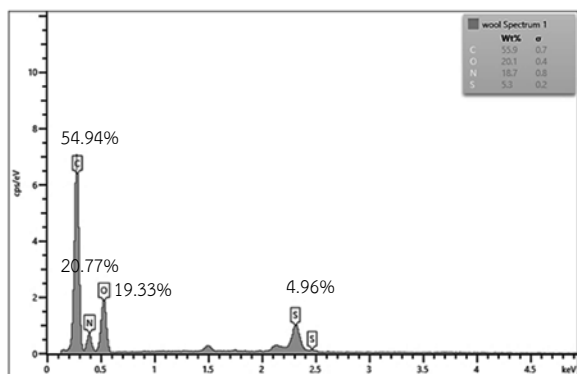
5.1.4 ขนสัตว์ (Wool)

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยขนสัตว์ด้วยวิธี SEM ได้ผลดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยขนสัตว์ ด้วยวิธี SEM

เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยขนสัตว์ด้วยวิธี EDS พบว่ามีธาตุองค์ประกอบหลัก 4 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 54.94% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 2.12 ไนโตรเจน (N) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 20.77% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 5.16 ออกซิเจน (O) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 19.33% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.76 และกำมะถัน (S) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 4.96% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 2.59



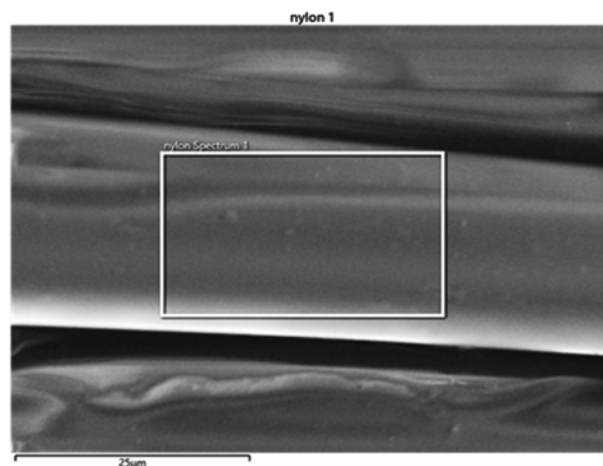
ภาพที่ 12 สเปกตรัมของธาตุองค์ประกอบของเส้นใยขนสัตว์

5.2 เส้นใยสังเคราะห์

ในการวิจัยนี้ใช้กลุ่มตัวอย่างเส้นใยสังเคราะห์ จำนวน 5 ชนิด ได้แก่ ไนลอน (Nylon) โพลีเอสเตอร์ (Polyester) โมดาคrylic (Modacrylic) อะคริลิก (Acrylic) และเรยอน (Rayon) เมื่อนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยสังเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope/Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM/EDS) ได้ผลการทดลองดังนี้

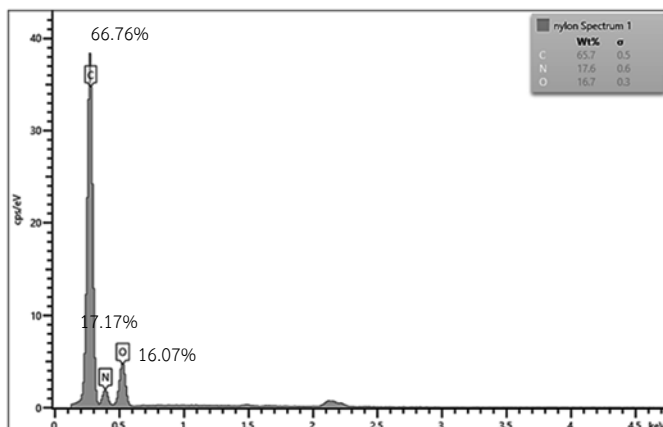
5.2.1 ไนลอน (Nylon)

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไนลอนด้วยวิธี SEM ได้ผลดังภาพที่ 13

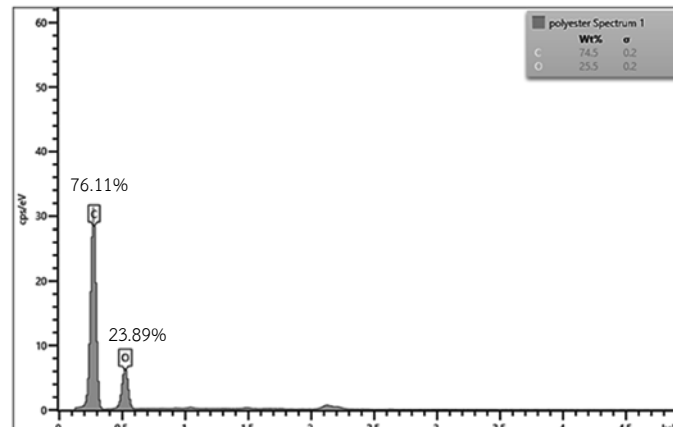


ภาพที่ 13 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยไนลอนด้วยวิธี SEM

เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยไนลอนด้วยวิธี EDS พบว่ามีธาตุองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 66.76% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 1.59 ไนโตรเจน (N) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 17.17% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.84 และออกซิเจน (O) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 16.07% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.78



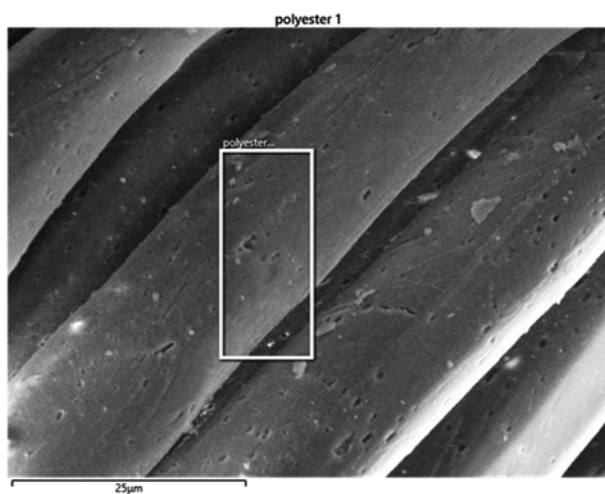
ภาพที่ 14 สเปกตรัมของธาตุองค์ประกอบของเส้นใยไนลอน



ภาพที่ 16 สเปกตรัมของธาตุองค์ประกอบของเส้นใยโพลีเอสเตอร์

5.2.2 โพลีเอสเตอร์ (Polyester)

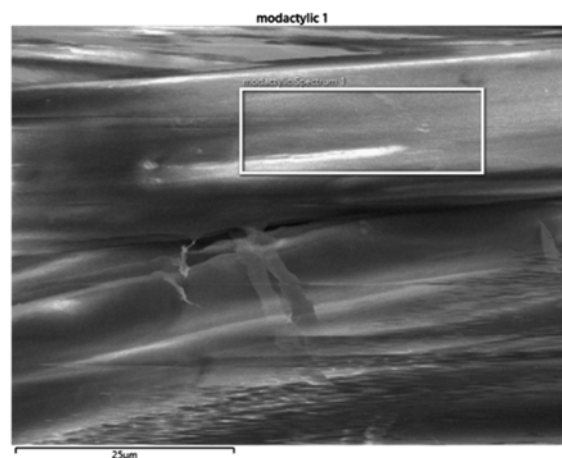
จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ด้วยวิธี SEM ได้ผลดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ด้วยวิธี SEM

5.2.3 โมดาโครลิก (Modacrylic)

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยโมดาโครลิก ด้วยวิธี SEM ได้ผลดังภาพที่ 17

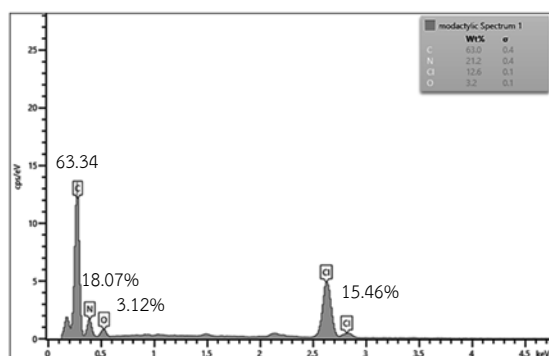


ภาพที่ 17 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยโมดาโครลิกด้วยวิธี SEM

เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ตัวอย่างด้วยวิธี EDS พบว่า มีธาตุองค์ประกอบหลัก 2 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) โดยมีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 76.11% และ 23.89% ตามลำดับ และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 1.47 ของทั้ง 2 ธาตุองค์ประกอบ

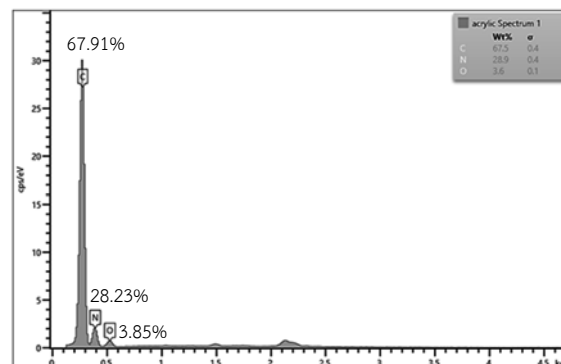
เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยโมดาโครลิกตัวอย่างด้วยวิธี EDS พบว่า มีธาตุองค์ประกอบหลัก 4 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 63.34% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.67 ไนโตรเจน (N) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 18.07% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 2.84 ออกซิเจน (O) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 3.12% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่

0.17 และคลอรีน (Cl) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 15.46% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 2.95



ภาพที่ 18 สเปกตรัมของธาตุองค์ประกอบของเส้นใยโพลิอิมิดาโครลิก

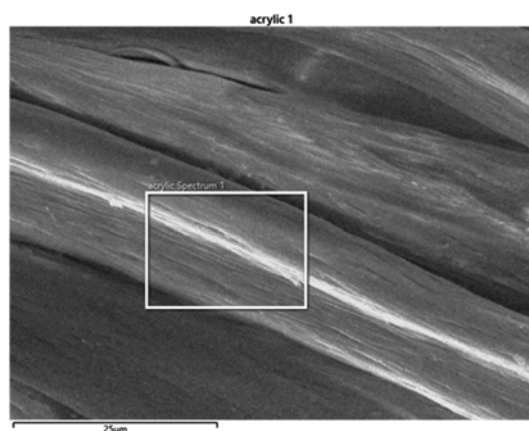
ปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 3.85% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.23



ภาพที่ 20 สเปกตรัมของธาตุองค์ประกอบของเส้นใยอะคริลิก

5.2.4 อะคริลิก (Acrylic)

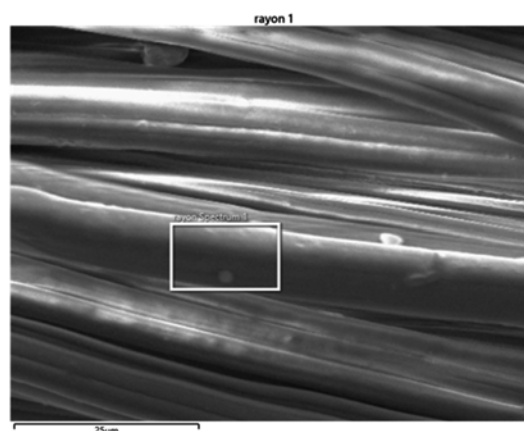
จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยอะคริลิก ด้วยวิธี SEM ได้ผลดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยอะคริลิกด้วยวิธี SEM

5.2.5 เรยอน (Rayon)

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของเส้นใยเรยอน ด้วยวิธี SEM ได้ผลดังภาพที่ 21



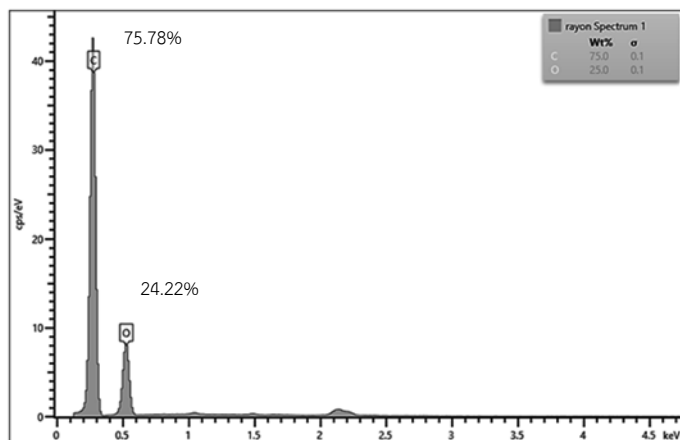
ภาพที่ 21 ลักษณะพื้นผิวของเส้นใยเรยอนด้วยวิธี SEM

เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยอะคริลิกตัวอย่างด้วยวิธี EDS พบว่า มีธาตุองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 67.91% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 3.37 ไนโตรเจน (N) มีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 28.23% มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 3.35 และออกซิเจน (O) มี

เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเรยอนตัวอย่างด้วยวิธี EDS พบว่า มีธาตุองค์ประกอบหลัก 2 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) โดยมีปริมาณเฉลี่ยเท่ากับ 75.78% และ 24.22% ตามลำดับ และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 1.77 ของทั้ง 2 ธาตุองค์ประกอบ

ตารางที่ 1 สรุปผลการศึกษาลักษณะทางพื้นผิว และการศึกษาลักษณะทางองค์ประกอบของเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์

ประเภทของเส้นใย	ชนิดเส้นใย	ลักษณะทางกายภาพ	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี (Wt%)							
			C	O	Mg	Si	Zn	N	S	Cl
เส้นใยธรรมชาติ	ฝ้าย	พื้นผิวไม่เรียบ มีความมันวาวเล็กน้อย	73.60	26.40	-	-	-	-	-	-
	กัญชง	พื้นผิวไม่เรียบ มีความมันวาวเล็กน้อย	65.19	32.09	0.83	1.27	0.63	-	-	-
	ไหม	พื้นผิวเรียบ มีความมันวาว	58.41	18.03	-	-	-	23.56	-	-
	ขนสัตว์	พื้นผิวไม่เรียบ มีเกล็ดเรียงซ้อนกัน	54.94	19.33	-	-	-	20.77	4.96	-
	ไนลอน	พื้นผิวเรียบ มีความมันวาวเล็กน้อย	66.76	16.07	-	-	-	17.17	-	-
เส้นใยสังเคราะห์	โพลีเอสเตอร์	พื้นผิวขรุขระ ไม่เรียบ	76.11	23.89	-	-	-	-	-	-
	โมดาครีลิก	พื้นผิวเรียบ มีความมันวาวเล็กน้อย	63.34	3.12	-	-	-	18.07	-	15.46
	อะคริลิก	พื้นผิวเรียบ มีความมันวาวเล็กน้อย	67.91	3.85	-	-	-	28.23	-	-
	เรยอน	พื้นผิวเรียบ มีความมันวาวเล็กน้อย	75.78	24.22	-	-	-	-	-	-



ภาพที่ 22 สเปกตรัมของธาตุองค์ประกอบของเส้นใยเรยอน

6. สรุปและอภิปรายผล

เมื่อทำการศึกษาลักษณะทางพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติตัวอย่างทั้ง 4 ชนิด ซึ่งได้แก่ ฝ้าย กัญชง ไหม และขนสัตว์ และเส้นใยสังเคราะห์ตัวอย่างทั้ง 5 ชนิด ซึ่งได้แก่ ไนลอน โพลีเอสเตอร์ โมตาไครลิก อะคริลิก และเรยอน ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) จากนั้นทำการศึกษาธาตุองค์ประกอบ ด้วยวิธี Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 พบว่า เส้นใยไหมมีลักษณะพื้นผิวเรียบ มีความมันวาว เส้นใยฝ้ายและกัญชงมีลักษณะพื้นผิวไม่เรียบ มีความมันวาวเล็กน้อย ส่วนเส้นใยขนสัตว์มีลักษณะพื้นผิวไม่เรียบ มีเกล็ดเรียงซ้อนกัน จากนั้นทำการศึกษาธาตุองค์ประกอบ ด้วยวิธี Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) พบว่า เส้นใยกัญชงมีธาตุองค์ประกอบหลัก 5 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) 65.19% ออกซิเจน (O) 32.09% แมกนีเซียม (Mg) 0.83% ซิลิกอน (Si) 1.27% และสังกะสี (Zn) 0.63% เส้นใยขนสัตว์มีธาตุองค์ประกอบหลัก 4 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) 54.94% ออกซิเจน (O) 19.33% ไนโตรเจน (N) 20.77% และกำมะถัน (S) 4.96% เส้นใยไหมมีธาตุองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) 58.41% ออกซิเจน (O) 18.03% และไนโตรเจน (N) 23.56% และเส้นใยฝ้ายมีธาตุองค์

ประกอบหลัก 2 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) 73.60% และออกซิเจน (O) 26.40%

เมื่อทำการศึกษาลักษณะทางพื้นผิวของเส้นใยสังเคราะห์ตัวอย่างทั้ง 5 ชนิด ซึ่งได้แก่ ไนลอน โพลีเอสเตอร์ โมตาไครลิก อะคริลิก และเรยอน ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่า เส้นใยไนลอน โมตาไครลิก อะคริลิก และเรยอนมีลักษณะพื้นผิวเรียบ มีความมันวาวเล็กน้อย ส่วนเส้นใยโพลีเอสเตอร์มีลักษณะพื้นผิวขรุขระไม่เรียบ จากนั้นทำการศึกษาธาตุองค์ประกอบ ด้วยวิธี Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) พบว่า เส้นใยโโมตาไครลิกมีธาตุองค์ประกอบหลัก 4 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) 63.34% ออกซิเจน (O) 3.12% ไนโตรเจน (N) 18.07% และคลอรีน (Cl) 15.46% เส้นใยอะคริลิกมีธาตุองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) 67.91% ออกซิเจน (O) 3.85% และไนโตรเจน (N) 28.23% เส้นใยไนลอนมีธาตุองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) 66.76% ออกซิเจน (O) 16.07% และไนโตรเจน (N) 17.17% เส้นใยโพลีเอสเตอร์มีธาตุองค์ประกอบหลัก 2 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) 76.11% และออกซิเจน (O) 23.89% และเส้นใยเรยอนมีธาตุองค์ประกอบหลัก 2 ชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) 75.78% และออกซิเจน (O) 24.22%

เทคนิควิธีการตรวจวิเคราะห์เส้นใยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์มีหลากหลายวิธีที่ไม่ทำลายวัตถุพยาน เช่น เทคนิควิธี Polarized Light Microscopy (PLM), Infrared Microspectroscopy, Microspectrophotometry (MSP) และ Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM/EDS) ซึ่งเส้นใยนั้นเป็นวัตถุพยานชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญในงานด้านนิติวิทยาศาสตร์ ดังนั้นการตรวจเปรียบเทียบคุณลักษณะความเหมือนหรือแตกต่างของเส้นใยที่พบในสถานที่เกิดเหตุกับเส้นใยตัวอย่างที่นำมาทดสอบต้องมีการรักษาคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยให้คงอยู่ เป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อการพิจารณาถึงคุณค่าของวัตถุพยาน

ในกระบวนการพิจารณาคุณสมบัติของศาลเป็นอย่างมาก เทคนิควิธีการตรวจวิเคราะห์เส้นใยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์นั้นสามารถใช้ทดสอบดูความแตกต่างของรูปร่างเส้นใย ชนิดของเส้นใย (ใยธรรมชาติหรือใยสังเคราะห์) รูปแบบการหักทอ สีของเส้นใย ตลอดจนธาตุองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยแต่ละชนิดได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้จำแนกชนิดของเส้นใยออกจากกันได้ [9]

ในการวิจัยนี้ทำการศึกษาลักษณะทางพื้นผิวและองค์ประกอบทางเคมีที่พบในเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ ด้วยวิธี Scanning Electron Microscope/Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM/EDS) จากผลการวิจัยพบว่า เส้นใยไหมซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติมีลักษณะพื้นผิวเรียบ และมีความมันวาวมากกว่าเส้นใยฝ้าย และกัญชง เนื่องจากเส้นใยไหมเป็นเส้นใยโปรตีนที่ได้จากรัง (Cocoon) ของไหม มีองค์ประกอบจากโปรตีน 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเส้นใยไหม ที่เรียกว่า ไฟโบรอิน (Fibroin) ประมาณ 62.5-67.0% เป็นโปรตีนที่ไม่ละลายในน้ำและน้ำร้อน ซึ่งไฟโบรอินเป็นพอลิเปปไทด์สายตรงที่ประกอบด้วยกรดอะมิโน จำนวน 17 ตัว ได้แก่ อะลานีน (Ala) ไกลซีน (Gly) ซีรีน (Ser) และไทโรซีน (Thy) เป็นต้น และกาไหม ซึ่งมีชื่อเรียกว่า เซรีซิน (Sericin) ประมาณ 23.0-27.5% เป็นโปรตีนเชิงซ้อน (Complex Protein) ที่เคลือบเส้นใยไฟโบรอิน ทำให้เส้นใยไหมที่สาวจากรังไหมแต่ละรังเชื่อมรวมเป็นเส้นเดียวกันได้ และส่วนประกอบอื่นๆ ซึ่งได้แก่ ไขมัน แวกซ์ (Cere) สารไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) สารสี (Pigment) และปริมาณเถ้า (Ash)

โดยปกติเส้นใยไหมดิบจะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระไม่เรียบ แต่ระหว่างกระบวนการต้มรังไหมในขั้นตอนการสาวไหมนั้น เซรีซินจะถูกชะล้างออกไป เป็นผลให้พื้นผิวของเส้นใยไหมมีลักษณะเรียบมากขึ้น [10] [11] [12] ส่วนความมันวาวของเส้นใย (Luster) เป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับปริมาณแสงที่ถูกสะท้อนกลับโดยผิวหน้าของผ้า ซึ่งผ้าที่สะท้อนแสงกลับออกมามากก็จะมีค่าความมันวาวมากขึ้นขึ้นอยู่กับลักษณะผิวหน้าของเส้นใย สารเติมแต่งและ

โครงสร้างของผ้า เส้นใยไหมมีความมันวาวสูงก็เนื่องมาจากเส้นใยไหมมีผิวหน้าที่เรียบและเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Filament) [13] ส่วนความมันวาวในเส้นใยสังเคราะห์นั้นผู้ผลิตสามารถควบคุมความมันวาวของเส้นใยได้โดยการควบคุมปริมาณของสีที่ผสมหรือการเติมสารลดความมัน ซึ่งก็คือไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ลงไปในกระบวนการผลิต [14]

เส้นใยฝ้ายและกัญชงเป็นเส้นใยที่ได้จากพืชเป็นเส้นใยเซลลูโลส [15] โครงสร้างของโมเลกุลจะประกอบด้วยกลุ่มแอนไฮโดรกลูโคสเกาะเกี่ยวกันเป็นสายโซ่ยาว โมเลกุลใหญ่ กลูโคสแต่ละหน่วยประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน

เส้นใยขนสัตว์มีองค์ประกอบเป็นเกล็ดแข็งของโปรตีนที่เรียกว่า เคราติน ซึ่งเป็นโปรตีนชนิดเดียวกันกับที่เป็นองค์ประกอบของเล็บ เกล็ดเคราตินในเส้นใยขนสัตว์จะมีการวางตัวเรียงซ้อนทับกันเหมือนแผ่นกระเบื้อง เคราตินมีโครงสร้างประกอบด้วยกรดอะมิโนซิสเตอีน ซึ่งมีธาตุกำมะถันเป็นองค์ประกอบอยู่ภายในโมเลกุล [16] ซิสเตอีน 2 โมเลกุลรวมตัวกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ (S-S : Disulfide Bond) จะเป็นโมเลกุลของซิสทีน (Cystine)

สำหรับเส้นใยไนลอนเป็นพลาสติกที่มีความเหนียวมาก เป็นโพลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-Crystalline) ที่มีหมู่เอไมด์เป็นองค์ประกอบ

เส้นใยอะคริลิกเป็นโคโพลิเมอร์ระหว่างอะครีโลไนไตรล์ 85.8% และมอนอเมอร์ชนิดอื่นๆ เมื่อได้เป็นโพลิเมอร์แล้วจะทำให้เป็นเส้นใยต้องนำไปละลายในไดเมทิลฟอร์มาไรด์แล้วจึงอัดเป็นเส้นใย เมื่อตัวทำละลายระเหยไปก็จะได้เส้นใยอะคริลิก เส้นใยอะคริลิกจึงมีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ

เส้นใยโมดาคโรลิกเป็นเส้นใยที่อยู่ในกลุ่มเดียวกับอะคริลิก แต่มีส่วนผสมต่างกันคือ เป็นเส้นใยที่มีโพลิเมอร์ประกอบด้วย ไวนิลคลอไรด์ 60% และอะครีโลไนไตรล์ 40% จึงมีธาตุไนโตรเจนและคลอรีนเป็นองค์ประกอบในเส้นใยด้วย [17] [18]

7. กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถ การให้คำแนะนำจากผู้ทรงคุณวุฒิและความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือของ ศูนย์วิเคราะห์ทดสอบ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และตัวอย่างเส้นใยจากศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุศาสตร์แห่งชาติ (MTEC)

8. บรรณานุกรม

- (1) สายพิน สืบสันติกุล, "การศึกษาองค์ประกอบและชนิดของเส้นใยในผ้าเบรกรถยนต์," เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 8 ว กลุ่มงานเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ 2. กองฟิล์มและวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ 2549.
- (2) จารุวรรณ อัมพฤกษ์, "การวิเคราะห์เส้นใยธรรมชาติ และเส้นใยสังเคราะห์ในงานทางนิติวิทยาศาสตร์ โดย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)." การค้นคว้าอิสระปริญญาโท สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2555.
- (3) กรจุลี พนาพิทักษ์กุล, กัลยา เอื้อประเสริฐศักดิ์, มนุ เพ็ญพูน, "การเตรียมและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยพอลิไธรีน/พอลิอะนิลีนโดยการปั่นด้วยไฟฟ้าสถิต," วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 22, ฉบับที่ 6, หน้า 767-774, 2557.
- (4) S. Wanagho, G. Gettingby, B. Caddey, J. Robertson, "Determination of particle size distribution of soils in forensic science using classical and modern instrumental methods." Journal of Forensic Sciences 34, vol. 4, pp. 823-835, 1989.
- (5) Cho et al., "Single fiber analysis by internal reflection infrared microspectroscopy." Journal of Forensic Science 46, vol. 6, pp. 1309-1314, 2001.
- (6) M. M. Houck, "Inter-comparison of unrelated fiber evidence." Forensic Science International, vol. 135, pp. 146-149, 2003.
- (7) L. L. Cho, "Identification of textile fiber by Raman microspectroscopy." Forensic Science Journal, vol. 6, no. 1, pp. 55-62, 2007.

- (8) D. A. Stoney, P. L. Stoney, "Use of Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive Spectroscopy (SEM/EDS) Methods for the Analysis of Small Particles Adhering to Carpet Fiber Surfaces as a Mean to Test Associations of Trace Evidence in a Way that is Independent of Manufactured Characteristics," Research report submitted to the U.S. Department of Justice, 2012.
- (9) Appalaneni, Krishnaveni. "Non-destructive Analysis of Trace Textile Fiber Evidence Via Roomtemperature Fluorescence Spectroscopy," Doctoral Dissertation, Department of Chemistry, University of Central Florida, 2013.
- (10) วิโรจน์ แก้วเรือง, (1 สิงหาคม 2562) โหม...คุณประโยชน์ที่ค้นพบอย่างไม่จบสิ้น ตอนที่ 1, 2555, (Online). แหล่งที่มา: www.gotoknow.org/posts/451359
- (11) วิศิษฐ์ แวสูงเนิน, "การเพิ่มสมบัติการใช้งานเส้นใยไหมธรรมชาติโดยวิธีการดัดแปรทางเคมี" รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2556.
- (12) วิทยาลัยการอาชีพขอนแก่น, (1 สิงหาคม 2562) เส้นใยไหม, 2556, (Online). แหล่งที่มา: www.kknac.ac.th/salamai/page/m9.htm
- (13) ไรจน์ฤทธิ์ ไรจน์ธเนศ, ภัฏฐพร พิมพะ, (ม.ป.ป.). ปฏิบัติการเตรียมเส้นใยเรยอน. คู่มือสื่อการสอนวิชาเคมีโดยความร่วมมือระหว่างสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐานและคณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- (14) บุรินทร์ พุทธิโชติ, (ม.ป.ป.), (1 สิงหาคม 2562) การผลิตเส้นใยสมรรถนะสูง (High Performance Fibers) เพื่อการปฏิรูปอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม, (Online). แหล่งที่มา: www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/article/high_performance_fibers.pdf
- (15) ดนตรี จิรภัทรพิมล, (ม.ป.ป.), (1 สิงหาคม 2562) ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเส้นใยและการดูแลรักษา, (Online). แหล่งที่มา: www.human.cmu.ac.th/home/hc/ebook/006103/lesson2/02.htm
- (16) อภิชาติ สนธิสมบัติ, (12 ตุลาคม 2562) สมบัติของเส้นใยสิ่งทอ, 2555, (Online). แหล่งที่มา: http://www.ttcexpert.com/2012/Powerpoint/Intro_cotton_flax_wool_silk.pdf
- (17) ไรจน์ฤทธิ์ ไรจน์ธเนศ, ภัฏฐพร พิมพะ, (ม.ป.ป.). ปฏิบัติการเตรียมเส้นใยเรยอน. คู่มือสื่อการสอนวิชาเคมีโดยความร่วมมือระหว่างสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐานและคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- (18) นพภาพร พานิช และคณะ, (ม.ป.ป.), (1 สิงหาคม 2562) Acrylonitrile, (Online). แหล่งที่มา: www.pcd.go.th/info_serv/Datasmell/I3acrylonitrile.htm

การศึกษาระยะการยิงปืนลูกซองกับพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด

Study of Firing Distance of Shotgun with Average Distribution Area of Buckshot

ศศิธร เลิศเกียรติบัญชา*

Sasithorn Leartkeatbuncha*

พันตำรวจโท ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิตี มหาเจริญ

Police Lieutenant Colonel Assistant Professor Dr. Thiti Mahacharoen

คณะนิติวิทยาศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยตำรวจ ต.สามพราน อ.สามพราน จ.นครปฐม 73110 ประเทศไทย
Forensic Science faculty, Royal Police Cadet Academy, Nakorn Pathom, 73110, Thailand.

*Corresponding Author. E-mail : sasithorn.crec@hotmail.com

(Received: May 7, 2020, Accepted: July 3, 2020)

บทคัดย่อ : การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด และทำการเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด ที่ระยะยิง 5 เมตร, 10 เมตร, 15 เมตร และ 20 เมตร จากการยิงปืนลูกซอง 2 ประเภทได้แก่ ปืนลูกซองเรมิงตันรุ่น 870 ปัมแอนด์ชั่ง มีความยาวลำกล้อง 20 นิ้ว และปืนลูกซองเบนเนลลี เชมมิดจ์ มีความยาวลำกล้อง 18 นิ้ว โดยปืนลูกซองทั้ง 2 กระบอกใส่ไส้ตะกั่วแบบอิมพรัฟ ไซเลนเดอร์ ทำการยิงทดสอบโดยใช้กระสุนปืนลูกซองไทยอาร์ม 9 เม็ด (SG) และวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติโดยใช้สถิติพื้นฐานในการวิเคราะห์ข้อมูล การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) และการทดสอบแบบที (t-test) ผลการวิจัย พบว่าจากการยิงปืนลูกซองความยาวลำกล้อง 20 นิ้วและ 18 นิ้ว โดยใส่ไส้ตะกั่วแบบอิมพรัฟ ไซเลนเดอร์ นั้น ในระยะ 5 เมตร, 10 เมตร, 15 เมตร และ 20 เมตร มีพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 89.04 ตารางเซนติเมตร, 595.15 ตารางเซนติเมตร, 1,276.96 ตารางเซนติเมตร และ 3,206.21 ตารางเซนติเมตรตามลำดับ จากการทดสอบสมมติฐาน พบว่าอาวุธปืนลูกซองต่างประเภทกันมีความยาวลำกล้องต่างกันใส่ไส้ตะกั่วชนิดเดียวกันมีพื้นที่เฉลี่ยของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด ไม่แตกต่างกัน และระยะยิงปืนลูกซองห่างจากเป้ายิงที่แตกต่างกัน มีพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

คำสำคัญ : ระยะยิง พื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด ไส้ตะกั่ว อิมพรัฟ ไซเลนเดอร์

Abstract : The purpose of this research is to study some models of shot pellets and compare the average area of shot pellets form 5, 10, 15 and 20 m. Two shotguns are Remington 870, pump action with 20-inch barrel length and Benelli, semi auto with 18-inch barrel length. Shotguns with 20-inch barrel length and 18-inch barrel length have improved cylinder choke. Shotguns(SG) were fired with shot pellets. Data were statistically analyzed by Descriptive Statistic, One-Way ANOVA and statistic t-test. The results of the research showed that shotgun with 20-inch barrel length and 18-inch barrel length have improved cylinder choke were used. Distance of 5, 10, 15 and 20 m. show the distribution are of shot pellets at 89.04, 595.15, 1,276.96 and 3,206.21 cm^2 , respectively. From the hypothesis testing, there was no statistically significant difference between distribution area of the test with difference barrel length, 20-inch and 18-inch barrel length, and with the same improved cylinder choke. And it was found significant differences in firing distance at the statistical significance level of 0.05.

Keywords : Firing distance, Average distribution area of shot pellets, Choke, Improved cylinder

1. บทนำ

ประเทศไทยมีสถิติการจับกุมอาวุธปืนเพิ่มขึ้นทุกปี เนื่องจากการครอบครองและการเป็นเจ้าของอาวุธปืนนั้น ไม่ใช่เรื่องยากนัก ซึ่งจากสถานการณ์เกี่ยวกับอาวุธปืนย้อนหลังพบว่า ข้อมูลจากกระทรวงมหาดไทยในปี พ.ศ. 2555 มีร้านอาวุธปืนและเครื่องกระสุนปืนที่ได้รับอนุญาตจำนวน 502 ใบอนุญาต มีอาวุธปืนที่อนุญาตให้ครอบครอง 2 ประเภท คือ อาวุธปืนสั้น 3,744,877 กระบอก และอาวุธปืนยาว 2,476,303 กระบอก (สำนักข่าวอิศรา, 2555) ทำให้ทราบว่าอาวุธปืนถูกกฎหมายในประเทศไทยถึง 6.2 ล้านกระบอก โดยยังไม่รวมปืนเถื่อนและปืนไทยประติษฐ์อีกเป็นจำนวนมาก และจากข้อมูลสถิติคดีเกี่ยวกับอาวุธปืนของสำนักงานตำรวจแห่งชาติย้อนหลัง พบว่ามีคดีความผิดเกี่ยวกับอาวุธปืน ทั้งที่มีทะเบียนและไม่มีทะเบียนย้อนหลัง ดังนี้ ในปี พ.ศ. 2562 สถิติคดีเกี่ยวกับอาวุธปืนมีจำนวนคดี 30,758 ราย จำนวนผู้ต้องหา 31,376 คน ในปี พ.ศ. 2561 สถิติคดีเกี่ยวกับอาวุธปืนมีจำนวนคดี 26,750 ราย จำนวนผู้ต้องหา 33,232 คน และในปี พ.ศ. 2560 สถิติคดีเกี่ยวกับอาวุธปืนมีจำนวนคดี 21,794 ราย จำนวนผู้ต้องหา 21,432 คน (ระบบสารสนเทศสถานีตำรวจ, สำนักงานตำรวจแห่งชาติ, 2563) เมื่อวิเคราะห์สถิติการครอบครองอาวุธปืนและสถิติการก่อคดีที่เกี่ยวกับอาวุธปืนแล้ว ทำให้เห็นว่าในประเทศไทยมีผู้ครอบครองอาวุธปืนนั้นไม่ใช่เรื่องยากนัก จนเป็นเหตุให้คนร้ายสามารถนำอาวุธปืนดังกล่าวมาใช้เป็นเครื่องมือในการกระทำความผิดก่อให้เกิดความเดือดร้อนต่อประชาชนทั่วไป

โดยในประเทศไทย ปืนลูกซองนับว่าเป็นปืนสามัญประจำบ้านก็ว่าได้ เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการใช้งานตั้งแต่ใช้เพื่อการล่าสัตว์ การกีฬา การสงคราม และเพื่อต่อสู้ป้องกันตัวของเจ้าหน้าที่ตำรวจและประชาชน คุณสมบัติที่หลากหลายเหล่านี้มาจากคุณลักษณะพิเศษของปืนลูกซองและกระสุนที่ใช้ซึ่งมีให้เลือกมากมายหลายแบบราคาปืนไม่แพงมาก การขออนุญาตซื้อก็ไม่ยากจนเกินไป ตัวปืนลูกซองก็มีประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดี

มีความทนทานสูง ยิงง่าย ดูแลไม่ยาก กระสุนลูกซองมีราคาไม่แพงสามารถหาซื้อกระสุนได้ง่าย ดังนั้น เมื่ออาวุธปืนลูกซองเป็นอาวุธที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายโอกาสที่จะใช้อาวุธปืนลูกซองในการก่อเหตุอาชญากรรมจะมีเพิ่มมากขึ้นตามการครอบครอง ซึ่งการยิงปืนลูกซองโดยใช้กระสุนลูกปราย เมื่อมีการยิงปืนออกไปกระสุนลูกปรายจะแตกกระจายออกเป็นวงกว้างจนกว่าจะกระทบกับเป้าหมาย จึงทำให้การยิงปืนลูกซองโดยใช้กระสุนปืนลูกปรายก่อเกิดความเสียหายได้ง่าย เนื่องจากการกระจายเป็นวงกว้าง เช่น ในคดีล่าเสือดำในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าทุ่งใหญ่นเรศวรฝั่งตะวันตก กลุ่มเจ้าหน้าที่ดังกล่าวได้ขอตรวจค้นบริเวณแคมป์ที่พักพบซากไก่ถูกสับอยู่บนโต๊ะซึ่งหัวไก่เป็นลักษณะของไก่ฟ้าโดยมีลูกกระสุนปรายที่ฝังอยู่กับหนังไก่ เมื่อเจ้าหน้าที่ทำการค้นตัวนายพราน (จำเลยที่ 4) พบกระสุนปืนลูกซอง ซึ่งสภาพของกระสุนปืนมีลักษณะคล้ายกับปลอกกระสุนปืนของกลางที่พบบริเวณใกล้กับจุดพบซากเสือดำ เมื่อเสือด่าถูกอาวุธปืนยิงตามภาพถ่ายจำลองตำแหน่งรูกระสุนปืนถึงแก่ความตายโดยพบรอยฉีกขาดของหนัง มีรอยกระสุนปืนเข้าทั้งหมด 8 รอย เป็นรอยทะลุ 7 รอย และรอยฉีก 1 รอย โดยพบลูกกระสุน ลูกปราย 3 ลูก ขนาด SSG ฝังอยู่ที่หนัง เป็นขนาดเดียวกันกับลูกกระสุนปืนลูกซอง ขนาด 20 ของกลาง และเมื่อนำปลอกกระสุนปืนลูกซองขนาด 20 ของกลางที่พบใกล้กับจุดพบซากเสือดำกับปลอกกระสุนปืนที่ใช้ยิงเปรียบเทียบกับจากอาวุธปืนยาวลูกซองแฝด ขนาด 20 มีตำหนิรอยเข็มแทงชนวน และรอยลายเส้นที่งานท้ายปลอกกระสุนปืนตรงกันและเข้ารอยกันได้ ตามรายการตรวจพิสูจน์ จึงเชื่อว่า ปลอกกระสุนปืนลูกซองของกลางที่ยิงมาจากอาวุธปืนยาวลูกซองแฝด ของกลาง ประกอบกับพบกระสุนปืนลูกซอง ขนาด 20 จำนวน 2 นัดในกระเป๋ากางเกงของจำเลยที่ 4 ซึ่งสภาพของกระสุนปืน มีลักษณะคล้ายกับปลอกกระสุนปืนขนาด 20 ของกลางที่พบใกล้กับจุดพบซากเสือดำ พฤติการณ์ของจำเลยที่ 4 ตามที่โจทก์นำสืบมาฟังได้มั่นคงว่า จำเลยที่ 4 เป็นผู้ใช้อาวุธปืนยาว

ลูกซองแฝดของกลางยิงเสือด่า จำเลยที่ 4 จึงมีความผิดฐานล่าสัตว์ป่าคุ้มครอง (เสือด่า) (“คำพิพากษานับเต็มคดีเสือด่า,” 2562)

จากข้อมูลการศึกษารูปแบบการกระจายของกลุ่มลูกกระสุนปราย รูปแบบของรอยรูของลูกกระสุนปราย กระสุนปืนลูกซอง และ Gun Shot Residue (GSR) ที่มองเห็นด้วยตาเปล่า โดยการใช้ปืนพกลูกซอง ประกอบขึ้นเอง ขนาด 12 ที่พบในเขตพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างเพื่อนำมาสร้างเป็นข้อมูลเฉพาะและรูปแบบของร่องรอยปะทะเพื่อใช้เป็นแนวทางในการตรวจสอบสถานที่เกิดเหตุและแนวทางการตรวจวิถีกระสุนปืนของผู้ชำนาญการในกระบวนการทางนิติวิทยาศาสตร์ พบว่า ในระยะยิงปืนลูกซองและการกระจายของลูกปราย มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในการศึกษาดังกล่าว เป็นการใช้เครื่องมือเป็นปืนที่ประดิษฐ์ขึ้นเองไม่มีมาตรฐานของปืน อีกทั้งยังมีการยิงในระยะ 3 เซนติเมตร ถึง 500 เซนติเมตร ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาและตรวจยืนยันผลการทดลองเพื่อต่อยอดการทดลองดังกล่าว โดยใช้อาวุธปืนที่ได้รับความนิยมมีขายอยู่ทั่วไปและกระสุนปืนลูกซองที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปในประเทศไทย อีกทั้งผู้วิจัยเห็นว่าการเพิ่มระยะการยิงให้ไกลขึ้นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อนำข้อมูลไปเป็นแนวทางในการตรวจที่เกิดเหตุและเป็นแนวทางในการสืบสวนคดีของเจ้าหน้าที่ตำรวจต่อไป

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษารูปแบบการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด

2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จากการยิงปืนลูกซองที่มีความยาวลำกล้อง 20 นิ้ว และความยาวลำกล้อง 18 นิ้ว ใส่ไส้คอกิมพวฟไซเลนเดอร์ แบบเดียวกัน

2.3 เพื่อเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จำแนกตามระยะยิงปืนลูกซองห่างจากเป้ายิง และประเภทของอาวุธปืน

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การกระจายของกลุ่มลูกกระสุนปรายกระสุนปืนลูกซองมีรูปร่างคล้ายรูปไข่ (Oval Shape) เมื่อยิงในมุมที่เล็กกว่า 90 องศา โดยความยาว (แกนนอน) จะแปรผกผันกับมุมมองเมื่อเข้าใกล้ 90 องศา ส่วนของความกว้าง (แกนตั้ง) ไม่มีผลต่อมุมมอง และรูปแบบการกระจายของกลุ่มกระสุนปราย กระสุนปืนลูกซองจากการยิงปืนพกลูกซองประกอบขึ้นเอง ขนาด 12 ที่พบในเขตภาคเหนือตอนล่าง พบว่าเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นการกระจายก็จะเพิ่มขึ้นด้วย (วิสูตร พันธแก้ว, 2560)

Çakir, Cetin, Uner & Albek (2003) ทำการศึกษาการประมาณระยะยิงปืนจากการกระจายของกระสุนปืนลูกปรายที่ยิงด้วยปืนลูกซองปั๊มแอกชั่น โดยในการศึกษาวิจัยนี้ใช้ปืนลูกซองปั๊มแอกชั่นที่ไม่มีไส้คอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 เกจ ความยาวลำกล้อง 52 เซนติเมตรและลูกกระสุนขนาด 2, 3.5, 5 และ 8 มิลลิเมตร โดยทำการยิง 5 นัดที่ระยะ 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20 และ 25 เมตร แล้ววัดระยะห่างที่มากที่สุดของลูกกระสุนปืนในแนวตั้งและแนวนอน ข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญอย่างมากสำหรับกระสุนปืนแต่ละประเภท ได้สมการดังนี้ $y = a + bx$ โดยที่ a และ b เป็นค่าคงที่และหาสมการถดถอยเชิงเส้น

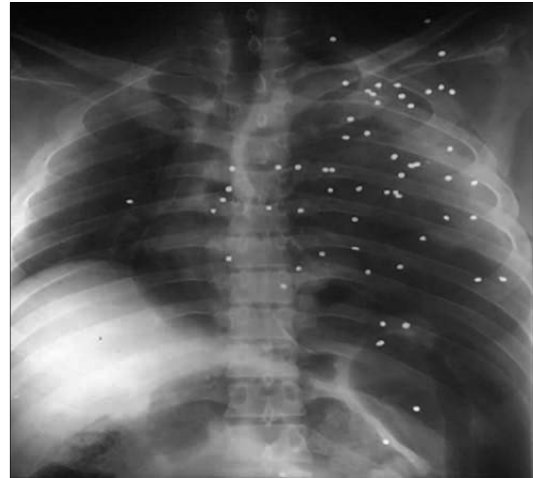
Arslan, Kar, Üner & Çetin (2011) ทำการศึกษาทดลองเชิงเปรียบเทียบในการประมาณระยะยิงจากการกระจายของกระสุนปืนลูกปรายที่ยิงด้วยปืนลูกซองที่มีไส้คอกต่างๆ การวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อเป็นแบบจำลองสำหรับ การประมาณระยะการยิงปืนลูกซองจากการยิงด้วยลูกซอง ที่มีไส้คอกแบบต่างๆ โดยทำการยิงปืนที่ระยะเดียวกันด้วย ปืนลูกซองที่มียาวลำกล้องเท่ากัน คือ 71 เซนติเมตร 12 เกจ แต่ใส่ไส้คอกต่างกัน คือ แบบฟูลไส้คอกและแบบไซเลนเดอร์บอร์ไส้คอก พบว่าเส้นผ่าศูนย์กลางที่ปรากฏบนเป้ายิงวัดได้ขนาดต่างกัน และเมื่อทำการยิงปืนที่ระยะเดียวกันด้วยปืนลูกซองที่มียาวลำกล้องต่างกัน คือ 71 เซนติเมตร 12 เกจ และความยาวลำกล้อง

71 เซนติเมตร 16 เกจ โดยใส่ใช้เหมือนกัน คือ แบบ ไฮเลนเดอร์บอร์โซ็ค พบว่าเส้นผ่าศูนย์กลางที่ปรากฏบน เป้ายังวัดได้ขนาดไม่ต่างกัน

Plebe & Compagnini (2012) ได้ทำการศึกษา การประมาณระยะการยิงปืนจากรูปแบบกระสุนปืน พบว่า การประเมินระยะการยิงจะเกี่ยวข้องกับรูปแบบของ กลุ่มกระสุน นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับระดับความแม่นยำ ในการยิงปืนด้วย ซึ่งในรายงานมักจะใช้สมมติฐานมาจากรูปแบบตัวอย่างของกลุ่มกระสุนในแบบต่างๆ ขึ้นอยู่กับ ลักษณะบาดแผลที่เกิดขึ้นบนเหยื่อ โดยนำลักษณะของ กลุ่มกระสุน บนตัวเหยื่อมาทำการเปรียบเทียบกับตัวอย่าง ที่มีการเก็บมาจากการทดสอบในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้การ วิเคราะห์นั้นถูกต้องที่สุด

Ghadipasha, Najari, Alimohammadi & Khalilzaden (2018) ได้ทำการศึกษาการกระจายของ กระสุนปืนลูกซองจากการยิงระยะใกล้ โดยทำการศึกษา ในกรณีศึกษาเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นบ้านพักในเมืองหลวง ของอิหร่าน รายงานว่าได้ฆ่าตัวตายโดยใช้ปืนลูกซอง ไม่มี ร่องรอยการต่อสู้ในที่เกิดเหตุ ลักษณะเสื้อของผู้เสียชีวิต มีรอยเลือดแต่ไม่ฉีกขาด มีเลือดไหลลงมาจากบริเวณ หน้าอก จากการตรวจสอบบาดแผลพบมีรอยกระสุนปืน เข้าทางหน้าอกด้านหน้า พบอยู่ต่ำกว่าหัวนมด้านซ้าย 9 เซนติเมตร วัดจากกึ่งกลางอก 3 เซนติเมตร อยู่ต่ำกว่า ไหล่ซ้าย 8 เซนติเมตร ต่ำกว่ารักแร้ 20 เซนติเมตร และ พบรูกระสุนปืนลักษณะรูไขมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 x 30 มิลลิเมตร มีขอบหยักและพบรอยเผาไหม้อยู่ รอบๆ รูกระสุนปืน พบเลือดบริเวณเยื่อหุ้มปอดด้านซ้าย แต่ไม่พบในบริเวณเยื่อหุ้มปอดข้างขวา พบขั้วปอดและ เนื้อเยื่อปอดด้านซ้ายฉีกขาด หลังจากผ่าปอดข้างซ้าย พบลูกปรายจำนวนหลายเม็ดบริเวณหลอดเลือดในปอด ข้างซ้าย จากการตรวจร่างกายด้วยภาพถ่ายรังสี ดังภาพที่ 1 พบลูกปราย 1 เม็ดที่บริเวณคอและหลายเม็ดที่หน้าอก สาเหตุการเสียชีวิต คาดว่ามีเลือดออกภายในหัวใจ ปอด ข้างซ้ายและหลอดเลือด อย่างไรก็ตามหลังจากถ่ายภาพ

รังสีและพิจารณาจากการกระจายของลูกปรายในหน้าอก คาดว่าระยะยิงอาจมากกว่า 90 เซนติเมตร

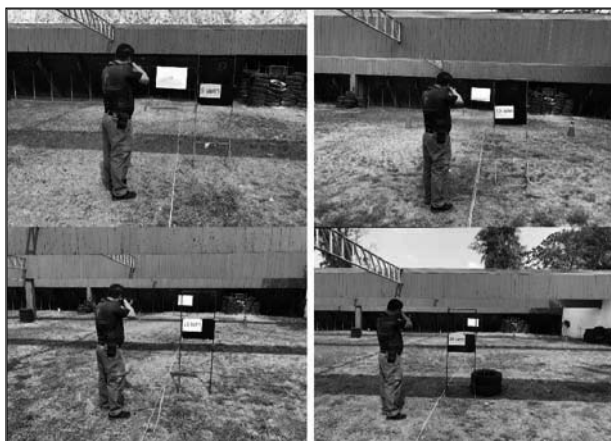


ภาพที่ 1 ภาพถ่ายรังสีการกระจายของกระสุนปืนลูกปรายใน ทรวงอก. ปรับปรุงจาก Spreading Pellets in Hitting Bullet of Shotgun from Close Distance: A Case Report and Review of the Literature, โดย Ghadipasha, M., Najari, F., Alimohammadi, A. and Khalilzaden, M. 2018, Iranian Red Crescent Medical Journal, 20(4), P.5.

4. วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยศึกษารูปแบบการกระจายของ กลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด และเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ย กลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จากการยิงปืนลูกซองที่มีความยาวลำกล้องต่างกันใส่ใช้ชนิดเดียวกัน ทำการ ทดลองยิงปืน ดังภาพที่ 2 ซึ่งทำการยิงในระยะยิงห่าง จากเป้ายิงกระดาษ 5, 10, 15 และ 20 เมตร ซึ่งจะใช้ ปืนลูกซอง 2 ชนิด ได้แก่ปืนลูกซองเรมิงตันรุ่น 870 (Remington 870) ปัมแอ็กชั่น (Pump Action) ความ ยาวลำกล้อง 20 นิ้ว ใส่ใช้แบบอิมพรวฟ ไฮเลนเดอร์ (Improved Cylinder) และปืนลูกซองเบเนลลี (Benelli) เซมิออโต้ (Semi Auto) ความยาวลำกล้อง 18 นิ้ว ใส่ใช้ แบบอิมพรวฟ ไฮเลนเดอร์ และใช้กระสุนปืนลูกซองของไทย

อาร์ม 9 เมตร ยิงใส่เป้ากระต่ายแข่งสีขาวขนาด 110 x 80 เซนติเมตร โดยจะทำการยิงปืนทั้ง 2 กระบอกครั้งละ 1 นัด ในระยะเดียวกันตามระยะที่กล่าวข้างต้น และทำซ้ำ 3 ครั้ง หลังจากนั้นนับจำนวนรอยรูกระสุนปืนบนเป้าหมายและสังเกตลักษณะรูบนเป้าหมาย แล้วสร้างวงกลมที่เล็กที่สุดล้อมรอบกลุ่มกระสุนปืนทั้งหมด



ภาพที่ 2 การยิงปืนตามระยะที่กำหนด

หลังจากนั้นทำการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลมการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกของ 9 เม็ด เพื่อหาพื้นที่การกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกของ 9 เม็ดของการยิงแต่ละครั้ง โดยใช้สูตรการคำนวณพื้นที่วงกลมในการพิจารณา ในการยิงปืนแต่ละครั้งผู้ยิงจะเป็นคนเดิมทุกครั้ง ทำการทดสอบยิงปืนในวันเดียวกันทุกครั้งและทำการยิงอย่างต่อเนื่องทุกระยะการยิง

5. ผลการศึกษา

5.1 ผลการศึกษารูปแบบการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกของ 9 เม็ด เมื่อยิงด้วยปืนลูกของเรมิงตันรุ่น 870 และปืนลูกของเบนลลี

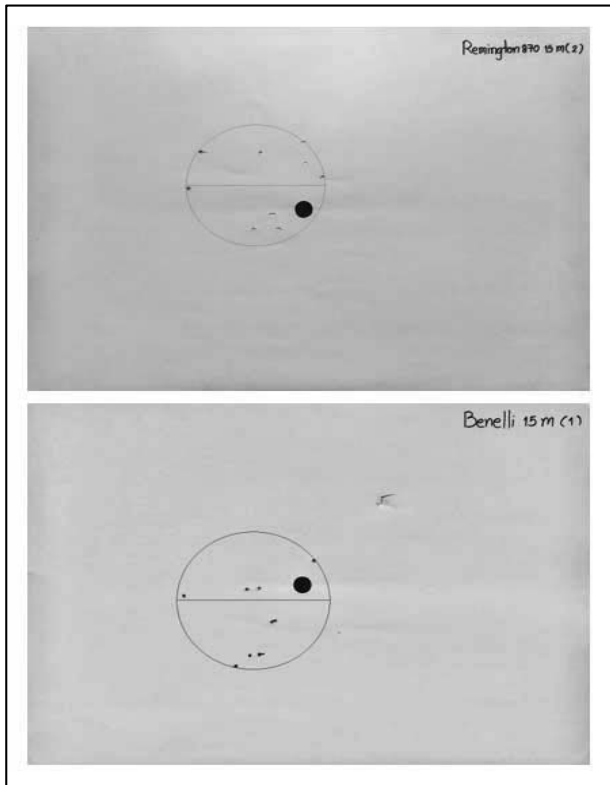
พบว่าลักษณะรูปแบบของกลุ่มกระสุนปืนลูกของกระจัดกระจายไม่มีรูปแบบที่แน่นอน เนื่องจากเมื่อวิเคราะห์กระสุนปืนลูกของ 9 เม็ด ที่บรรจุอยู่ในปลอกกระสุนเดียวกัน จากกล่องเดียวกันลือตเดียวกันกับกระสุน

ที่ใช้ยิงทดสอบ พบว่าลักษณะของลูกกระสุนปืนลูกปรายจำนวน 9 ลูกมีลักษณะกลม ผิวไม่เรียบและลูกกระสุนทั้ง 9 ลูก มีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เท่ากันเนื่องมาจากการควบคุมมาตรฐานในการผลิต ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกระสุนปืนลูกของ 9 เม็ด

กระสุนปืน ลูกของเม็ดเงิน	วัดครั้งที่ 1 (มิลลิเมตร)	วัดครั้งที่ 2 (มิลลิเมตร)	วัดครั้งที่ 3 (มิลลิเมตร)
1	8.52	8.42	8.53
2	8.40	8.69	8.65
3	8.60	8.58	8.52
4	8.32	8.44	8.39
5	8.45	8.44	8.56
6	8.56	8.38	8.50
7	8.40	8.49	8.45
8	8.47	8.59	8.36
9	8.56	8.45	8.36

จากตารางที่ 1 เมื่อวิเคราะห์ลักษณะของกระสุนปืนลูกของทั้ง 9 เม็ด เห็นว่าลักษณะของลูกกระสุนที่มีลักษณะกลม ผิวไม่เรียบ เมื่อทำการยิงปืนโดยใช้กระสุนลักษณะดังกล่าว ออกจากกระบอกปืนแล้วนั้น ทำให้ลูกกระสุนเกิดการสั่นสะเทือน เกิดการกระทบกัน เมื่อผิวกระสุนไม่เรียบจึงทำให้เกิดการกระจายแบบไร้ทิศทาง ส่งผลให้กลุ่มกระสุนปืนที่ปรากฏบนเป้าหมายมีรูปแบบการกระจายที่ไม่แน่นอน ดังภาพที่ 3



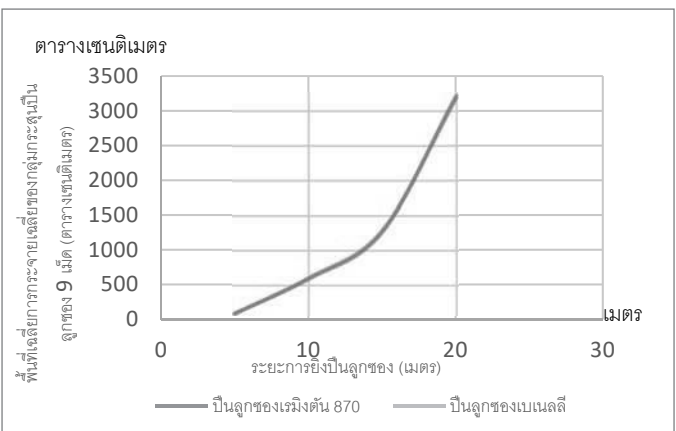
ภาพที่ 3 ตัวอย่างกลุ่มกระสุนปืนที่ปรากฏบนเป้ายิงกระต่าย

5.2 ผลการเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จากการยิงปืนลูกซองที่มีความยาวลำกล้อง 20 นิ้ว และความยาวลำกล้อง 18 นิ้ว ใส่ใช้คแบบอิมพรัฟ ไฮเลนเดอร์แบบเดียวกัน

ในระยะยิงห่างจากเป้ายิงกระต่าย 5 10 15 และ 20 เมตร พบว่าปืนลูกซองทั้ง 2 กระบอก เมื่อทำการยิงปืนที่ระยะห่างจากเป้ายิงพื้นที่การกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด เพิ่มมากขึ้นตามระยะยิงที่เพิ่มขึ้นให้ผลไม่แตกต่างกัน ดังที่ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จากการยิงปืนลูกซองของเรมิงตันรุ่น 870 และปืนลูกซองเบเนลลี

ระยะยิงปืนลูกซอง	ปืนลูกซองเรมิงตันรุ่น 870 (เซนติเมตร)	ปืนลูกซองเบเนลลี (เซนติเมตร)	พื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด (เซนติเมตร)
5 ม.	88.3771	89.6971	89.0371
10 ม.	588.9924	601.3124	595.1524
15 ม.	1,266.5505	1,287.3667	1,276.9586
20 ม.	3,225.2629	3,187.1609	3,206.2119



ภาพที่ 4 เปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จากการยิงปืนลูกซองลูกซองเรมิงตันรุ่น 870 และปืนลูกซองเบเนลลี

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบพื้นที่การกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จากการยิงปืนลูกซองเรมิงตันรุ่น 870 และปืนลูกซองเบเนลลี ในระยะยิงห่างจากเป้ายิงกระต่าย 5, 10, 15 และ 20 เมตร โดยปืนทั้ง 2 กระบอก มีความยาวลำกล้องต่างกัน 2 นิ้ว ใส่ใช้คแบบอิมพรัฟ ไฮเลนเดอร์แบบเดียวกัน พบว่าปืนลูกซองทั้ง 2 กระบอกเมื่อทำการยิงปืนที่ระยะห่างจากเป้ายิง

พื้นที่การกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด เพิ่มขึ้นตามระยะยิงที่เพิ่มขึ้นให้ผลไม่แตกต่างกัน ภาพที่ 4

จากการเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จากการยิงปืนลูกซองเรมิงตันรุ่น 870 ประเภทปั๊มแอกชั่นที่มีความยาวลำกล้อง 20 นิ้ว และปืนลูกซองเบนเนลลี ประเภทเซมโอดโต้ ที่มีความยาวลำกล้อง 18 นิ้ว ใส่ไส้คแบบอิมพรัฟ ไซเลนเดอร์แบบเดียวกัน พบว่าอาวุธปืนลูกซองที่มีความยาวลำกล้องต่างกัน ใส่ไส้คชนิดเดียวกัน มีพื้นที่เฉลี่ยของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด ไม่แตกต่างกัน $t=0.001$ $Sig=0.999$ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จากการยิงปืนลูกซองที่มีความยาวลำกล้องต่างกันใส่ไส้คแบบอิมพรัฟ ไซเลนเดอร์แบบเดียวกัน โดยใช้ปืนลูกซองเรมิงตัน รุ่น 870 ประเภทปั๊มแอกชั่น และปืนลูกซองเบนเนลลี ประเภทเซมโอดโต้

ปืนลูกซอง	\bar{x}	S.D.	t	Sig.
ปืนลูกซองที่มีความยาวลำกล้อง 20 นิ้ว	1292.30	1376.12	0.001	0.999
ปืนลูกซองที่มีความยาวลำกล้อง 18 นิ้ว	1291.38	1355.76		

จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบสมมติฐาน โดยใช้ t-Test พบว่า ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.999 ซึ่งมากกว่า 0.050 แสดงว่าปืนลูกซองที่นำมาเปรียบเทียบกันยิงในระยะเดียวกัน ให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน

5.3 การเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จำแนกตามระยะยิงปืนลูกซองห่างจากเป้ายิง และประเภทของอาวุธปืน

5.3.1 จากการเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จำแนกตามระยะยิงปืนลูกซองห่างจากเป้ายิง พบว่าระยะยิงปืนลูกซองห่างจากเป้ายิงที่แตกต่างกัน มีพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (ค่า $F=14643.110$ ค่า $Sig.=0.000$) โดยเมื่อมีการยิงปืนในระยะห่างที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดพื้นที่การกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซองเพิ่มมากขึ้น ในการวิจัยครั้งนี้พบว่าในการยิงปืนลูกซองในระยะ 5 เมตร มีพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 89.0371 ตารางเซนติเมตร ในการยิงปืนลูกซองในระยะ 10 เมตร มีพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 595.1524 ตารางเซนติเมตร ในการยิงปืนลูกซองในระยะ 15 เมตร มีพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 1,276.9586 และในการยิงปืนลูกซองระยะ 20 เมตร มีพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 3,206.2119 ตารางเซนติเมตร จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าเฉลี่ยมีค่าแตกต่างกันก็จะทำให้ค่า Sig. มีค่าต่ำลง และทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างตัวแปรมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4

เมื่อทำการเปรียบเทียบรายคู่ด้วยวิธีการของ Scheffe เพื่อเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จำแนกตามระยะยิงปืนลูกซองห่างจากเป้ายิง พบว่าระยะยิงปืนลูกซองห่างจากเป้ายิงมีความแตกต่างกันทุกคู่ คือยังมีการยิงปืนในระยะห่างที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดพื้นที่การกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซองเพิ่มมากขึ้น ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานการเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จำแนกตามระยะยิงปืนลูกซองห่างจากเป้ายิง

ระยะยิงปืนลูกซองห่างจากเป้ายิง	\bar{x} ตาราง เซนติเมตร	S.D.	F	Sig.
5 เมตร	89.04	0.933	14643.110	0.000*
10 เมตร	595.15	8.712		
15 เมตร	1,276.96	14.719		
20 เมตร	3,206.21	26.942		

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบรายคู่ด้วยวิธีการของ Scheffe เพื่อเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จำแนกตามระยะยิงปืนลูกซองห่างจากเป้ายิง

ระยะยิงปืนลูกซองห่างจากเป้ายิง	\bar{x}	5 เมตร	10 เมตร	15 เมตร	20 เมตร
5 เมตร	89.04	-	-506.12*	-1187.92*	-3117.17*
10 เมตร	595.15	-	-	-681.81*	-2611.06*
15 เมตร	1,276.96	-	-	-	-1929.25*
20 เมตร	3,206.21	-	-	-	-

* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

5.3.2 จากการเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จากการยิงปืนลูกซองเรมิงตันรุ่น 870 มีความยาวลำกล้อง 20 นิ้ว ประเภทปั๊มแอกชั่น และปืนลูกซองเบเนลลี มีความยาวลำกล้อง 18 นิ้ว ประเภทเซมโอดโต้ พบว่า อาวุธปืนลูกซองที่ทั้ง 2 ประเภทมีพื้นที่เฉลี่ยของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด ไม่แตกต่างกัน ($t=0.001$ Sig=0.999) จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกัน จะทำให้ค่า Sig. มีค่ามากขึ้นและผลการทดลองของทั้ง 2 ตัวแปร จึงไม่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จากการยิงปืนลูกซองประเภทปั๊มแอกชั่น และปืนลูกซองประเภทเซมโอดโต้ โดยใช้ปืนลูกซองเรมิงตันรุ่น 870 มีความยาวลำกล้อง 20 นิ้ว และปืนลูกซองเบเนลลี มีความยาวลำกล้อง 18 นิ้ว

ระยะยิงปืนลูกซองห่างจากเป้ายิง	\bar{x}	S.D.	t	Sig.
ปืนลูกซองประเภทปั๊มแอกชั่น	1292.30	1376.12	0.001	0.999
ปืนลูกซองประเภทเซมโอดโต้	1291.38	1355.76		

6. สรุปและอภิปรายผล

6.1 จากการวิเคราะห์รูปแบบการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด เมื่อยิงด้วยปืนลูกซองเรมิงตันรุ่น 870 และปืนลูกซองเบเนลลี เมื่อสังเกตรูปแบบการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด บนเป้ายิงกระดานพบว่า กลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด กระจัดกระจายไม่มีรูปแบบที่แน่นอน และเมื่อผ่าลูกกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด ออกพบลูกปรายบรรจุอยู่ภายในจำนวน 9 เม็ด แต่ละเม็ดมีลักษณะกลมผิวไม่เรียบ ดังนั้นจึงทำให้เกิดการกระจายแบบไร้ทิศทาง ส่งผลให้กลุ่มกระสุนปืนที่ปรากฏบนเป้ายิงมีรูปแบบการกระจายที่ไม่แน่นอน

6.2 จากการศึกษาเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จากการยิงปืนลูกซองที่มีความยาวลำกล้อง 20 นิ้ว และความยาวลำกล้อง 18 นิ้ว ใส่ใช้คแบบอิมพรัฟไฟเลนเดอร์แบบเดียวกัน โดยใช้อาวุธปืนลูกซองเรมิงตันรุ่น 870 ความยาวลำกล้อง 20 นิ้ว และปืนลูกซองเบนลลี ความยาวลำกล้อง 18 นิ้ว โดยปืนทั้ง 2 กระบอกใส่ใช้คแบบอิมพรัฟไฟเลนเดอร์ ทำการยิงด้วยกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด เมื่อหาพื้นที่การกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด โดยทำวิธีวาดวงกลมล้อมรอบกลุ่มกระสุนปืนลูกซองทั้งหมด แล้ววัดเส้นผ่าศูนย์กลางเพื่อนำไปคำนวณหาพื้นที่การกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด พบว่าอาวุธปืนลูกซองที่มีความยาวลำกล้องต่างกันใส่ใช้คชนิดเดียวกันมีพื้นที่เฉลี่ยของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด ไม่แตกต่างกัน ($t=0.001$ Sig=0.999)

6.3 จากการศึกษาเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จำแนกตามระยะยิงปืนลูกซองห่างจากเป้ายิง โดยยิงปืนลูกซองห่างจากเป้ายิงแตกต่างกัน คือ ทำการยิงปืนลูกซองในระยะ 5, 10, 15 และ 20 เมตร พบว่าในการยิงปืนลูกซองในระยะ 5 เมตร มีพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 89.0371 ตารางเซนติเมตร ในการยิงปืนลูกซองในระยะ 10 เมตร มีพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 595.1524 ตารางเซนติเมตร ในการยิงปืนลูกซองในระยะ 15 เมตร มีพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 1,276.9586 ตารางเซนติเมตร และในการยิงปืนลูกซองในระยะ 20 เมตร มีพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 3,206.2119 ตารางเซนติเมตร เมื่อทำการทดสอบสมมติฐาน พบว่าเมื่อมีการยิงปืนในระยะห่างที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดพื้นที่การกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซองเพิ่มมากขึ้น โดยระยะยิงปืนลูกซองห่างจากเป้ายิงที่แตกต่างกัน มีพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 (ค่า $F=14643.110$

ค่า Sig.=0.000) จะเห็นได้ว่าหากค่าเฉลี่ยของการยิงมีค่าน้อยหรือการยิงระยะใกล้จะทำให้สามารถเก็บรวบรวมหลักฐานได้มากขึ้น แต่เมื่อมีการยิงระยะการไกลเกิดขึ้น ค่าเฉลี่ยก็จะมากขึ้น จึงหมายถึงว่าเจ้าหน้าที่เก็บรวบรวมหลักฐานจากการกระจายของกลุ่มกระสุนปืน ต้องเพิ่มระยะทางหรือขยายพื้นที่ในการเก็บรวบรวมหลักฐานออกไปไกลขึ้น ดังนั้น การยิงระยะใกล้จะส่งผลสำเร็จในการเก็บรวบรวมหลักฐานมากกว่าการยิงระยะไกล จึงทำให้ค่า Sig. มีค่าน้อยลง

6.4 จากการศึกษาเปรียบเทียบพื้นที่เฉลี่ยการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด จำแนกตามประเภทของอาวุธปืน โดยใช้อาวุธปืนลูกซองเรมิงตันรุ่น 870 ประเภทปั๊มแอกชั่น และปืนลูกซองเบนลลี ประเภทเซมโอดโต้ ทำการยิงด้วยกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด เมื่อหาพื้นที่การกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด พบว่าอาวุธปืนลูกซองที่ทั้ง 2 ประเภทมีพื้นที่เฉลี่ยของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ด ไม่แตกต่างกัน ($t=0.001$ Sig=0.999) จะเห็นได้ว่าการยิงปืนลูกซองทั้ง 2 ประเภทไม่สามารถกำหนดพื้นที่ในการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนลูกซอง 9 เม็ดได้ เพราะไม่ว่าจะยิงด้วยปืนประเภทใดก็ทำให้ค่าเฉลี่ยของพื้นที่ไม่แตกต่างกัน ดังนั้น เมื่อมีเหตุการณ์ยิงกันเกิดขึ้น เจ้าหน้าที่ผู้เก็บรวบรวมพยานหลักฐานไม่ควรเสียเวลาในการหาพื้นที่เฉลี่ยของปืนทั้ง 2 ประเภทนี้ แต่ควรมุ่งไปยังการตรวจสอบระยะการยิงที่ทำให้เกิดการกระจายของกลุ่มกระสุนปืนแตกต่างกัน

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณทรงศักดิ์ วงษ์สถาปนา-เลิศ และบุคลากรสนามยิงปืนสโมสรตำรวจ สังกัดกองบัญชาการตำรวจสันติบาล สำนักงานตำรวจแห่งชาติ ที่สนับสนุนอาวุธปืนลูกซองและเครื่องกระสุน อีกทั้งยังช่วยเหลือเป็นผู้ทำการยิงปืน สำหรับการทำวิทยานิพนธ์

8. เอกสารอ้างอิง

- (1) คำพิพากษาคดีฉบับเต็มคดีเลือดดำ (21 มีนาคม 2562) "พราน" เป็นคนยิง-ฆ่าและ "เปรมชัย" ให้ปืนใช้, โพสต์ทูเดย์, (Online). แหล่งที่มา: <https://www.posttoday.com/social/general/583959>
<http://www.scdc6.forensic.police.go.th/images/file/web.pdf>.
- (2) ระบบสารสนเทศสถานีตำรวจ, สำนักงานตำรวจแห่งชาติ "สถิติฐานความผิดคดีอาญา (คดี 4 กลุ่ม) หน่วยงานทั่วประเทศ," 2563, (Online). แหล่งที่มา: <http://pitc.police.go.th/dirlist>
- (3) วิสูตร พันธุ์แก้ว, "การศึกษารูปแบบการกระจายของกลุ่มลูกกระสุนปราย รูปแบบของรอยรูของลูกกระสุนปรายกระสุนปืนลูกซอง และ Gun Shot Residue (GSR) ที่มองเห็นด้วยตาเปล่า จากการยิงปืนพกลูกซอง ประกอบขึ้นเอง ขนาด 12 ที่พบในเขตพื้นที่ภาคเหนือตอนล่าง," 2560, แหล่งที่มา: วิทยานิพนธ์.
- (4) อัยการรู้ไหม... เมืองไทยมีปืนถูกกฎหมายกี่กระบอก?, สำนักข่าวอิศรา, 2555, (Online). แหล่งที่มา: <https://www.isranews.org/isranews-scoop/18106-gun.html>.
- (5) M. M. Arslan, H. Kar, B. Üner, G. Çetin, "Firing distance estimates with pellet dispersion from shotgun with various chokes: an experimental, comparative study," *Journal of forensic sciences*, vol. 56, no. 4, pp. 988–992, 2011.
- (6) I. Cakir, G. Cetin, H. B. Uner, E. Albek, "Shot range estimation based on pellet distribution in shots with a pump-action shotgun," *Forensic science international*, vol. 132, no. 3, pp. 211–215, 2003.
- (7) M. Ghadipasha, F. Najari, A. Alimohammadi, M. Khalizaden, "Spreading Pellets in Hitting Bullet of Shotgun from Close Distance: A Case Report and Review of the Literature" *Iranian Red Crescent Medical Journal*, vol. 20, no. 4, pp. 5, 2018.
- (8) A. Plebe, D. Compagnini, "Estimating shot distance from limited pellets pattern," *Forensic science international*, vol. 222, no. 1-3, pp. 124–131, 2012.

การศึกษาการใช้วัสดุผสมของพอลิโพรพิลีนและใยมะพร้าวเป็นวัสดุทดแทนไม้

Study of Polypropylene and Coconut Fiber Powder Composite as a Wood Replacing Material

นาวาอากาศเอกหญิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สันสนีย์ เหมาคม¹

Group Captain Assistant Professor Sansanee Haemakom¹

นาวาอากาศตรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โชคชัย แจ่มอำพร^{2*}

Squadron Leader Assistant Professor Chokchai Chamamporn^{2*}

¹กองส่งเสริมและพัฒนางานวิจัย โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

171/1 ถ.พลโยธิน แขวงคลองถนน เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร 10220

¹Support and Research Division, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

171/1 Phahonyothin Rd. Klongthanon, Saimai, Bangkok 10220

^{2*}อาจารย์กองการศึกษา ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทางการทหาร โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

171/1 ถ.พลโยธิน แขวงคลองถนน เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร 10220

^{2*}Lecturer, Material Science and Engineering Department, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal

Air Force Academy, 171/1 Phahonyothin Rd. Klongthanon, Saimai, Bangkok 10220

*Corresponding Author. E-mail : bakiuta@gmail.com

(Received: May 8, 2020, Accepted: July 3, 2020)

บทคัดย่อ : งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการผลิตวัสดุทดแทนไม้จากพลาสติกพอลิโพรพิลีนและวัสดุจากธรรมชาติคือ ใยมะพร้าว รวมทั้งสารคู่ควบคือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟเทตพอลิโพรพิลีน นำมาผสมรวมกันด้วยอัตราส่วนของ พอลิโพรพิลีน : สารคู่ควบ : ใยมะพร้าวเป็น 3 แบบ ได้แก่ 50 : 5 : 45, 60 : 5 : 35, 70 : 5 : 25 และใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเพื่อให้ได้แผ่นไม้พลาสติกตามต้องการ ซึ่งจากการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลตามมาตรฐาน ASTM พบว่าที่อัตราส่วน 70 : 5 : 25 จะมีความเหมาะสมมากที่สุดทั้งในด้านสมบัติทางกายภาพและทางกล ซึ่งประกอบด้วย 1) การดูดความชื้นต่ำมีค่า 1.67% 2) ความหนาแน่น 0.87 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร 3) การพองตัวตามความหนา เพียง 1.99% 4) มีความแข็งแรงสูงตามค่ามอดูลัสการแตกหัก 24.49 MPa และ 5) ความต้านแรงดึง 23.86 kgf/cm² ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้เป็นทางเลือกในการเป็นวัสดุทดแทนไม้ในการตกแต่งได้ดี แต่ยังมีข้อด้อยในด้านของความสวยงาม และความแข็งแรงที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งในการประยุกต์ใช้จะต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับประเภทของงานที่นำไปใช้ และหากต้องการคุณสมบัติที่ดีขึ้น จะต้องนำไปทำการวิจัยต่อยอดและพัฒนาให้ได้วัสดุที่ดีขึ้นต่อไป

คำสำคัญ : ใยมะพร้าว พอลิโพรพิลีน วัสดุทดแทนไม้

Abstract : This research is a study on the production of wood substitute materials from polypropylene plastic and natural materials, namely coconut fiber powder. Including the coupled substance is Maleic anhydride grafted polypropylene mixed together with the ratio of polypropylene: co-additives: coconut fiber powder into 3 types which are 50: 5: 45, 60: 5: 35, 70: 5: 25 and using hot extrusion process. In order to get the plastic sheet as needed according to the ASTM standard physical and mechanical properties, it is found that the ratio 70: 5: 25 is the most suitable for both physical and mechanical properties consisting of 1) low hygroscopicity with 1.67% 2) density of 0.87 grams/cubic centimeter 3) swelling by thickness of only 1.99% 4) high strength according to modulus of fracture at 24.49 MPa and 5) Tensile strength 23.86 kgf/cm², respectively. Therefore, it can be used as an alternative to wood as a substitute for decoration. But there are still disadvantages in terms of beauty and hardness that is not very high. In which the application must be considered to be suitable for the type of work used and if you want a better qualification, you will have to research and develop this for getting better material.

Keywords : Coconut Fiber Powder, Polypropylene, Wood Replacing Material

1. บทนำ

การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความต้องการใช้ไม้เพื่อการปลูกสร้างบ้านเรือนหรือการทำเฟอร์นิเจอร์ ซึ่งจากข้อมูลพื้นที่ป่าไม้ของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2550 มีเหลืออยู่เพียง 172,185.28 ตารางกิโลเมตร คิดเป็น 33.34% [1] ในขณะที่ส่วนใหญ่ยังนิยมนำไม้มาใช้ในการก่อสร้างและตกแต่งเพราะมีความสวยงามและให้ความรู้สึกเหมือนอยู่ในธรรมชาติ [2] รวมทั้งการปลูกป่าทั้งของภาครัฐและเอกชนยังไม่สนองต่อความต้องการใช้ไม้ที่มีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงต้องมีการวิจัยและพัฒนาเพื่อหาวัสดุมาใช้ทดแทนไม้ธรรมชาติซึ่งจะสอดคล้องกับนโยบายที่เป็นยุทธศาสตร์แห่งชาติในเรื่องการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ที่มุ่งเน้นในการหาวัสดุทดแทนไม้ด้วยการนำเศษพืชเหลือใช้ทางการเกษตรกรรม วัชพืช หรือจากอุตสาหกรรมทำไม้ เช่น ขี้เลื่อยและวัสดุของเสียอื่นๆ มาอัดขึ้นแผ่นโดยใช้กาวเป็นตัวเชื่อมประสาน แต่วัสดุชนิดใหม่เหล่านี้จะสามารถนำไปใช้งานได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากยังไม่มี ความสวยงาม แข็งแรง และทนทานเพียงพอ [3] ต่อมาจึงได้มีการนำวัสดุอื่น เช่น ซีเมนต์หรือพลาสติกชนิดต่างๆ มาผสมกับเศษพืชแล้วนำไปอัดเป็นแผ่น เพื่อให้ได้วัสดุทดแทนไม้ที่มีความแข็งแรงทนทานมากขึ้น ในขณะเดียวกันยังคงรักษาบุคลิกภาพความสวยงามที่คล้ายคลึงกับไม้ไว้ได้อีกด้วย [4]

เนื่องจากในทุกภูมิภาคของประเทศไทยจะมีอุตสาหกรรมเกี่ยวกับมะพร้าวอยู่เป็นจำนวนมากและของเหลือคือกาบมะพร้าวจะถูกนำไปทิ้งหรือแปรรูปเป็นปุ๋ยอินทรีย์ แต่ด้วยปริมาณที่มีอยู่เป็นจำนวนมากจึงทำให้เกิดปัญหาในการเผาทำลายทิ้ง รวมทั้งจะเกิดมลพิษทางอากาศเป็นจำนวนมาก สำหรับเม็ดพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนจะสามารถหาได้ง่ายและมีอยู่แล้วเป็นจำนวนมาก ทำให้เป็นการประหยัดหากมีการนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ด้วยการนำมาทำเป็นวัสดุผสมของใยมะพร้าวและพอลิโพรพิลีนทดแทนไม้

ไม่มีประโยชน์อย่างมากในงานวิศวกรรมโยธาซึ่งส่วนใหญ่เป็นไม้เนื้อแข็งมาใช้เพื่อการก่อสร้างทั้งในส่วน ของโครงสร้างหลักและโครงสร้างรอง รวมทั้งในงาน ตกแต่ง ปัจจุบันไม้มีปริมาณน้อยลงและมีราคาสูงขึ้นมาก ดังนั้นจึงมีการผลิตวัสดุทดแทนไม้ เพื่อให้ได้วัสดุชนิดใหม่ที่มีลักษณะคล้ายไม้จริง ถึงแม้ว่าวัสดุทดแทนไม้อาจมีสมบัติทางกำลังด้านวิศวกรรมบางประการด้อยกว่าไม้จริง แต่ก็มีสมบัติอยู่หลายประการที่มีความโดดเด่นกว่า เช่น มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่มีสภาพการกัดกร่อนรุนแรง เช่น น้ำทะเล และน้ำเสีย ไม่ดูดซึมน้ำ ไม่มีการเสียหายเนื่องจากปลวก ไม่มีปัญหาเรื่องการขยายตัว ทนต่อการผุพังเนื่องจากความชื้นและเชื้อรา และสามารถผลิตหน้าตัดเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ตามต้องการ สามารถนำมาใช้ทดแทนไม้จริงในส่วนของงานตกแต่งและงานพื้น โดยกระบวนการผลิตจะมีการทดลองผสมในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อให้ได้สมบัติตามมาตรฐาน เช่น ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงทางวิศวกรรม เป็นต้น [5] และคาดว่าในปี พ.ศ. 2563 จะมีความต้องการแผ่นไม้เทียมไม่น้อยกว่า 2.0 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยเฉพาะแผ่นไม้อัดเทียมชนิดแผ่นใยไม้ความหนาแน่นปานกลางซึ่งเป็นแผ่นใยไม้อัดชนิดอัดแน่น นำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมวัสดุ ก่อสร้างและตกแต่งเพราะมีต้นทุนต่ำ ทนทาน และสามารถนำไปใช้ได้อย่างแพร่หลาย ซึ่งจะช่วยเพิ่มมูลค่าและลดการตัดไม้ทำลายป่าได้เป็นอย่างดี [6]

งานวิจัยนี้คือการนำเอาวัสดุที่ทิ้งแล้ว คือ ใยมะพร้าว และเม็ดพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน โดยการนำมาแปรรูปเป็นวัสดุผสม เพื่อใช้สำหรับทำวัสดุทดแทนไม้และส่งเสริมในการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมซึ่งผลจากการวิจัยนี้สามารถนำไปขยายผลเชิงพาณิชย์ได้เพราะเป็นการสร้างนวัตกรรม การผลิตที่สำคัญในอนาคตให้กับธุรกิจอุตสาหกรรมในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ทันต่อความต้องการทางด้าน เศรษฐกิจและสังคม และการเมือง เพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการสร้างความเจริญให้กับระบบเศรษฐกิจ สังคม และประเทศชาติ ต่อไป

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการใช้วัสดุผสมจากใยมะพร้าว ผงพอลิโพรพิลีนและสารคู่ควบเป็นวัสดุทดแทนไม้ โดยการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของแผ่นไม้พลาสติก ตามมาตรฐาน ASTM D 7031-04 [7]

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุทดแทนไม้ คือ วัสดุประกอบจากส่วนประกอบ 2 ชนิดขึ้นไป โดยมีวัสดุไม้เป็นส่วนประกอบหนึ่งร่วมกับวัสดุอื่น เช่น พอลิเมอร์ หรือสารอินทรีย์ มาผลิตจนได้ผิวสัมผัส สี สัน และลักษณะรูปร่างที่ใกล้เคียงกับไม้จริง โดยส่วนประกอบแต่ละชนิดจะต้องแสดงสมบัติของแต่ละส่วนแยกกันอย่างชัดเจน ซึ่งช่วยแก้ปัญหาบางประการที่ก้าวข้ามขีดจำกัดของไม้ เช่น ความชื้น ความร้อน ปลวก และแมลงต่างๆ โดยวัสดุทดแทนไม้ประเภทไม้พลาสติกหมายถึง วัสดุผสมที่มีไม้และพลาสติกเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีไม้เป็นสารตัวเติมและมีพลาสติกเป็นตัวเชื่อมประสานซึ่งพลาสติกอาจเป็นได้ทั้งแบบเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต อาจเติมสารเติมแต่งต่างๆ เพื่อให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน [8]

จากการศึกษาสมบัติทางกลและทางกายภาพของเส้นใยธรรมชาติและพอลิโพรพิลีน Patharee Kamthita (2015) ได้ศึกษาสมบัติกายภาพและเชิงกลของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตเสริมแรงด้วย เส้นใยจากผักตบชวาและเส้นใยเยื่อกระดาษด้วยเทคนิคการละลายและตกตะกอน โดยใช้ตัวทำละลายพาราไซลีนละลายพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ผสมกับเส้นใย 10-40 % โดยน้ำหนัก ลอดอุณหภูมิเพื่อตกตะกอนและขึ้นรูปแผ่นด้วยเครื่องบีบอัด ผลการวิจัยพบว่า พอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่ผสมเส้นใยจากผักตบชวาและเยื่อกระดาษ มีสมบัติทางกายภาพ ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับผลทดสอบทางกลพบว่า พอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่ผสมเส้นใยจากผักตบชวา มีสมบัติดีกว่าเส้นใยเยื่อกระดาษ ซึ่งพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

ที่มีปริมาณของเส้นใยผักตบชวาประมาณ 10-20% โดยน้ำหนัก จะมีความต้านทานต่อแรงกระแทกและการตัดโค้งลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ที่ไม่ผสมเส้นใย ในขณะที่ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยทำให้วัสดุคอมพอสิตมีความแข็งแรงตึงมากขึ้น [9] และจากการศึกษาสมบัติทางกลของพอลิโพรพิลีนโดยการเติมแก้วกลบพบว่า ปริมาณการเพิ่มขึ้นของแก้วกลบส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงตึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของพอลิโพรพิลีนผสมแก้วกลบมีค่าลดลง จึงส่งผลให้ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มตามปริมาณการเติมแก้วกลบที่เพิ่มขึ้น [10]

Jintana Suksawat และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาไม้พลาสติก จากพลาสติกพอลิโพรพิลีน และเส้นใยธรรมชาติที่เป็นเศษเหลือจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เส้นใยทะลายปาล์มเปล่า และเส้นใยทางใบ โดยควบคุมอัตราส่วนพอลิโพรพิลีนต่อเส้นใย 50:50 จากนั้นนำไปศึกษาสมบัติเชิงกล ซึ่งเติมสารช่วยผสมพอลิโพรพิลีนต่อกึ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (0-3% โดยน้ำหนัก) เป็นสารคู่ควบจากผลการทดลองพบว่าไม้พลาสติกที่เตรียมสารพอลิโพรพิลีนต่อกึ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (0-3% โดยน้ำหนัก) เป็นสารคู่ควบ ช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลโค้งงอเฉพาะไม้พลาสติกที่เตรียมจากเส้นใยทะลายปาล์มทางใบ และจากการศึกษาสัญญาณวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า เส้นใยทะลายปาล์มทางใบมีลักษณะผิวขรุขระ เป็นเส้นสม่ำเสมอและมีการยึดเกาะที่ดีกับพลาสติกพอลิโพรพิลีนมากกว่าเส้นใยทะลายปาล์มเปล่า [11] และจากการศึกษาของ กุศยา สุวรรณวิทย์ และคณะ (2556) โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อหาวัสดุทดแทนไม้จากการนำใบสนคาริเปียและขวดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ที่ผ่านการใช้แล้วมาทำเป็นวัสดุผสมเพื่อใช้ทดแทนไม้ โดยมีมาเลอิกแอนไฮไดรด์ กราฟเทตพอลิเอทิลีน เป็นสารคู่ควบ ซึ่งใช้อัตราส่วน LDPE : สารคู่ควบ : เศษใบสน 65 : 5 : 30 และ 75 : 5 : 20 วัตถุดิบทุกชนิดนำมาบดเป็นผงและผสมให้เข้ากัน

แล้วนำมาผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปความร้อนเป็นแผ่นไม้พลาสติกนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลพบว่าแผ่นไม้พลาสติกที่มีอัตราส่วน LDPE : สารคู่ควบ : เศษใบสน 75:5:20 มีสมบัติทั้งทางกายภาพและทางกลที่ดีกว่าอีกอัตราส่วนหนึ่ง ซึ่งไม้พลาสติกของงานวิจัยสามารถนำไปใช้ตกแต่งทำเฟอร์นิเจอร์ที่ไม่ต้องการการรับน้ำหนักมากได้ [12]

สำหรับงานวิจัยนี้จะเน้นการใช้การวัสดุที่ทั้งแล้วนำมาแปรรูปเป็นวัสดุผสมเพื่อใช้สำหรับทำวัสดุทดแทนไม้ โดยการใช้เส้นใยมะพร้าวเป็นเส้นใยหลัก เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวมีลักษณะเส้นใยสั้นมีความเหนียวพอประมาณ ความโค้งงอต่ำ ทนต่อความชื้นและการทำลายของจุลินทรีย์และเชื้อราได้ดี ใยมะพร้าวมีส่วนเซลลูโลสประมาณ 35-37% มีลิกนินและเพนินสูง [13] โดยเลือกมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟเทดพอลิโพรพิลีน (Maleic Anhydride grafted Polypropylene, MAPP) ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 8-10% โดยน้ำหนัก จากบริษัท ออลดริช เคมีสทรี จำกัด เกรดห้องปฏิบัติการเป็นสารคู่ควบ และเลือกใช้เม็ดพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) จากบริษัท เอ็มดีอาร์ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีคุณสมบัติ คือ มีความแข็งแรง ความเปราะและแตกง่ายน้อยกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) และมีความยืดหยุ่นน้อยกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) คงตัวสูงไม่เสียรูปง่าย มีน้ำหนักเบา ซึ่งมีความหนาแน่นน้อย ในช่วง 0.855-0.946 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลวสูง 130-171 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งแรงดึง 29.3-38.6 MPa และเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก [14]

4. วิธีดำเนินการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้วัสดุผสมของใยมะพร้าวและพอลิโพรพิลีนเป็นวัสดุทดแทนไม้ โดยจะเริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบในห้องปฏิบัติการเพื่อคำนวณหาความชื้นและปริมาณของพอลิโพรพิลีนและผงใยมะพร้าวที่จะใช้ต่อแผ่นไม้พลาสติกหนึ่งแผ่น รวมทั้งการเตรียมสารคู่ควบ MAPP ต่อจากนั้นทำการผสมเพื่อขึ้นรูปแผ่นไม้พลาสติก และทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกล โดยมีวิธีการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

4.1 การจัดเตรียมวัตถุดิบ

4.1.1 การเตรียมใยมะพร้าวโดยการล้างใยมะพร้าวด้วยน้ำสะอาดและผึ่งให้แห้ง นำมาเข้าเครื่องบดเพื่อทำให้เป็นผงใยมะพร้าว จากนั้นนำมาหาค่าความชื้นก่อนนำไปใช้อัดขึ้นรูป

4.1.2 การเตรียมผงพอลิโพรพิลีนด้วยการบดด้วยเครื่องบดให้เป็นผงและนำผงที่ได้มาหาค่าความชื้นก่อนนำไปใช้ในการอัดขึ้นรูป

4.1.3 การเตรียมสารคู่ควบโดยนำ MAPP มาบดให้เป็นผงด้วยเครื่องบดและเก็บใส่ถุงพลาสติกกันความชื้นเพื่อนำไปใช้ในการอัดขึ้นรูป

4.1.4 การหาความชื้นของผงใยมะพร้าวและผงพอลิโพรพิลีน

ในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ จะต้องคำนวณปริมาณของผงพอลิโพรพิลีนและผงใยมะพร้าวที่จะใช้ต่อแผ่นไม้พลาสติกหนึ่งแผ่น แต่ต้องมีการคำนวณเพื่อในกรณีที่วัสดุมีการติดอยู่กับภาชนะที่ใช้ผสม เพื่อที่จะนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาน้ำหนักที่แท้จริง โดยมีลำดับขั้นตอนต่อไป คือ

4.1.5 แบ่งผงพอลิโพรพิลีนเป็น 5 ถัง และผงใยมะพร้าว 3 ถัง โดยมีน้ำหนักถังละ 2 กิโลกรัม

4.1.6 สุ่มตัวอย่างจากแต่ละถัง ลงในปิกรเกอร์ที่ชั่งน้ำหนักไว้แล้วแบ่งใส่ จำนวน 3 ใบ ใบละ 10 กรัม แล้วทำสัญลักษณ์ไว้

4.1.7 หาค่าความชื้นโดยนำเข้าสู่ตูบที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อบนานจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ [15]

4.1.8 เมื่อครบ 4 ชั่วโมงแล้วนำบีกเกอร์ออกมาทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4.1.9 นำบีกเกอร์มาชั่งน้ำหนัก จดบันทึกผลที่ได้และหาค่าความชื้น

4.1.10 ทำซ้ำขั้นตอนที่ (4.1.5) - (4.1.7) อีกครั้ง

4.1.11 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการหาความชื้นทั้ง 2 ครั้ง ถ้าความแตกต่างไม่เกิน $\pm 0.1\%$ ถือว่าค่าความชื้นที่ได้เป็นความชื้นของวัตถุดิบ

4.2 การทำไม้พลาสติก

ในการขึ้นรูปไม้พลาสติกในงานวิจัยนี้ มีวัตถุดิบ คือ ผงพอลิโพรพิลีน : MAPP : ผงใยมะพร้าว ซึ่งแบ่งออกเป็นสามอัตราส่วน คือ 50 : 5 : 45, 60 : 5 : 35 และ 70 : 5 : 25 ตามลำดับ ซึ่งแสดงปริมาณอัตราส่วนวัตถุดิบสำหรับแผ่นไม้พลาสติกดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณอัตราส่วนวัตถุดิบสำหรับแผ่นไม้พลาสติก

อัตราส่วน ระหว่างผงพอลิ โพรพิลีน : สารคู่ควบ MAPP : ผงใยมะพร้าว	ปริมาณวัตถุดิบ (กรัม)		
	ผงพอลิ โพรพิลีน	MAPP	ผงใย มะพร้าว
50 : 5 : 45	515	50	465
60 : 5 : 35	615	50	360
70 : 5 : 25	720	50	260

หลังจากเตรียมวัตถุดิบเป็นที่เรียบร้อยแล้วให้นำวัตถุดิบทั้ง 3 อัตราส่วน ใส่ลงภาชนะ แล้วทำการผสมเข้าด้วยกันด้วยมือ และนำไปขึ้นรูปเป็นไม้พลาสติก ในแต่ละอัตราส่วนให้ได้จำนวนอัตราส่วนละ 5 แผ่น ขนาดแผ่นละ 35×35 เซนติเมตรหนา 10 มิลลิเมตร โดยมีวิธีการอัดขึ้นรูปแผ่นไม้พลาสติก ดังนี้

4.2.1 นำแผ่นเหล็กรองอัดมาวางลงบนโต๊ะและวางทับด้วยแผ่นเทฟลอนอีกชั้นเพื่อป้องกันการติดกัน เมื่ออัดแผ่นเสร็จแล้วและนำเหล็กที่เป็นตัวกำหนดขนาดความหนาของแผ่นไม้พลาสติกขนาด 10 มิลลิเมตร วางลงบนแผ่นเหล็กรองอัดแผ่นล่าง และนำกล่องสี่เหลี่ยมโปร่งมาวางครอบบนแผ่นเหล็กเพื่อเป็นกรอบในการโรยวัตถุดิบ

4.2.2 นำส่วนผสมที่ได้จากขั้นตอนที่แล้วโรยในกล่องให้สม่ำเสมอมากที่สุดและใช้แผ่นไม้กดลงบนวัสดุที่โรยลงไป แล้วยกแผ่นไม้ที่กดทับออก นำแผ่นเทฟลอนและแผ่นเหล็กรองอัดปิดทับลงไปตามลำดับ

4.2.3 เปิดเครื่องอัดไม้ (อัดด้วยความร้อน) ยี่ห้อ Burkel รุ่น LA-64 ให้ทำงาน ตั้งอุณหภูมิที่ 220 องศาเซลเซียสและความดัน 200 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตร นำแผ่นไม้พลาสติกที่เตรียมไว้แล้วมาวางบนแท่นอัดไม้ และเปิดสวิทช์เครื่องอัดไม้ด้วยความร้อน เมื่อความดันขึ้นไปถึงความดันที่ตั้งไว้ทำการอัดขึ้นรูปเป็นเวลา 5 นาที และนำแผ่นไม้พลาสติกออกจากเครื่องอัดไม้ด้วยความร้อน

4.2.4 ลอกแผ่นเทฟลอนออกจากแผ่นไม้พลาสติก วางไว้ในอุณหภูมิห้องเพื่อปรับสภาพให้มีการคืนตัวของแผ่นทางด้านความหนา ทำสัญลักษณ์และทิ้งไว้ 7 วัน เพื่อปรับสภาวะก่อนนำไปทดสอบทำซ้ำ จนได้ครบ 15 แผ่น นำแผ่นที่ได้ไปทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกล จำนวนอัตราส่วนละ 3 แผ่น และเก็บไว้เพื่อการเสียหายจากการตัดทดสอบอัตราส่วนละ 2 แผ่น

4.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกล

การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลของแผ่นไม้พลาสติก ตามมาตรฐาน ASTM D 7031-04 (Standard guide for evaluating mechanical and physical properties of wood-plastic composite product) โดยทำการทดสอบ ดังนี้

4.3.1 การทดสอบปริมาณความชื้น โดยการชั่งน้ำหนักของชิ้นทดสอบ 2 ชิ้น ขนาดแต่ละชิ้นเท่ากับ 76.2×38.1 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่โดยชั่ง 2 ครั้งเป็นเวลาห่างกัน 4 ชั่วโมง จะต้องไม่แตกต่างกันเกิน 0.1% ของน้ำหนักของชิ้นทดสอบ และนำมาใส่ในเคชิกเคเตอร์ปล่อยไว้ให้เย็น นำชิ้นทดสอบมาชั่งน้ำหนักหลังอบและทำการจดบันทึก นำค่าที่ได้มาคำนวณตามสูตรปริมาณความชื้น จากสมการ

$$\text{ปริมาณความชื้น} = 100 (I - F) / F \quad (1)$$

เมื่อ

I = น้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (กรัม)

F = น้ำหนักสุดท้ายหลังอบของชิ้นทดสอบ (กรัม)

4.3.2 การทดสอบปริมาณความหนาแน่นของชิ้นงาน โดยการใช้ชิ้นทดสอบ 2 ชิ้น ขนาด แต่ละชิ้นเท่ากับ 76.2×38.1 มิลลิเมตร โดยการนำชิ้นทดสอบไปชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด วัดความกว้างและความยาวของชิ้นทดสอบ ขนานกับขอบแล้วหาค่าเฉลี่ย วัดความหนาของชิ้นทดสอบโดยใช้ไมโครมิเตอร์เป็นตัววัดแล้วหาค่าเฉลี่ยความหนา

4.3.3 การทดสอบหาค่าการพองตัวตามความหนา โดยการใช้ชิ้นทดสอบ 1 ชิ้น ขนาดชิ้นทดสอบเท่ากับ 76.2×38.1 มิลลิเมตร โดยการนำชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบในการหาความชื้นมาใช้ในการหาค่าการพองตัวตามความหนา โดยทำเครื่องหมายตำแหน่งที่วัดความหนาตรงมุมทั้งสี่ ของชิ้นทดสอบโดยวัดเข้ามาจากขอบทั้ง

4 ด้าน ด้านละ 25 มิลลิเมตร วัดความหนาของชิ้นทดสอบก่อนนำไปแช่น้ำ หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบไปแช่น้ำสะอาดที่อุณหภูมิ 20 ± 2 องศาเซลเซียส โดยให้ขอบบนอยู่ใต้ระดับน้ำประมาณ 1 นิ้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำชิ้นจากน้ำและเช็ดชิ้นทดสอบนำไปชั่งน้ำหนักและวัดความหนาที่ตำแหน่งเดิมทันที และนำค่าที่ได้มาหาค่าการพองตัวตามความหนาจากสูตร

$$\% \text{ ค่าการพองตัว} = [(t_2 - t_1) / t_1] \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

t_1 คือ ความหนาของชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ (มิลลิเมตร)

t_2 คือ ความหนาของชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ (มิลลิเมตร)

4.3.4 การทดสอบหาค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและมอดุลัสการแตกร้าว โดยใช้ชิ้นทดสอบ 2 ชิ้น ขนาดแต่ละชิ้นเท่ากับ 40×210 มิลลิเมตร โดยการวางชิ้นทดสอบบนแท่งรองรับที่มีระยะห่าง 15 เท่าของความหนาของชิ้นทดสอบ และต้องไม่น้อยกว่า 150 มิลลิเมตร ให้ปลายยื่นออกไปจากจุดรองรับ ข้างละประมาณ 25 มิลลิเมตร หลังจากนั้นให้แรงกดลงที่จุดกึ่งกลางโดยมีอัตราการเพิ่มแรงกดอย่างสม่ำเสมอ เวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มกดจนกระทั่งชิ้นทดสอบแตกหักต้องไม่น้อยกว่า 30 วินาที แต่ไม่มากกว่า 90 วินาที ซึ่งผลการทดลองจะแสดงออกมาทางคอมพิวเตอร์และสามารถพิมพ์ออกมาเป็นข้อมูลได้

4.3.5 การทดสอบหาค่าความต้านแรงดึง โดยใช้ชิ้นทดสอบ 2 ชิ้น ขนาดชิ้นละ 14×350 มิลลิเมตร มีวิธีการทดลอง คือ ตัดผิวหน้าทั้งสองของชิ้นทดสอบกับแผ่นดิ่ง โดยใช้กาวสังเคราะห์ที่ให้แรงยึดระหว่างชิ้นทดสอบกับแผ่นดิ่งได้มากกว่าแรงยึดตัวในชิ้นทดสอบและนำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้แล้วไปเข้าเครื่องดึง ดึงให้ชิ้นทดสอบแยกออกจากกันโดยอัตราการเพิ่มแรงดึงต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งชิ้นทดสอบแยกออกจากกันต้องไม่น้อยกว่า 10 วินาที แต่ไม่เกิน 10 นาที

5. ผลการศึกษา

5.1 ผลการศึกษาหาค่าความชื้นของวัตถุดิบจากผงใยมะพร้าวและพอลิโพรพิลีนก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นไม้พลาสติก ได้ผลการศึกษาวิจัย ดังนี้

5.1.1 ผลการศึกษาหาค่าความชื้นของผงใยมะพร้าวก่อนนำไปขึ้นรูป มีน้ำหนักก่อนอบเฉลี่ย 27.78 กรัม น้ำหนักหลังอบเฉลี่ย 27.71 กรัม และมีค่าความชื้นเฉลี่ย 0.25% และผลการศึกษาหาค่าความชื้นของผงพอลิโพรพิลีนก่อนนำไปขึ้นรูป มีน้ำหนักก่อนอบเฉลี่ย 10.00 กรัม น้ำหนักหลังอบเฉลี่ย 9.96 กรัม และมีค่าความชื้นเฉลี่ย 0.40% ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการศึกษาหาค่าความชื้นของวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	นน.ก่อนอบเฉลี่ย (กรัม)	นน.หลังอบเฉลี่ย (กรัม)	ความชื้นเฉลี่ย (%)
ผงใยมะพร้าว	27.78	27.71	0.25
ผงพอลิโพรพิลีน	10.00	9.96	0.40

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการพองตัวตามความหนา

ชั้นตัวอย่าง/อัตราส่วน	ความหนาเฉลี่ยก่อนแช่น้ำ (มม.)	ความหนาเฉลี่ยหลังแช่น้ำ (มม.)	การพองตัว (%)
1 50:5:45	10.03	10.27	2.39
2 60:5:35	10.03	10.26	2.29
3 70:5:25	10.03	10.23	1.99

5.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นไม้พลาสติก

5.2.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นไม้พลาสติก เมื่อนำแผ่นไม้พลาสติกที่ขึ้นรูปแล้วทั้งสามอัตราส่วน มาทดสอบสมบัติทางกายภาพ ดังนี้ คือ ผลการทดสอบการพองตัวตามความหนา ดังแสดงในตารางที่ 3 ผลการทดสอบความหนาแน่นและความชื้น ดังแสดงในตารางที่ 4 และในงานวิจัยนี้ได้นำผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองของงานวิจัยอื่นและไม้อัดมาตรฐานความหนาแน่นปานกลางซึ่งมีค่าคุณสมบัติใกล้เคียงกับไม้พลาสติกในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความหนาแน่นและความชื้น

ชั้นตัวอย่าง (อัตราส่วน/ ชั้นทดสอบ)	ความหนาแน่น (กรัม/ซม. ³)	ความชื้น (%)
50:5:45	1 0.83	2.28
	2 0.81	2.30
	3 0.83	2.29
60:5:35	1 0.81	1.92
	2 0.85	1.69
	3 0.83	1.79
70:5:25	1 0.88	1.61
	2 0.86	1.73
	3 0.87	1.66

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของแผ่นไม้พลาสติกแผ่นไม้อัดความหนาแน่นปานกลางและงานวิจัยอื่น

สมบัติทางกายภาพ	1	2	3	4	5
ความชื้น (%)	2.29	1.80	1.67	8.26	-
ความหนาแน่น (กรัม/ซม. ³)	0.82	0.83	0.87	0.94	1.10
การพองตัวตามความหนา (%)	2.39	2.29	1.99	7.83	8.69

หมายเหตุ 1 = PP : MAPP : ผงใยมะพร้าว 50:5:45
 2 = PP : MAPP : ผงใยมะพร้าว 60:5:35
 3 = PP : MAPP : ผงใยมะพร้าว 70:5:25
 4 = แผ่นไม้อัดความหนาแน่นปานกลางชนิดผสมกาไวโอไฮยาเนต 7% [16]
 5 = ไม้พลาสติกที่มีส่วนประกอบคือ ไม้ 64% พอลิโพรพิลีน 25% อื่นๆ 11% [17]

5.3 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของแผ่นไม้พลาสติก

5.3.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของแผ่นไม้พลาสติก เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของงานวิจัยอื่น และไม้อัดมาตรฐานความหนาแน่นปานกลางซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับไม้พลาสติกในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบสมบัติทางกลของแผ่นไม้พลาสติกแผ่นไม้อัดความหนาแน่นปานกลางและงานวิจัยอื่น

สมบัติทางกล	1	2	3	4	5
MOR (MPa)	19.59	21.87	24.49	23.61	10.35-25.53
MOE (MPa)	917.57	898.43	880.27	1756.15	690-1794
ความต้านแรงดึง (kg/cm ²)	11.11	16.52	23.86	-	14.55-130.50

หมายเหตุ 1 = PP : MAPP : ผงใยมะพร้าว 50:5:45
 2 = PP : MAPP : ผงใยมะพร้าว 60:5:35
 3 = PP : MAPP : ผงใยมะพร้าว 70:5:25
 4 = แผ่นไม้อัดความหนาแน่นปานกลางชนิดผสมกาไวโอไฮยาเนต 7%
 5 = ตัวอย่างที่ 1 คือ ไม้พลาสติกที่มีส่วนประกอบคือ ไม้ 64% พอลิโพรพิลีน 25% อื่นๆ 11%

6. สรุปผลและอภิปรายผล

สรุปผลการวิจัยการใช้วัสดุผสมของใยมะพร้าวและพอลิโพรพิลีนเป็นวัสดุทดแทนไม้ มีดังต่อไปนี้

6.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นของผงใยมะพร้าว มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.25% ซึ่งเป็นความชื้นปกติที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นการชั่งน้ำหนักของผงใยมะพร้าวที่มีน้อยก่อนการขึ้นรูปนั้นมีผลต่อสมบัติต่างๆ เพราะเมื่อความชื้นน้อยลงความทนทานต่อแมลงและราจะดีขึ้น และค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น

6.2 ผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นของผงพอลิโพรพิลีน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.40% ซึ่งเป็นความชื้นปกติที่อุณหภูมิห้องซึ่งถือว่าน้อยมาก ดังนั้น การชั่งน้ำหนักก่อนอัดแผ่นจึงไม่ต้องเผื่อเกินเนื่องจากความชื้น นอกจากนี้ความชื้นที่มีน้อยมากมีผลต่อสมบัติต่างๆ เพราะไม้พลาสติกจะมี

ความชื้นที่น้อย เมื่อเทียบกับไม้ทั่วไป และมีความทนทาน ต่อแมลงและกันเชื้อราได้ดีกว่า

6.3 ผลวิเคราะห์ค่าการอัดไม้พลาสติกทุกแผ่นที่ได้ จะใช้กรรมวิธีโรยเยื่อด้วยมือเพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยการอัด ด้วยเครื่องอัดไม้ (อัดด้วยความร้อน) ดังนั้นจึงอาจมีสมบัติ ที่ไม่สม่ำเสมอทั้งแผ่นได้ แผ่นไม้พลาสติกที่ได้มีความหนาในช่วง 0.9-1 เซนติเมตร เมื่อได้รับความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นและใช้เวลานานยิ่งขึ้น ส่วนพลาสติกส่วนเกินนั้น จะไหลออกมาตามรูระบายอากาศของเหล็กกัน ดังนั้น เมื่อ จะทำการขึ้นแผ่นโดยวิธีการอัดขึ้นรูปร้อนนั้นควรจะมีการอุ่นวัตถุดิบก่อนที่จะขึ้นรูป เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาคความ ร้อนกระจายตัวไม่ทั่วชิ้นงานซึ่งมีผลทำให้ชิ้นงานเกิดการ แยกชั้น ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลได้

6.4 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่น ไม้พลาสติกด้วยการหาค่าความหนาแน่นของแผ่นไม้ พลาสติกที่มีอัตราส่วนพอลิโพรพิลีน : MAPP : ผงใยมะพร้าว 50:5:45, 60:5:35 และ 70:5:25 ได้ค่าความหนาแน่น เท่ากับ 0.82, 0.83 และ 0.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้น ตามปริมาณของพอลิโพรพิลีนที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน เนื่องจากไม้พลาสติกที่ผลิตได้เป็นวัสดุคอมพอสิต ที่มีพอลิโพรพิลีนเป็นเมทริกซ์ ซึ่งเป็นวัสดุหลักที่มีความ หนาแน่นมากกว่าส่วนเสริมแรง คือ เส้นใยมะพร้าว ดังนั้น หากปริมาณพอลิโพรพิลีนในอัตราส่วนผสมเพิ่มขึ้นย่อม ส่งผลต่อความหนาแน่นโดยรวมของวัสดุคอมพอสิตที่ได้ สำหรับผลการทดลองค่าความชื้นของแผ่นไม้พลาสติกที่มี อัตราส่วนพอลิโพรพิลีน : MAPP : ผงใยมะพร้าว 50:5:45, 60:5:35 และ 70:5:25 มีความชื้น 2.29%, 1.80% และ 1.67% ตามลำดับ ซึ่งทุกค่ามีความชื้นอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง พบว่าไม้พลาสติกนี้มีความชื้นน้อยกว่ามาก ซึ่งแสดงถึง แนวโน้มของการเกิดเชื้อราต่ำ สามารถใช้งานในสภาพ แวดล้อมที่มีความชื้นได้ โดยไม่ทำให้ความสามารถทาง กลเปลี่ยนแปลงไป และค่าความชื้นของชิ้นงานจะลดลง

ตามปริมาณของพอลิโพรพิลีนที่เพิ่มขึ้นรวมทั้งปริมาณ ผงใยมะพร้าวที่ลดลงตามอัตราส่วน สำหรับค่าการพองตัว ตามความหนาของแผ่นไม้พลาสติกที่มีอัตราส่วนผล พอลิโพรพิลีน : MAPP : ผงใยมะพร้าว 50:5:45, 60:5:35 และ 70:5:25 ที่มีค่าการพองตัวตามความหนา 2.39%, 2.29% และ 1.99% ตามลำดับ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณ ของพอลิโพรพิลีน เมื่อมีมากจะทำให้ค่าการพองตัวน้อย และเมื่อมีน้อยจะมีค่าการพองตัวจะมาก ในการวิจัยครั้งนี้ มีค่าการพองตัวตามความหนาที่น้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ ความหนาของไม้พลาสติกกับไม้อัดความหนาแน่น ปานกลาง ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม้พลาสติกนี้มีค่าการพองตัว ตามความหนาที่น้อยกว่ามาก และเมื่อเปรียบเทียบกับ ไม้พลาสติกที่มีส่วนผสมของพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่มี อัตราส่วนผสมของไม้ : พอลิโพรพิลีน : วัสดุอื่นๆ ด้วย อัตราส่วน 64:25:11 พบว่าจะมีการพองตัวตามความหนา น้อยกว่ามาก แสดงว่าแผ่นไม้พลาสติกมีการดูดความชื้น ได้น้อย เมื่อนำไปใช้กับสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูงหรือ เมื่อสัมผัสน้ำจะสามารถคงสภาพได้ดี ไม่พองตัว

6.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกลของแผ่นไม้ พลาสติก ประกอบด้วย ค่ามอดุลัสการแตกหักของแผ่น ไม้พลาสติกที่มีอัตราส่วนพอลิโพรพิลีน : MAPP : ผงใย มะพร้าว 50:5:45, 60:5:35 และ 70:5:25 จะมีค่ามอดุลัส การแตกหัก 19.59, 21.87 และ 24.49 MPa ตามลำดับ โดยค่ามอดุลัสของการแตกหักจะแปรผันตรงกับปริมาณ ของพอลิโพรพิลีน โดยอัตราส่วนที่มีพอลิโพรพิลีนที่มาก จะมีค่ามอดุลัสการแตกหักมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจาก พอลิโพรพิลีนมีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานและเมื่อมีความ แข็งแรงมาก มอดุลัสการแตกหักก็จะมากขึ้น สำหรับค่า มอดุลัสการยืดหยุ่นของแผ่นไม้พลาสติกที่มีอัตราส่วน พอลิโพรพิลีน : MAPP : ผงใยมะพร้าว 50:5:45, 60:5:35 และ 70:5:25 จะมีค่ามอดุลัสการยืดหยุ่น 917.57, 898.43 และ 880.27 MPa ตามลำดับ ดังนั้น ค่ามอดุลัสการ ยืดหยุ่นจะแปรผกผันกับปริมาณของพอลิโพรพิลีน โดย อัตราส่วนที่มีมาก จะมีค่ามอดุลัสการยืดหยุ่นน้อยลงตาม

ไปด้วย เพราะจะมีผลต่อความยืดหยุ่นของชิ้นงานและเมื่อมีความยืดหยุ่นมาก มอดูลัสการยืดหยุ่นก็จะมากขึ้นและสำหรับค่าความต้านแรงดึงของแผ่นไม้พลาสติกที่มีอัตราส่วนพอลิโพรพิลีน : MAPP : ผงไยมะพร้าว 50:5:45, 60:5:35 และ 70:5:25 จะมีค่าความต้านทานแรงดึง 11.11, 16.52 และ 23.86 kgf/cm² ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า ค่าความต้านทานแรงดึงแปรผันตรงกับปริมาณของพอลิโพรพิลีน โดยอัตราส่วนที่มีพอลิโพรพิลีนมาก ค่าความต้านทานแรงดึงจะมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน เมื่อมีความแข็งแรงมาก ความต้านทานแรงดึงก็จะมากขึ้นด้วย

6.6 ไยมะพร้าวเมื่อนำมาบดให้เป็นผงจำนวน 5 กิโลกรัม จะได้ผงไยมะพร้าว 3.8 กิโลกรัม คิดเป็น 76% ของน้ำหนักก่อนบดและจะมีความชื้นภายในเนื้อไม้ 7.09% เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน 9 กิโลกรัม เมื่อนำมาบดให้เป็นผงได้น้ำหนัก 7.9 กิโลกรัม คิดเป็น 87% ของน้ำหนักก่อนบด สำหรับแผ่นไม้พลาสติกที่มีอัตราส่วนพอลิโพรพิลีน : MAPP : ผงไยมะพร้าว 50:5:45 จะมีคุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ความชื้น 2.29% การพองตัวตามความหนา 2.39% ในอัตราส่วน 60:5:35 มีความชื้น 1.80% และการพองตัวตามความหนา 2.29% ส่วนในอัตราส่วน 70:5:25 จะมีความชื้น 1.67% และการพองตัวตามความหนา 1.99% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแผ่นไม้พลาสติกที่มีอัตราส่วนพอลิโพรพิลีน : MAPP : ผงไยมะพร้าวในอัตราส่วน 70:5:25 และมีสมบัติทางกายภาพที่ดีที่สุด

6.7 เมื่อเปรียบเทียบไม้พลาสติกกับไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง พบว่าสมบัติทางกายภาพได้แก่ ความชื้นและการพองตัวตามความหนาของไม้พลาสติกมีค่าน้อยกว่าไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง เนื่องจากในการขึ้นรูปแผ่นไม้พลาสติกนั้นใช้ผงไยมะพร้าว ซึ่งเป็นส่วนเสริมแรงในวัสดุผสมในปริมาณที่น้อย ทำให้สมบัติทางกายภาพมีค่าน้อยกว่าแผ่นไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง แต่ทำให้สมบัติในการป้องกันการเสื่อมสภาพจากเชื้อราได้ดีกว่า

6.8 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกล พบว่าพอลิโพรพิลีนมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงและสมบัติทางกลของไม้เพิ่มขึ้น โดยค่ามอดูลัสการแตกหักและความต้านแรงดึงจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของพอลิโพรพิลีนที่เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน

6.9 การใช้วัสดุผสมของไยมะพร้าวและพอลิโพรพิลีนเป็นวัสดุทดแทนไม้ จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้ทั้งในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จะเป็นการพัฒนาวัสดุผสมระหว่างไยมะพร้าวและพอลิโพรพิลีนให้มีสมบัติที่เหมาะสมและสามารถนำไปใช้ได้จริงกับงานด้านวิศวกรรมโยธาและการตกแต่งในงานเฟอร์นิเจอร์ แต่ยังไม่สามารถนำไปใช้งานที่ต้องรับน้ำหนัก เช่น โตะ หรือเก้าอี้ได้ เนื่องจากความแข็งแรงยังมีไม่เพียงพอ ด้านเศรษฐกิจและสังคม เป็นการนำไยมะพร้าวและพอลิโพรพิลีนเป็นวัสดุทดแทนไม้ที่ใช้งานได้จริงเป็นการลดการใช้ไม้จริงและอาจจะผลิตเพื่อการส่งออกและนำรายได้เข้าประเทศได้ ด้านสิ่งแวดล้อม การผลิตวัสดุทดแทนไม้ที่ทำจากไยมะพร้าวและพอลิโพรพิลีนจะเป็นการสนับสนุนให้มีการใช้ทรัพยากรให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด และการใช้ไม้เทียมที่ผลิตได้จะช่วยลดปัญหาการตัดไม้ทำลายป่า ด้านอุตสาหกรรมและพาณิชย์ โดยสามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุผสมระหว่างไยมะพร้าวและพอลิโพรพิลีนได้มากขึ้น และสำหรับทางด้านวิชาการ คาดว่างานวิจัยฉบับนี้จะสามารถตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการหรือนำมาเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาคีวิชาเคมี-ฟิสิกส์ กองวิชาวิทยาศาสตร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ นวมินทราชดิยาธิราช ที่ให้การสนับสนุนในการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ และขอขอบคุณ บุคลากรภาคีวิชาวนวัฒนวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในการใช้เครื่องมือทดสอบสมบัติต่างๆ ของไม้พลาสติก รวมถึงการสนับสนุนเครื่องมือในการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลของงานวิจัยนี้

8. บรรณานุกรม

- (1) กนกกร แสงสุวรรณ, “ไม้พอลิเมอร์คอมโพสิตจากพอลิ โอลิฟินส์ และเส้นใยมะพร้าว,” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.
- (2) ณัฏฐา ญาภา อนุวัฒศิริกุล, “การปรับปรุงความแข็งแรงของไม้ พลาสติกจากไม้ปาล์ม,” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2554.
- (3) J. A. Brydson, “Plastics Materials,” 7th ed., Butterworth Heinemann, Oxford, pp. 247-259, 2000.
- (4) A. B. Strong, “PLASTICS : Materials and Processing, 2nd ed., Prentice-Hall Inc., Ohio, pp. 208-210, pp. 419-446, 2000.
- (5) C. W. Brandt, Fridley, “Load-Duration Behavior of Wood-Plastic Composite,” Journal of Material in Civil Engineering, vol.15, pp. 524-536, 2003.
- (6) M. Bengtsson, P. Gatenholm, K. Oksman, “The effect of crosslinking on the properties of polyethylene/wood flour composite,” Composites Science and Technology, pp. 1468-1479, 2005.
- (7) American Society of Testing Materials, “Standard Method for Compressive Properties of Plastics Lumber and Shapes,” ASTM D 7031-04. ASTM. Philadelphia, PA, 2003.
- (8) วรธรรม อุณจิตติชัย, “วัสดุทดแทนไม้,” กลุ่มงานพัฒนาอุตสาหกรรมไม้, สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้, กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ, 2555.
- (9) P. Kamthita, “Physico-Mechanical properties of Bio-fibers reinforced Polypropylene Composites,” Rangsit University Journal of Engineering and Technology, vol. 18, no. 2, pp. 17-26, 2015.
- (10) อาทร แยมทะเล และคณะ, “การศึกษาสมบัติทางกลของ พอลิโพรพิลีนโดยการเติมเส้นใยกล้วย,” การประชุมวิชาการระดับ นานาชาติ, หน้า B293-B297, ปี 2560.
- (11) J. Suksawat et al., “Mechanical and Morphological Studies of Wood Plastic Composites (WPC) made from Polypropylene (PP) and Waste Oil Palm Fibers: Empty Fruit Bunch Fibers (EFBF) and Frond Fibers (FF),” The 8th Kasetsart University Kamphaeng Saen Conference, pp. 1578-1585, 2011.
- (12) กุศยา สุวรรณวิทย์ และคณะ, “การศึกษาการใช้วัสดุผสมของใบสน คาร์เบียและพอลิเอทิลีนเป็นวัสดุทดแทนไม้,” วารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, ปีที่ 11, หน้า 45-50, 2556.
- (13) J. E. G. Dam et al., “Industrial Crops and Products,” vol. 19, pp. 207-216, 2004.
- (14) O. R. Ebebele, “Polymer Science and Technology,” CRC Press., Washington D.C., pp. 421-423, 2000.
- (15) M. Chaisupakitsin et al., “Properties of Fiberboard Made from Coconut Coir/Polystyrene Foam Containing Flame Retardant,” Burapha Science Journal, vol. 15, no. 2, pp. 57-66, 2010.
- (16) กิตติคุณ สีสถาพรพันธุ์ ประเสริฐ แก้ววิจิต, “เอกสารวิจัยเรื่อง การศึกษาวัสดุทดแทนไม้จากใบสนคาร์เบีย,” สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ ทางทหารและอากาศยาน, กองวิชาวิทยาศาสตร์, โรงเรียนนายเรือ อากาศนวมินทกษัตริยาธิราช.
- (17) J. Douglas, Gardener, “Extrusion of Wood Plastic Composites, University of Maine,” 2010.

การศึกษากลศาสตร์ความเสียหายพื้นฐานในโลหะเหนียว

และการทดสอบสองแกนรูปแบบใหม่

A study of fundamental damage mechanic approaches in ductile metals and new biaxial test

ร้อยเอก เพรียวพันธ์ อุดุลยศักดิ์

Captain Preawpan Adulyasak

*Instructor, Department of Civil Engineering, Education Section, Chulachomklao Royal Military
Academy, Nakhonnayok, 26001*

Corresponding Author: preawpan.ad@crma.ac.th

(Received: May 13, 2020, Accepted: July 31, 2020)

บทคัดย่อ : บทความนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมความเสียหายและกลไกการเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียวซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการวิจัยในปัจจุบัน อีกทั้งศึกษาตัวอย่างการทดสอบที่เหมาะสมแก่การวิจัยพฤติกรรมความเสียหายและระบบการทดสอบที่นิยมใช้โดยทั่วไป โลหะเหนียวเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในการนำไปประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ในโครงสร้างหรืออุตสาหกรรมยานยนต์หรือยานบิน ซึ่งวัสดุนี้จะได้รับสภาวะแรงที่กระทำจากภายนอกในรูปแบบที่หลากหลาย การทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมของวัสดุดังกล่าวภายใต้สภาวะความเค้นที่เกิดขึ้น มีความจำเป็นสำหรับการออกแบบโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับพฤติกรรมความเสียหาย การศึกษาพบว่า 1) ความเสียหายของวัตถุโลหะเหนียวจะสัมพันธ์กับความเค้นสามแกนและค่าโหลด 2) ทฤษฎีความเสียหายที่นิยมใช้ในการวิจัยกลศาสตร์ความเสียหายมาจากความเสียหาย GLD และความเสียหาย CDM และ 3) ตัวอย่างการทดสอบสองแกนภายใต้ระบบการทดสอบสองแกนซึ่งใช้การวัดความเครียดผ่านระบบ DIC มีความเหมาะสมสำหรับการวิจัยพฤติกรรมความเสียหายในบริเวณเล็กๆ

คำสำคัญ : กลศาสตร์ความเสียหาย โลหะเหนียว ความเค้นสามแกน ค่าโหลด การทดสอบสองแกน

Abstract : This paper deals with the studies of damage behaviours and damage mechanics in ductile metals in recent research areas, including appropriate specimens and suitable experiment systems for the damage mechanics studying. The ductile metals are commonly used in structural components, automobile industries and aerospace industries. Hence, these materials experience some stress-states from external factors in various forms. Therefore, understanding of the material behaviour under the occurred stress-state is very important for designing, particularly for the damage behaviours. This study presents following conclusions: 1) the ductile damage depends mainly on a stress triaxiality and a Lode-parameter 2) the frequently used damage approaches for research in the ductile damage are GLD damage model and CDM damage model and 3) the biaxial specimens under the biaxial test system with the DIC-strain-measurement is suitable for studying in a very small damage region.

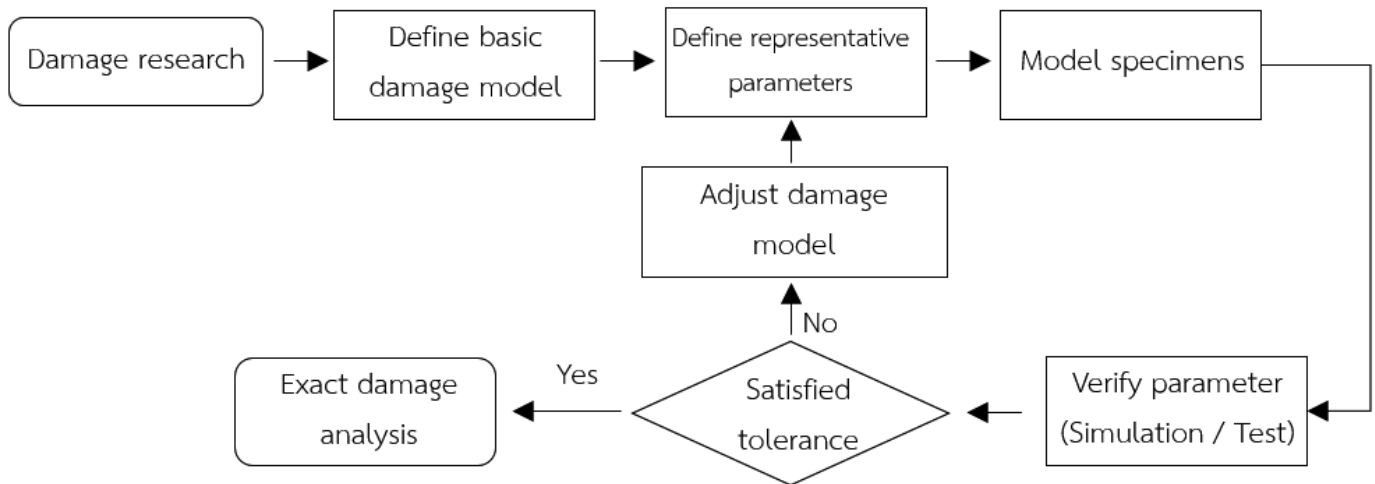
Keywords : Damage mechanic, Ductile metal, Stress triaxiality, Lode parameter, Biaxial test

1. บทนำ

โลหะเป็นวัสดุที่มีค่าทางการก่อสร้างและการออกแบบเครื่องยนตต่างๆ ปัจจุบันความต้องการโลหะและโลหะผสมมีมากโดยปริมาณโลหะที่มีอยู่ในตลาดมีค่อนข้างจำกัด ผลิตภัณฑ์ไม่ควรจะมีคุณภาพที่ดีเท่านั้น แต่ต้องมีราคาต้นทุนต่ำเพื่อสร้างความได้เปรียบทางการตลาด หนึ่งในมาตรการที่สามารถปฏิบัติได้คือการลดปริมาณความต้องการของวัสดุในการผลิต ซึ่งจะต้องทราบพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุนั้นๆ อย่างแน่ชัด ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงที่มากระทำในรูปแบบต่างๆ ย่อมเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการออกแบบและการใช้งานโลหะเหล่านี้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังที่งานวิจัยของ พันโท วสันต์ พัฒน์วิชัยโชติ และ พันตรี ผศ.ดร. ญัฐพร นุตยะสกุล [1], ร้อยโท พีรศักดิ์ เอี่ยมละออ และ คณะ [2] และ Hiranmarn และคณะ [3] แสดงให้เห็นในงานวิจัยต่างๆ ระดับนานาชาติ Barsoum และคณะ [4] Gerke และคณะ [5] Brünig และคณะ [6] และ Danas และ Ponte [7] มีการตรวจสอบพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปของโลหะเหนียวอย่างกว้างขวางเพื่อหาความเชื่อมโยงของค่าต่างๆ ซึ่งกันและกัน โดยมีการออกแบบตัวอย่างการทดสอบแกนเดียวและสองแกนเพื่อทำการตรวจสอบพฤติกรรมของโลหะเหนียว

พฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปร่างของโลหะเหนียวสามารถแบ่งออกได้เป็นสามบริเวณ ได้แก่ บริเวณยืดหยุ่น (Elastic area), บริเวณยืดหยุ่น-พลาสติก (Elastic-plastic area) และบริเวณเสียหาย (Damage area) ซึ่งในสองบริเวณแรกมีงานวิจัยและการทดสอบเป็นจำนวนมากที่ใช้ในการพิสูจน์พฤติกรรมดังกล่าวและสามารถใช้โปรแกรมเชิงไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณค่าที่เกิดขึ้นได้อย่างแม่นยำ ในส่วนของบริเวณเสียหาย ปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีที่แน่ชัดในการรองรับอย่างสมบูรณ์ ทำให้การคำนวณโดยโปรแกรมในบริเวณดังกล่าวไม่มีความแม่นยำ การใช้วัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีการพัฒนาทฤษฎีกลไกความเสียหายให้เกิดประสิทธิภาพและมีความแม่นยำ

การศึกษากลศาสตร์ความเสียหายในโลหะเหนียวจะเริ่มจากการนิยามโมเดลการเสียหาย ซึ่งโมเดลดังกล่าวจะใช้ในการอธิบายพฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นผ่านสมมุติฐานที่กำหนดขึ้น ทั้งนี้จะต้องใช้ตัวแปรที่หลากหลายในการแสดงพฤติกรรมดังกล่าวออกมาเป็นตัวเลข หลังจากนั้นจึงสร้างตัวอย่างการทดสอบขึ้นมาสำหรับการยืนยันตัวแปรที่ถูกกำหนดขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันตัวแปรผ่านการทดลองแกนเดียวหรือสองแกน หรือผ่านการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ ขั้นตอนต่อไปคือการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณ ซึ่งหากความคลาดเคลื่อนของค่าทั้งสองอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จะสามารถนำโมเดลการเสียหายและตัวแปรที่เกี่ยวข้องไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไปได้ หากความคลาดเคลื่อนมีค่าที่สูงเกินไป จะต้องปรับรูปแบบโมเดลการเสียหายและเริ่มออกแบบตัวอย่างการทดสอบใหม่อีกครั้ง โดยภาพรวมของกระบวนการศึกษากลศาสตร์ความเสียหายถูกแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ผังงานแสดงภาพรวมของกระบวนการศึกษากลศาสตร์ความเสียหายสำหรับโลหะเหนียว

เอกสารฉบับนี้จะเริ่มอธิบายแนวความคิดพื้นฐานของกลศาสตร์ความเสียหายเพื่อให้ทราบถึงความจำเป็นในการพัฒนาทฤษฎีดังกล่าวในหัวข้อแรก หลังจากนั้นแนวความคิดของความเสียหายที่ได้รับความนิยมสำหรับงานวิจัยโดยทั่วไปจะถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป ระบบการทดสอบและตัวอย่างการทดสอบสำหรับการศึกษาพฤติกรรมความเสียหายในโลหะเหนียวจะถูกกล่าวถึงในลำดับสุดท้าย

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษากลไกความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียวและทฤษฎีความเสียหายที่มีความเหมาะสมในการนำไปคำนวณ รวมไปถึงระบบทดสอบสองแกนที่ใช้ในการระบุค่าพารามเตอร์ของเกณฑ์การครากหรือเงื่อนไขความเสียหายของรูปแบบความเสียหายต่างๆ ภายใต้อิทธิพลของความเค้นสามแกนและค่าโหลด

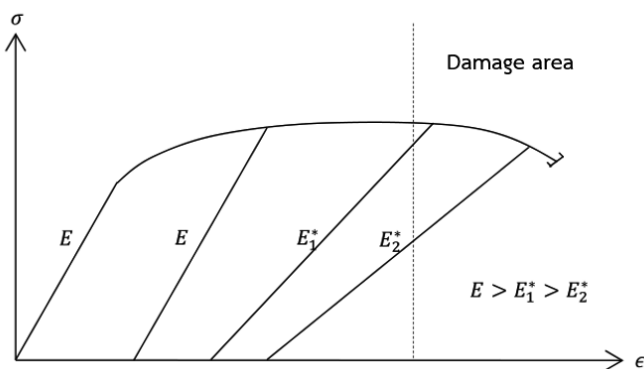
3. ทฤษฎีความเสียหายดั้งเดิม

ทฤษฎีทั่วไปที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์มักใช้สมมุติฐานว่าวัตถุจะไม่เกิดการเสียหายในระหว่างที่ได้รับแรงจากภายนอก ซึ่งในทางปฏิบัติ วัตถุมักจะไม่สมบูรณ์ในระดับโครงสร้างขนาดเล็กภายในเนื่องจาก

ปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ปัจจัยจากกระบวนการผลิต รวมไปถึงโพรงหรือช่องว่างขนาดเล็ก รอยร้าว หรือวัตถุแปลกปลอมอื่นๆ ซึ่งจะส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงและส่งผลต่อโครงสร้างขนาดใหญ่ของวัตถุ

ภาพที่ 2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในโลหะเหนียว ซึ่งถูกให้ความเค้นจนเกิดการแตกหัก จากกราฟจะสามารถพิจารณาบริเวณยืดหยุ่น (Elastic area) ได้โดยเป็นบริเวณที่โมดูลัสยืดหยุ่นยังคงมีค่าเท่ากับค่าเริ่มต้น E และไม่เกิดความเครียดคงเหลือเมื่อคลายความเค้นออก หลังจากวัตถุได้รับแรงจนถึงความเค้นคราก (Yield stress) จะทำให้ความเครียดของวัตถุเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และยังคงเหลือความเครียดอยู่หลังจากการคลายความเค้นออก โดยบริเวณดังกล่าวจะถูกเรียกว่าเป็นบริเวณพลาสติก (Plastic area) หากวัตถุถูกให้แรงต่อไปจนถึงความเค้น ณ จุดๆ หนึ่ง จะทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นของวัตถุมีค่าลดลง ซึ่งจะเรียกบริเวณดังกล่าวว่าบริเวณเสียหาย (Damage area) ภายใต้บริเวณนี้จะเกิดการเสียหายในวัตถุและทำให้ค่าคงที่ E ลดลงไปสู่ค่า E^* ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นค่าใหม่ที่ได้รับจะยังคงอยู่จนกว่าวัตถุจะเกิดความเสียหายเพิ่มเติมจากความเค้นและการเปลี่ยนรูป ซึ่งจะทำให้โมดูลัสยืดหยุ่นของวัตถุมีค่าลดลงอีกครั้ง สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความ

เสียหายในวัสดุคือความไม่สมบูรณ์เริ่มต้นที่เกิดขึ้นภายในวัสดุตั้งแต่กระบวนการผลิต ช่องว่าง (Void) หรือโพรงที่อยู่ในวัสดุจะเกิดการขยายออกภายใต้ความเค้นที่เพิ่มมากขึ้น และเกิดการควบรวมช่องว่าง (Void coalescence) เมื่อช่องว่างเกิดการขยายออกจนถึงค่าวิกฤต อีกทั้งความเค้นที่เพิ่มขึ้นยังสามารถสร้างช่องว่างหรือโพรงอันใหม่ให้เกิดขึ้นเพิ่มเติมได้อีก การขยายขนาดของช่องว่างและการควบรวมช่องว่างทำให้พื้นที่หน้าตัดสำหรับรองรับความเค้นมีค่าลดลงและส่งผลให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นลดลงเช่นกัน



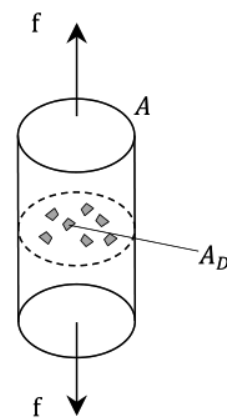
ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดซึ่งแสดงการเสียหายของวัสดุภายใต้การให้ความเค้นและคลายความเค้น

3.1 ความเสียหายของคาซาโนฟ (Kachanov's damage model)

แนวความคิดพื้นฐานในการออกแบบโมเดลและสมการแสดงพฤติกรรม (Constitutive equation) ของวัสดุที่เกิดความเสียหายมาจากโมเดลของคาซาโนฟ ซึ่งถูกอธิบายใน Gross และ Seelig [8] และ Katta และ Voyiadjis [9] โดยใช้วัสดุพื้นที่หน้าตัด A ซึ่งประกอบไปด้วยช่องว่างขนาดเล็กและรอยร้าวต่างๆ ภายใน และใช้ A_D ในการอธิบายพื้นที่ของช่องว่างภายในระนาบของ A และสามารถนิยามอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องว่างและพื้นที่หน้าตัดวัสดุผ่าน

$$D = \frac{A_D}{A} \quad (1)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสภาพความเสียหายในวัสดุ ตามที่แสดงในภาพที่ 3 D เท่ากับศูนย์ หมายถึงวัสดุไม่มีความเสียหาย และ D เท่ากับหนึ่ง หมายถึงวัสดุเสียหายอย่างสิ้นเชิง ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในเชิงปฏิบัติเนื่องจากวัสดุจะเกิดการแตกหักก่อนหน้าค่าดังกล่าว



ภาพที่ 3 พื้นที่ของช่องว่าง A_D ในระนาบ A ภายใต้แรงแนวฉาก f

ความเค้น σ ที่เกิดขึ้นในวัสดุคืออัตราส่วนระหว่างแรงแนวฉากที่มากระทำต่อวัตถุ f และพื้นที่หน้าตัด A ทั้งนี้พื้นที่รับความเค้นจะถูกลดทอนลงเนื่องจากความเสียหายที่อยู่ในวัสดุซึ่งสามารถใช้ความเค้นประสิทธิผล σ^* ในการแสดงค่าดังกล่าวผ่านสมการ

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{1-D} \quad (2)$$

จากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายความเครียดที่เกิดขึ้นภายในวัตถุได้ใหม่โดยใช้

$$\epsilon = \frac{\sigma^*}{E} = \frac{\sigma}{(1-D)E} \quad (3)$$

และได้รับโมดูลัสยืดหยุ่นประสิทธิผล

$$E^* = (1 - D)E \quad (4)$$

3.2 ความเสียหายของเกลซอน (Gurson's damage model)

โมเดลความเสียหายของคาซานอฟเป็นแนวความคิดพื้นฐานที่นำไปพัฒนาพฤติกรรมความเสียหายในวัตถุโลหะเหนียว ซึ่งต่อมา Gurson [10] ได้นำแนวความคิดดังกล่าวมาพัฒนาร่วมกับเกณฑ์การครากของวอนมีสส์ (Von Mises yield criterion) การเพิ่มความแข็งแรง (Hardening) และกฎการไหลตัวของทฤษฎีพลาสติก (Plastic flow rules) ซึ่งนำความเสียหายในวัตถุเข้ามาพิจารณาร่วมกับเมตริกของวัตถุ ทั้งนี้โมเดลดังกล่าวมีสมมุติฐานคือวัตถุจะไม่สามารถถูกบีบอัดได้ (Incompressibility) ความเค้นไฮโดรสแตติก (Hydrostatic stress) จะมีผลต่อการขยายช่องว่างซึ่งต้องนำความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นไปพิจารณาในเกณฑ์การครากของวัตถุเช่นกัน ทั้งนี้ Gurson [10] ได้แนะนำรูปทรงของช่องว่างแบบต่างๆ ซึ่งทำให้เกิดเกณฑ์การครากที่แตกต่างกันออกไป หากทำการพิจารณาเอลิเมนต์ปริมาตร dv (Volume element) ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาตรช่องว่าง dv_p (Void volume) จะได้รับความพรุน (Porosity)

$$f = \frac{dv_p}{dv} \quad (5)$$

โดยสามารถนำค่าดังกล่าวไปอธิบายเกณฑ์การครากของเกลซอนภายใต้ช่องว่างทรงกลมโดยใช้ค่าคงที่ของเทนเซอร์ความเค้นที่หนึ่ง I_1 (First invariant of stress tensor) ดังนี้

$$\psi = \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_y}\right)^2 + 2f \cosh\left(\frac{1}{2} \frac{I_1}{\sigma_y}\right) - 1 - f^2 = 0 \quad (6)$$

โดย σ_e คือความเค้นวอนมีสส์ (Von Mises stress) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าคงที่ความเค้นเบี่ยงเบนที่สองตามสมการ

$$\sigma_e = \sqrt{3J_2} \quad (7)$$

σ_y คือความเค้นคราก (Yield stress) ของเมตริกวัตถุ และ $I_1 = T_{ii} = \text{tr} \mathbf{T} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{1}$ ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสมการที่ (6) ไม่ได้นำการควรรวมของช่องว่างและการเกิดใหม่ของช่องว่างมาใช้ในการพิจารณาในเกณฑ์การครากดังกล่าว

3.3 ความเสียหาย GTN (Gurson–Tvergaard–Needleman damage model)

Needleman และ Tvergaard [11] นำโมเดลการเสียหายวัตถุของเกลซอนมาทำการพัฒนาต่อไป โดยการเพิ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการควรรวมช่องว่างและการเกิดใหม่ของช่องว่าง ซึ่งได้รับเกณฑ์การคราก ดังนี้

$$\psi = \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_y}\right)^2 + 2f^* q_1 \cosh\left(\frac{1}{2} \frac{I_1}{\sigma_y}\right) - 1 - (f^* q_1)^2 = 0 \quad (8)$$

ทั้งนี้ตัวแปร q_1 สามารถทำการระบุได้จากการวิเคราะห์แรงปฏิริยาระหว่างช่องว่าง อิทธิพลของการควรรวมระหว่างช่องว่างจะถูกอธิบายด้วยค่า f^* โดยวัตถุจะสูญเสียความสามารถในการรับแรงเมื่อความพรุน f^* สูงถึงค่าวิกฤตและเป็นผลทำให้เกิดการควรรวมช่องว่าง ค่าวิกฤตจะใช้ความพรุนวิกฤต f_c ในการแทนค่าดังกล่าว นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดความพรุนแตกหัก f_F ซึ่งหมายถึง

ความพรุนเมื่อวัตถุเกิดการแตกหัก ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์การเสียหายที่เกิดขึ้น

Needleman และ Tvergaard [11] ได้ใช้การเพิ่มความพรุน f ในการศึกษาทิศทางและแนวโน้มของความพรุนที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลรวมจากการเพิ่มความพรุนภายใต้การขยายช่องว่าง (Void growth porosity increment) และการเพิ่มความพรุนจากช่องว่างใหม่ (Void nucleation porosity increment) โดยค่าทั้งสองเป็นค่าที่ใช้แสดงปรากฏการณ์ดังกล่าวที่เกิดขึ้นระหว่างเกิดการเสียหายในวัตถุ

4. ทฤษฎีความเสียหายภายใต้อิทธิพลของความเค้นสามแกนและค่าโหลด

งานวิจัยต่างๆ (Barsoum และคณะ [4], Danas และ Ponte Castaneda [7], Bao และ Wierzbicki [12], Gao และ Kim [13] และ Zhang และคณะ [14]) พบว่าความเสียหายในวัตถุเป็นค่าที่สัมพันธ์กับค่าสถานะความเค้นที่เกิดขึ้นในวัตถุ เพื่อให้การตีความความเค้นภายในวัตถุสามมิติเกิดความชัดเจน จึงได้มีการนิยามค่าความเค้นสามแกน (Stress triaxiality) ภายใต้ค่าคงที่ของเทนเซอร์ความเค้น I_i และค่าคงที่ความเค้นเบี่ยงเบน J_i (Invariant of stress deviator) โดย

$$\eta = \frac{I_1}{3\sqrt{J_2}} \quad (9)$$

และค่าโหลด (Lode-parameter) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการนิยามทิศทางของความเค้นที่เกิดขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนรูปของช่องว่างที่อยู่ภายในวัตถุดังนี้

$$\omega = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad \text{สำหรับ} \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (10)$$

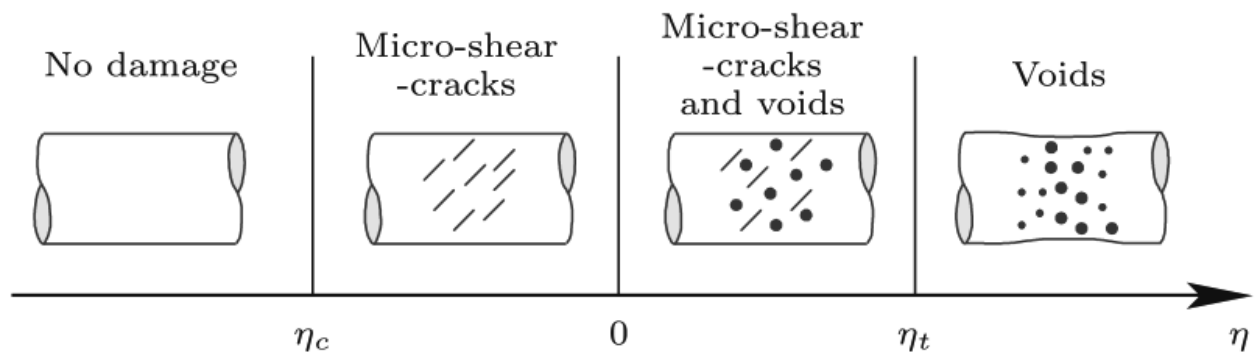
โดยจะมีช่วงของค่าระหว่าง $-\infty < \eta < \infty$ และ $-1 \leq \omega \leq 1$ ซึ่งในสมการแสดงพฤติกรรมความเสียหายของวัตถุควรนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการอธิบายเกณฑ์ความ

เสียหาย (Damage criterion) เพื่อสร้างความเชื่อมโยงระหว่างค่าทั้งสองและความเค้นที่เกิดขึ้นในวัตถุ

4.1 อิทธิพลของความเค้นสามแกนและค่าโหลด

4.1.1 อิทธิพลของความเค้นสามแกน

แนวความคิดในการใช้ค่าทั้งสองในการอธิบายสถานะความเค้นที่เกิดภายในวัตถุมีมาอย่างยาวนานแล้ว Needleman และ Tvergaard [11] ทำการจำลองการทดสอบแกนเดียวและค้นพบว่าความเค้นสามแกนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ของการทดสอบ Brünig และคณะ [15] แบ่งกลไกการเสียหายของวัตถุออกเป็นสี่ส่วนตามค่าความเค้นสามแกนที่เกิดขึ้นในวัตถุดังที่แสดงในภาพที่ 4 เมื่อความเค้นสามแกนมีค่าที่สูงมากจะทำให้ความเสียหายเกิดจากการขยายช่องว่าง (Void growth) หรือการเกิดช่องว่างใหม่ (Void nucleation) และจะเกิดการควมรวมช่องว่าง เมื่อความพรุนสูงถึงค่าวิกฤต ซึ่งเป็นส่วนที่สมการและเกณฑ์ความเสียหายของ GTN สามารถแสดงค่าในช่วงนี้ได้ค่อนข้างแม่นยำ อีกทั้งยังมีการทดสอบมากมายที่เกิดขึ้นในช่วงความเค้นสามแกนดังกล่าว (Driemeier และคณะ) [16] เมื่อความเค้นสามแกนมีค่าเข้าสู่ศูนย์จะทำให้เกิดสถานะความเสียหายจากการขยายช่องว่างและการเกิดรอยร้าวเฉือน (Shear crack) ทั้งนี้หากความเค้นสามแกนมีค่าต่ำกว่าศูนย์จะทำให้เกิดความเสียหายจากรอยร้าวเฉือนเท่านั้น ซึ่งจะไม่สามารถนำเกณฑ์ความเสียหายของ GTN มาอธิบายได้ แต่จำเป็นต้องนำความเค้นสามแกนและค่าโหลดไปใช้ในการพิจารณาและวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้น Bao และ Wierzbicki [12] ทำการตรวจสอบความเค้นสามแกนที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียว Al2024-T351 และทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความเค้นสามแกนที่เกิดขึ้นในบริเวณที่เกิดการแตกหักและความเสียหายภายใต้ความเครียดหลักนั้นๆ โดยพบว่า เมื่อความเค้นสามแกนมีค่าต่ำกว่าค่า Cut-off จะทำให้วัตถุไม่เกิดการแตกหักและการเสียหาย ทั้งนี้การวิเคราะห์และคำนวณดังกล่าวแนะนำค่า Cut-off ไว้ที่ $-1/3$ ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าวไม่ได้ใช้อิทธิพลของค่าโหลดมาใช้ในการ



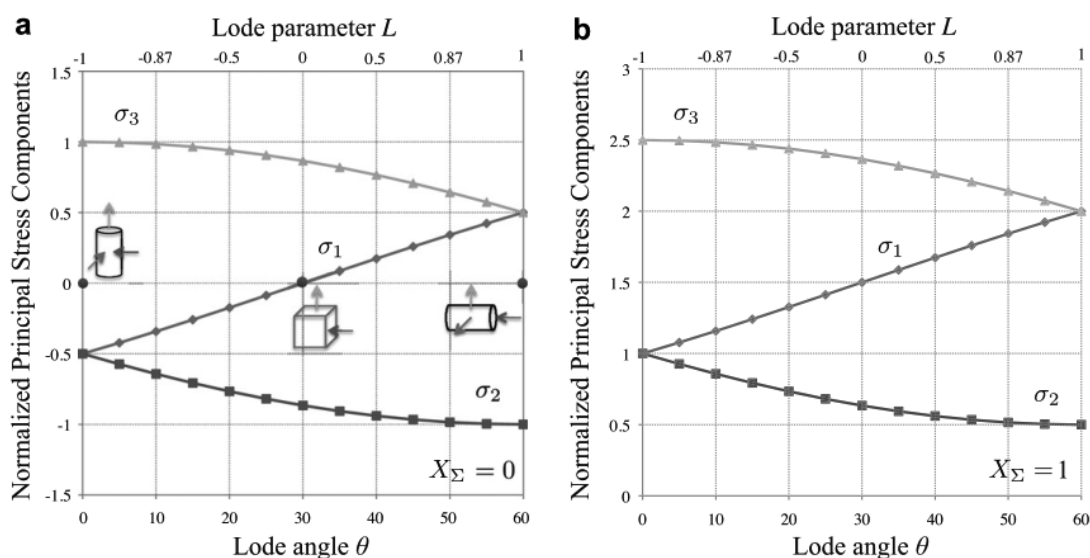
ภาพที่ 4 กลไกความเสียหายที่เกิดขึ้นภายใต้ความเค้นสามแกนรูปแบบต่างๆ จาก Brünig และคณะ [15]

พิจารณา โดย Brünig และคณะ [17] ทำการทดสอบสองแกนซึ่งสามารถสร้างความเค้นสามแกนเป็นลบสูงได้และแนะนำค่า Cut-off ภายใต้ฟังก์ชันของค่าโหลดซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า Cut-off ไม่ได้เป็นค่าคงที่แต่เป็นค่าที่สัมพันธ์กับค่าโหลดที่เกิดขึ้นในวัตถุ

4.1.2 อธิพจน์ของค่าโหลด

การศึกษาธิพจน์ของค่าโหลดภายใต้ค่าความเค้นสามแกนต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของค่าดังกล่าวต่อพฤติกรรมความเสียหายได้อย่างชัดเจนถูกอธิบายใน Danas และ Ponte [7] โดยใช้การวิเคราะห์เชิงคำนวณผ่าน Second order homogenization

model สำหรับการแตกหักของวัตถุยืดหยุ่นพลาสติกพรุน (Porous elasto-plastic solids) ภายใต้ความเค้นสามแกนต่างๆ ซึ่งพบว่าความเหนียวของวัตถุจะสัมพันธ์กับความเค้นสามแกนและค่าโหลดที่เกิดขึ้น โดยค่าโหลดส่งอิทธิพลเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเค้นสามแกนมีค่าต่ำจนถึงติดลบ ซึ่งตรงกับการศึกษาพฤติกรรมเชิงกลในปริมาตรตัวแทนช่องว่าง (Void unit cell) ของ Brünig และคณะ [15] ทั้งนี้งานวิจัยดังกล่าวได้พัฒนาเงื่อนไขการเสียหายที่สอดคล้องกับพฤติกรรมแอนไอโซโทรปิกของตำหนิขนาดเล็กภายในวัตถุ และกล่าวถึงการระบุค่าพารามเตอร์ที่เป็นเงื่อนไขการเสียหายที่ถูกนิยามขึ้นใน Brünig และ



ภาพที่ 5 ความเค้นหลักมาตรฐาน (Normalized principal stress) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าโหลดภายใต้ค่าความเค้นสามแกนเท่ากับศูนย์ (ซ้าย) และความเค้นสามแกนเท่ากับหนึ่ง (ขวา) จาก Danas และ Ponte [7]

คณะ [18] ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในเงื่อนไขการเสียหาย จะถูกตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำผ่านการทดสอบตัวอย่างสองแกนภายใต้ความเค้นสองแกนของ Brünig และคณะ [19] โดยตัวอย่างการทดสอบดังกล่าวได้รับการแนะนำสำหรับใช้ในการตรวจสอบโมเดลความเสียหาย ซึ่งสามารถปรับอัตราความเค้นที่กระทำต่อตัวอย่าง การทดสอบได้เพื่อควบคุมสภาวะความเค้นสามแกนและค่าโหลดที่เกิดขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นหลักที่เกิดขึ้นในวัตถุ และค่าโหลดที่เกิดขึ้นถูกอธิบายอย่างชัดเจนผ่านกราฟในภาพที่ 5 และสามารถกล่าวได้ว่าเมื่อค่าโหลดเท่ากับหนึ่ง จะหมายถึงความเค้นที่เกิดขึ้นจะสมมาตรในแนวแกนของวัตถุภายใต้ความเค้นบวกสองค่าและความเค้นลบหนึ่งค่า ซึ่งเทียบได้กับการทดสอบโดยใช้แรงอัดในแกนเดียว สำหรับตัวอย่างแบบแท่ง หากค่าโหลดเป็นศูนย์หมายถึงความเค้นที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นความเค้นในระนาบหรือเป็นปัญหาความเค้นระนาบซึ่งมีค่าความเค้นหลักหนึ่งค่าเท่ากับศูนย์ และหากค่าโหลดเท่ากับลบหนึ่งจะหมายถึงการเกิดความเค้นอย่างสมมาตรในแนวแกนซึ่งเกิดความเค้นบวกหนึ่งค่าและความเค้นลบสองค่าและเทียบได้กับการทดสอบดึง

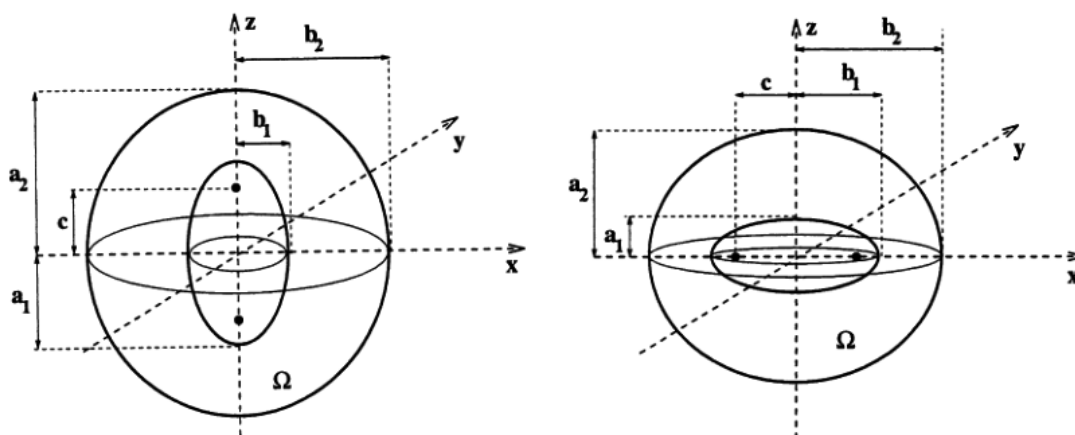
นอกจากนั้น Driemeier และคณะ [16] ได้ตรวจสอบอิทธิพลร่วมของความเค้นสามแกนและค่าโหลดต่อวัตถุ

ที่ทำการทดสอบ การวิจัยใช้ตัวอย่างอะลูมิเนียมอัลลอยรูปทรงไม้กางเขนและตัวอย่างแรงเฉือนลักษณะเดียวที่ใช้ใน Brünig และคณะ [18] โดยทำการทดสอบตัวอย่างซึ่งทำร่องทรงเว้าภายใต้ความหนาของตัวอย่างที่แตกต่างกันและพบว่า ความเค้นสามแกนและค่าโหลดมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมแตกหักและความเหนียวของวัตถุ รวมไปถึงการวิจัยของ Barsoum และคณะ [4] ซึ่งทำการทดสอบตัวอย่างทรงแท่งที่มีร่องทรงเว้า ซึ่งพบว่าอิทธิพลของค่าโหลดจะมีความแตกต่างตามความแข็งแรงและลักษณะการเพิ่มความแข็ง (Hardening) ของวัตถุ

4.2 ความเสียหายกुरुแกน-เลอบลิ่ง-ดิว (GLD damage model)

4.2.1 แนวความคิด

แนวความคิดความเสียหายของ Gurson [10] และ Needleman และ Tvergaard [11] ถูกนำไปพัฒนาโดยใช้สมการการคราก (8) เป็นสมการพื้นฐาน โดย Gologanu และคณะ [20] ได้ใช้โมเดลวัตถุปริมาตรตัวแทน (Representative volume element, RVE) ในลักษณะทรงกระบอก ซึ่งประกอบไปด้วยช่องว่างซึ่งมีลักษณะคล้ายทรงกลม (Spheroidal void) และเมตริกของวัตถุที่ล้อมรอบในลักษณะคอนโฟคอลล์ (Confocal) ซึ่งมีนิยามตามภาพที่ 6 ในการศึกษาพฤติกรรมความ



ภาพที่ 6 โมเดล RVE ของความเสียหายกुरुแกน-เลอบลิ่ง-ดิว (GLD model) รูปทรงช่องว่างแบบทรงรีแนวตั้ง Prolate (ซ้าย) และแบบทรงรีแนวนอน Oblate (ขวา) [21]

เสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียว ทั้งนี้แนวความคิดดังกล่าวได้นำอิทธิพลของรูปทรงช่องว่าง การขยายช่องว่าง การพัฒนาของรูปทรงช่องว่าง และเงื่อนไขในการควบรวมช่องว่างมาพิจารณา Gologanu และคณะ [20] ได้นำ RVE ประกอบเข้ากับเมทริกของวัสดุที่ไม่มีช่องว่างเพื่อจำลองแนวความคิดในการเกิดการควบรวมของช่องว่าง โดยการเปลี่ยนรูปสามารถแบ่งออกได้เป็นช่วงก่อนเกิดการควบรวม (Pre-coalescence) และระหว่างการควบรวม (Coalescence) ซึ่งก่อนเกิดการควบรวม วัสดุจะเปลี่ยนรูปในลักษณะพลาสติกอย่างสม่ำเสมอ และเมื่อเกิดการควบรวมช่องว่าง วัสดุรอบ RVE จะเกิดการแข็งและไม่เกิดการเปลี่ยนรูป เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปเฉพาะบริเวณ RVE เท่านั้น

4.2.2 เกณฑ์การคราก (Yield criterion)

นิยามการครากจากความเสียหาย GLD มีนิยามดังนี้

$$\psi = \frac{C}{\sigma_y^2} (T' + xT_h X)^2 + 2q(g+1)(g+f) \cosh\left(\kappa \frac{T_h}{\sigma_y}\right) - (g+1)^2 - q^2(g+f) = 0 \quad (11)$$

โดยมี T' เป็นเทนเซอร์ความเค้นเบี่ยงเบน S เป็นพารามิเตอร์รูปทรงช่องว่าง (Void shape parameter) T_h เป็นความเค้นไฮโดรสเตติกทั่วไป ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$T_h = \alpha_2(T_{11} + T_{33}) + (1 - \alpha_2)T_{22} \quad (12)$$

และ

$$X = \frac{2}{3}e_2 \otimes e_2 - \frac{1}{3}e_1 \otimes e_1 - \frac{1}{3}e_3 \otimes e_3 \quad (13)$$

ซึ่งมี e_i เป็นฐานที่อยู่ในปริภูมิแนวฉาก (Orthogonal space) โดยแกนของช่องว่างคล้ายทรงกลมจะอยู่ในทิศทางกับ e_2 และมี \otimes คือผลคูณของเทนเซอร์

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (11) จะพบว่าตัวแปร C, χ, g, κ และ α_2 จะเป็นฟังก์ชันของความพรุนและ

รูปทรงของช่องว่าง ซึ่งพารามิเตอร์ q จะเป็นค่าที่สัมพันธ์กับความพรุนเริ่มต้น การเพิ่มความแข็งจากความเครียดของวัสดุ รูปทรงของช่องว่าง และความเค้นสามแกนที่เกิดขึ้น นิยามของตัวแปรที่กล่าวมาและกฎการไหลตัวสำหรับเกณฑ์การคราก GLD อยู่ในเอกสารของ Gologanu และคณะ [20] และ Gologanu และคณะ [21] ซึ่งมีลักษณะสมการที่ยาวและซับซ้อนจึงไม่นำมากล่าวถึงในบทความนี้

4.2.3 อภิปราย

เกณฑ์การคราก GLD เป็นการดัดแปลงแนวความคิดพื้นฐานของ Gurson [10] และ Needleman และ Tvergaard [11] ซึ่งจะนิยามเอลิเมนต์ที่อาจจะเกิดความเสียหายให้อยู่ภายใต้เกณฑ์การครากดังกล่าวได้โดยไม่ต้องทำการนิยามเงื่อนไขหรือเกณฑ์การเสียหายเพิ่มเติม การใช้สมการเพียงสมการเดียวในการอธิบายพฤติกรรม การเปลี่ยนรูปของวัสดุทำให้เกิดความง่ายในการนำสมการดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์ที่ไฟไนต์เอลิเมนต์

การนำสมการดังกล่าวไปคำนวณและเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดต่างๆ (Pardoen และ Hutchinson) [22] ซึ่งเป็นที่มาของการนำเกณฑ์การคราก GLD ไปพัฒนาต่อในงานวิจัยต่างๆ (Gologanu และคณะ [21], Gologanu และคณะ [23], Gao และคณะ [24], Gao และคณะ [25] และ Kerala-varma และ Benzerga [26])

ความนิยมในการนำเกณฑ์การคราก GLD ไปเป็นพื้นฐานในการพัฒนาเกณฑ์การครากสำหรับโลหะเหนียวพรุน แสดงให้เห็นว่าสมการดังกล่าวสามารถตีความและนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายเพียงทำการปรับนิยามของตัวแปรหรือเพิ่มเติมตัวแปรเข้าไปเท่านั้น

4.3 ความเสียหายคอนติเนียม (Continuum damage model, CDM)

4.3.1 แนวความคิด

แนวความคิดในการพัฒนากลศาสตร์ความเสียหายของ Brünig และคณะ [18] ตั้งอยู่บนพื้นฐานการพิจารณาความเสียหายให้อยู่ในรูปของเทนเซอร์ความ

เสียหาย (Damage tensor) (Brünig และคณะ [6] และ Bonora และคณะ [27]) โดย Brünig และคณะ [18] ให้ข้อเสนอแนะว่า CDM ที่เคยใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมามีข้อจำกัดเมื่อนำมาใช้กับสภาวะความเค้นสามแกนในช่วงที่มีค่าต่ำและค่าเป็นลบ ทั้งนี้อิทธิพลของความเค้นสามแกนและค่าโหลดต่อการเปลี่ยนรูปและความเสียหายสะสมได้รับการตีพิมพ์ในงานวิจัยต่างๆ อย่างกว้างขวาง ([12], [4], [7], [16] และ [15])

ทฤษฎีความเสียหาย CDM สำหรับโลหะเหนียว นิยามความเค้นและความเครียดผ่านคอนตินั่มภายใต้การครากพลาสติกแบบดริคเกอร์-เพรเกอร์ (Drucker-Prager yield criterion) ซึ่งจะได้รับเงื่อนไขการเสียหายที่เป็นฟังก์ชันของความเค้นสามแกน η และค่าโหลด ω ทั้งนี้การออกแบบเงื่อนไขการเสียหายดังกล่าวใช้ข้อมูลพื้นฐานจากตัวอย่างการทดสอบแบบเฉือนและตัวอย่างการทดสอบดึงแกนเดียวซึ่งสามารถสร้างความเค้นสามแกนในช่วงกว้างได้ การอธิบายความเสียหายในคอนตินั่มจะแบ่งความเครียดและการเพิ่มความเครียดออกเป็นสองยัดหยุ่น ส่วนพลาสติกและส่วนการเสียหาย

4.3.2 เงื่อนไขการเสียหาย (Damage condition)

วัตถุในคอนตินั่มจะเกิดการเสียหายขึ้นเมื่อ

$$\psi^{da} = \alpha I_1 + \beta \sqrt{J_2} - \sigma_{da} = 0 \quad (14)$$

โดยมี α และ β เป็นพารามิเตอร์ความเสียหาย σ_{da} คือความเค้นเริ่มการเสียหาย (Damage threshold) ซึ่งจะเห็นได้จากสมการดังกล่าวอย่างชัดเจนว่า พจน์แรกของสมการคือผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเค้นไฮโดรสแตติกที่เกิดขึ้นในวัตถุและพจน์ที่สองคือผลกระทบที่เกิดขึ้นจากความเค้นเบี่ยงเบน ซึ่งสามารถระบุค่าพารามิเตอร์ทั้งสองได้จากการศึกษาผ่านการคำนวณเชิงไฟไนต์เอลิเมนต์จากตัวอย่างการทดสอบโลหะเหนียว ทั้งนี้ Brünig และคณะ [15] ได้คำนวณค่าพารามิเตอร์ α และ β โดย

ใช้หน่วยวัตถุซึ่งมีช่องว่างอยู่ที่กึ่งกลางและแนะนำค่าดังกล่าวให้เป็นฟังก์ชันของความเค้นสามแกน η และค่าโหลด ω ดังนี้

$$\alpha(\eta) = \begin{cases} 0, & -\frac{1}{3} \leq \eta \leq 0 \\ \frac{1}{3}, & \eta > 0 \end{cases} \quad (15)$$

และ

$$\beta(\eta, \omega) = \beta_0(\eta, \omega = 0) + \beta_\omega(\omega) \geq 0 \quad (16)$$

โดย

$$\beta_0(\eta) = \begin{cases} -0.45\eta + 0.85, & -\frac{1}{3} \leq \eta \leq 0 \\ -1.28\eta + 0.85\eta, & \eta > 0 \end{cases} \quad (17)$$

และ

$$\beta_\omega(\omega) = -0.017\omega^3 - 0.065\omega^2 - 0.078\omega \quad (18)$$

ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการแบ่งช่วงสมการตามความเค้นสามแกนที่เกิดขึ้นเป็นช่วงๆ

4.3.3 การเพิ่มความเครียดเสียหาย (Damage strain rate)

เมื่อเริ่มเกิดความเสียหายขึ้นตามเงื่อนไขการเสียหายจำเป็นต้องทำการตรวจสอบทิศทางในการพัฒนาความเสียหายที่เกิดขึ้นด้วย โดยเทนเซอร์การเพิ่มความเครียดเสียหายตามกฎการเสียหาย (Damage rule) มีนิยามตาม [18] ดังนี้

$$\dot{\mathbf{H}}^{da} = \dot{\mu} \left(\bar{\alpha} \frac{1}{\sqrt{3}} \mathbf{1} + \bar{\beta} \mathbf{N} - \bar{\delta} \mathbf{M} \right) \quad (19)$$

โดยมีค่า $\dot{\mu}$ เป็นค่าสเกลาร์ที่เป็นบวกซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการขยายช่องว่างสำหรับความเค้นสามแกนสูงและเป็นค่าที่แสดงถึงการเพิ่มความเครียดเสียหายสำหรับความเค้นสามแกนต่ำ พจน์แรกของสมการแสดงถึงอิทธิพลของการเพิ่มความเครียดไฮโดรสแตติกและสองพจน์สุดท้ายเป็นค่าซึ่งแสดงอิทธิพลของความเครียดเบี่ยงเบนต่อการเพิ่มความเครียดการเสียหาย \mathbf{N} และ \mathbf{M} เป็นฟังก์ชัน

ของเทนเซอร์ความเค้นเบี่ยงเบนในฐานความเสียหาย (Damage configuration) ทั้งนี้พารามิเตอร์ $(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\delta})$ จะเป็นค่าที่สัมพันธ์กับความเค้นสามแกนและค่าโหลดในช่วงต่างๆ สมการที่ (19) จะพิจารณาถึงอิทธิพลของการขยายช่องว่างในลักษณะไอโซโทปิกและการเกิดรอยร้าวในลักษณะแอนไอโซโทปิก การใช้ \dot{H}^{da} แทนความเครียดเป็นสัญลักษณ์ที่ใช้ในการนิยามเทนเซอร์การเปลี่ยนรูปตาม Brünig และคณะ [18] ค่าพารามิเตอร์ของสมการที่ (19) ถูกแนะนำในเอกสารของ Brünig และคณะ [15] ทั้งนี้พารามิเตอร์ α ที่ถูกนิยามในความเสียหาย CDM ไม่ได้มีความเกี่ยวข้องกับค่าที่อยู่ในความเสียหาย GLD

4.3.4 อภิปราย

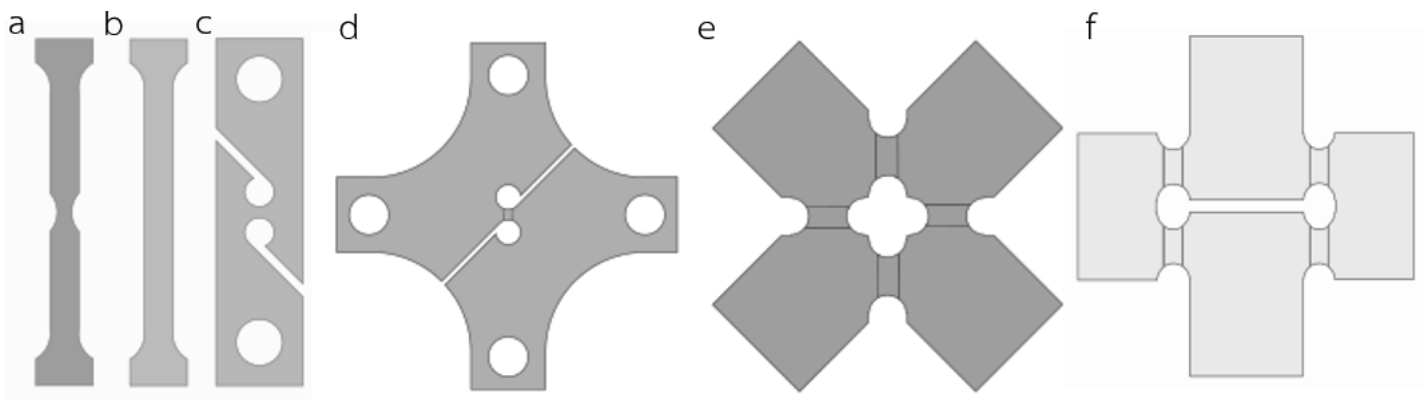
การพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นในวัตถุผ่านคอนตินันต์เป็นวิธีการที่ต้องทำการนิยามและแบ่งส่วนของคอนตินันต์ออกเป็นส่วนต่างๆ ซึ่งทำให้ต้องนิยามเทนเซอร์ความเค้นและเทนเซอร์ความเครียดในรูปแบบทั่วไปซึ่งมีความซับซ้อนสูง ทั้งนี้จะพบว่าเงื่อนไขการเสียหายในสมการที่ (14) เป็นสมการที่ง่ายและสามารถตีความได้อย่างชัดเจนในแต่ละพจน์ การแสดงอิทธิพลของความเค้นสามแกนและค่าโหลดด้วยพารามิเตอร์สเกลาร์เพียงค่าเดียวเป็นการหลีกเลี่ยงการใช้สมการเชิงเรขาคณิตเช่นเดียวกับความเสียหาย GLD เพื่ออธิบายรูปทรงและการขยายช่องว่างคล้ายทรงกลมที่มีความซับซ้อน

นอกจากนั้น ความเสียหาย CDM ยังสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายของโลหะในช่วงความเค้นสามแกนที่ต่ำไปจนถึงค่าเป็นลบได้ ซึ่งมีประโยชน์ต่อการตรวจสอบค่า Cut-off ของความเค้นสามแกนที่เกิดขึ้นในวัตถุภายใต้ค่าโหลดใดๆ ได้ โดยในงานวิจัยหลายชิ้น ([5], [19], [28] และ [29]) มีจุดประสงค์ในการนำความเสียหาย CDM ของ Brünig และคณะ [18] มาทำการพิสูจน์ค่าพารามิเตอร์ $(\alpha, \beta, \bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\delta})$ ภายใต้การทดสอบแกนเดียวหรือสองแกน ทั้งนี้ในงานวิจัยของ Brünig และคณะ [17] สามารถทำการทดสอบตัวอย่างสองแกนซึ่งสามารถสร้างความเค้นสามแกนที่มีค่าเป็นลบสูงได้ภายใต้ความเสียหาย CDM ซึ่งมีค่าความเค้นสามแกนประมาณ -0.66

5. ระบบการทดสอบและตัวอย่างการทดสอบ

5.1 ตัวอย่างการทดสอบ

ตัวอย่างการทดสอบเป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการกำหนดเครื่องมือในการทดสอบและสภาวะความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณวิกฤต การควบคุมความเสียหายให้ถูกจำกัดอยู่ภายในบริเวณใดบริเวณหนึ่งมักใช้การทำร่องลักษณะเว้าซึ่งก่อให้เกิดความเค้นสูงในบริเวณนั้น หรือใช้การสร้างแรงบิดในตัวอย่างการทดสอบ (Yin และคณะ) [30]



ภาพที่ 7 ตัวอย่างการทดสอบที่ใช้ในการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับโลหะเหนียวแบบแผ่น a) และ b) ตัวอย่าง Dog bone c) ตัวอย่างแรงฉีก d) ตัวอย่างสองแกน Arcan e) ตัวอย่างสองแกน X02 และ f) ตัวอย่างสองแกน H

Driemeier และคณะ [16] ทำการทดสอบตัวอย่างแรงดึงแกนเดียว ตัวอย่างแรงเฉือนและตัวอย่างสองแกน Arcan (Arcan และคณะ) [31] ตามที่แสดงในภาพที่ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเปลี่ยนรัศมีของร่องเว้าในตัวอย่างแรงดึงแกนเดียวจะมีผลต่อความเครียดแตกหักของวัสดุ หรือหมายความว่า ความเค้นสามแกนและค่าโหลตในวัสดุจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่นกัน ทั้งนี้การทดสอบดังกล่าวถึงแม้จะใช้ตัวอย่างสองแกนก็ตาม แต่สามารถสร้างแรงตามแนวแกนได้เพียงครั้งละหนึ่งแกนเท่านั้นเนื่องจากใช้เครื่องทดสอบแกนเดียว

Brünig และคณะ [28] ทำการทดสอบตัวอย่างสองแกน Arcan ดัดแปลง (ภาพที่ 7 d) กับระบบทดสอบสองแกน ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างการทดสอบ Arcan สามารถสร้างความเค้นสามแกนภายใต้การทดสอบสองแกนได้ในช่วงระหว่าง -0.4 และ 0.85 โดยความเค้นสามแกนจะแปรผันตามอัตราส่วนของแรงทั้งสองแกนที่กระทำต่อตัวอย่างการทดสอบ

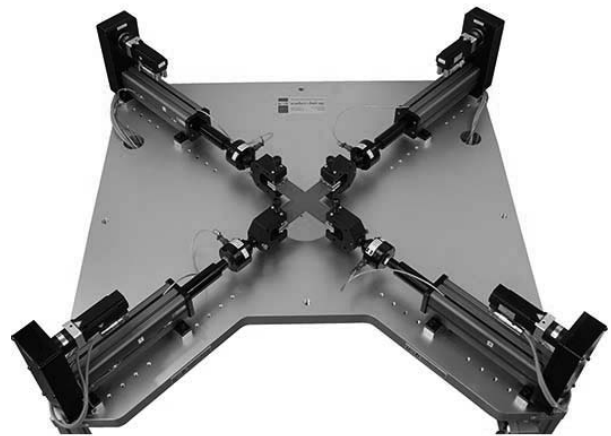
การทดสอบของ Gerke และคณะ [5], [29] และ Brünig และคณะ [32] เป็นการทดสอบที่แสดงให้เห็นว่าการใช้การทดสอบสองแกนสามารถสร้างความเค้นสามแกนในช่วงที่กว้างได้โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนของแรงและรูปร่างทางเรขาคณิตของตัวอย่างการทดสอบ ซึ่งค่าความเค้นสามแกนและค่าโหลตในช่วงต่างๆ จะสามารถนำไปพิสูจน์ค่าพารามเตอร์ของเงื่อนไขความเสียหายได้

5.2 เครื่องมือสำหรับการทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแรงแกนเดียวเป็นเครื่องมือที่เป็นที่รู้จักและทราบกันโดยทั่วไป การทดสอบแกนเดียว ([4], [16], [25] และ [33]) สามารถใช้ตัวอย่างแบบแท่งและตัวอย่างแรงแกนเดียวจากโลหะแบบแผ่นได้ หรืออาจจะใช้ตัวอย่างสองแกนซึ่งสามารถสร้างความเค้นได้ภายในแกนเดียวเท่านั้น เช่นเดียวกับการทดสอบของ Driemeier และคณะ [16]

ระบบทดสอบสองแกนที่สามารถสร้างอัตราส่วนของความเค้นให้เกิดขึ้นภายในตัวอย่างการทดสอบสองแกน

ได้จะกระทำโดยใช้เครื่องทดสอบสองแกนที่ควบคุมโดยระบบแม่เหล็กไฟฟ้า Brünig และคณะ [28] ได้แสดงให้เห็นว่าระบบดังกล่าวสามารถให้ผลการทดสอบที่มีความแม่นยำได้โดยใช้เครื่องทดสอบสองแกนรุ่น LFM – BIAx 20 kN จากบริษัท Walter and Bai ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ (ภาพที่ 8) ซึ่งประกอบไปด้วยกระบอกแรงสี่ชิ้นที่สร้างแรงได้อย่างอิสระ การยึดตรึงตัวอย่างการทดสอบสามารถกระทำได้ผ่านการจับยึด (Clamping) หรือการใช้สลักแนวทางการทดสอบโดยใช้รูปแบบดังกล่าวถูกนำไปใช้ในงานวิจัยของ Gerke และคณะ [29] ต่อไป ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้ระบบทดสอบสองแกนมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำมาใช้ในการทดสอบตัวอย่างสองแกนสำหรับโลหะเหนียวได้ ซึ่งสามารถสร้างสภาวะความเค้นที่ต้องการผ่านการปรับอัตราส่วนของแรงที่กระทำในแต่ละกระบอกแรงที่ใช้ในระบบทดสอบ

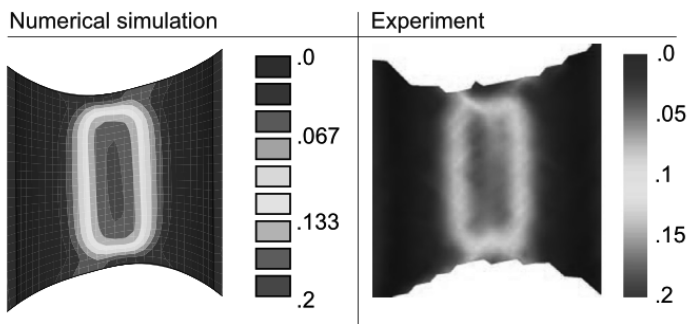


ภาพที่ 8 เครื่องทดสอบสองแกน รุ่น LFM-BIAx 20 kN จากบริษัท Walter and Bai ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

5.3 การวัดความเครียดในบริเวณวิกฤต

การทดสอบแกนเดียวมักใช้สเตรนเกจ (Strain gauge) ในการวัดความเครียดที่เกิดขึ้น (Driemeier และคณะ) [16] ซึ่งทำให้ได้รับข้อมูลความเครียดและความเค้นโดยทั่วไปของตัวอย่างการทดสอบเท่านั้น ในการทดสอบของ Brünig และคณะ [28] แสดงให้เห็นว่า

แม้การทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบสองแกนจะสามารถสร้างสถานะความเค้นในรูปแบบต่างๆ ได้โดยการปรับอัตราส่วนของความเค้นที่กระทำต่อตัวอย่างการทดสอบ แต่การวัดความเครียดยังสามารถกระทำได้ผ่านการใช้สเตรนเกจเท่านั้น



ภาพที่ 9 การเปรียบเทียบความเครียดเนื่องระหว่างผลการคำนวณจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์และการวัดความเครียดผ่าน DIC ระหว่างการทดสอบจาก Gerke และคณะ [29]

การวัดความเครียดที่เกิดขึ้นในบริเวณเล็กๆ (ประมาณ 20 ตร.มม.) เป็นหนึ่งในความท้าทายสำหรับการทดสอบโลหะด้านทฤษฎีความเสียหายซึ่งต้องใช้ค่าในการทดสอบที่มีความแม่นยำสูง งานวิจัยของ Gerke และคณะ [29] ได้ใช้ระบบการวัดสนามความเครียดที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่พื้นผิวของวัสดุ โดยใช้ระบบดิจิทัลอิมเมจคอร์เรลชัน หรือเรียกสั้นๆ ว่า DIC (Digital Image Correlation) โดยใช้หลักการในการสร้างสนามความเครียดจากการเปรียบเทียบความสว่างที่เปลี่ยนไปบนพื้นผิวของตัวอย่างการทดสอบที่ได้รับการสร้างลวดลายแบบสุ่มและถูกนำไปสร้างโครงข่ายในการคำนวณสนามความเครียดจากภาพที่ถูกบันทึกในระบบ งานวิจัยดังกล่าวใช้ระบบ DIC ของบริษัท Dantec/Limess แบบ Q-400 ซึ่งประกอบไปด้วยกล้องขนาด 2 Mpx และใช้การประมวลผลผ่านโปรแกรม Istra4D ซึ่งมากระบบ การใช้ระบบตรวจวัดสนามความเครียดผ่าน DIC จำเป็นต้องทำการเชื่อมโยงระบบดังกล่าวเข้ากับเครื่องทดสอบสอง

แกนเพื่อให้ข้อมูลที่บันทึกตรงกับแรงที่เกิดขึ้น ณ เวลาใดๆ ของเครื่องทดสอบสองแกน

การวัดสนามความเครียดที่เกิดขึ้นผ่านระบบดังกล่าวสามารถสร้างข้อมูลซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบได้อย่างแม่นยำตามที่แสดงในภาพที่ 9 ซึ่งคุณภาพของข้อมูลสนามความเครียดจะได้รับอิทธิพลจากกระบวนการสร้างลวดลายแบบสุ่มบนพื้นผิวและรูปร่างของร่องของตัวอย่างการทดสอบ รูปแบบการทดสอบโดยใช้การวัดสนามความเครียดผ่านระบบ DIC ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยของ Zistl และคณะ [34] Gerke และคณะ [35] และ Brünig และคณะ [36] ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคุณภาพของระบบดังกล่าวที่สามารถใช้วัดสนามความเครียดในบริเวณเล็กๆ สำหรับนำไปตรวจสอบพฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียวได้

6. สรุปและอภิปราย

พฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียวมีพื้นฐานและแนวความคิดมาจากความเสียหายของคาซาโนฟและเกลซอน ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียวจะมีพฤติกรรมที่สัมพันธ์กับความเค้นสามแกนและค่าโหลดที่เกิดขึ้นในขณะนั้น ปัจจัยทั้งสองส่งผลให้เกิดความเสียหายจากการควมรวมช่องว่าง การเกิดช่องว่างใหม่ และการเกิดรอยร้าวขนาดเล็กในเมตริกโลหะ การนำปัจจัยดังกล่าวมาพัฒนาความรู้ด้านกลศาสตร์ความเสียหายมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการคำนวณที่มีความแม่นยำ

เกณฑ์ความเสียหายที่เป็นรูปแบบพื้นฐานที่ใช้อย่างแพร่หลายในการตรวจสอบพฤติกรรมและกลไกความเสียหายของวัสดุโลหะมาจากเกณฑ์การคราก GLD ซึ่งถูกพัฒนามาจากเกณฑ์การคราก GTN โดยจะอธิบายความเสียหายของวัสดุจากช่องว่างคล้ายทรงกลมที่เรียงตัวอยู่ในวัสดุและใช้ค่าพารามิเตอร์หลายค่าในการอธิบายอิทธิพลของรูปร่างและการเปลี่ยนรูปของช่องว่างดังกล่าว การดัดแปลงเกณฑ์การคราก GLD สามารถแสดงพฤติกรรม

การเสียหายของวัตถุภายใต้ช่วงความเค้นสามแกนต่างๆ ได้โดยไม่ต้องทำการนิยามหรือสร้างเงื่อนไขความเสียหายเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการอธิบายพฤติกรรมความเสียหาย โมเดลความเสียหายที่ได้รับความนิยมต่อไปได้แก่ความเสียหาย CDM ซึ่งอธิบายความเสียหายของวัตถุภายใต้กลศาสตร์คอนตินันต์และใช้สมการเงื่อนไขการเสียหายในการบ่งชี้การเริ่มการเสียหายในวัตถุพร้อมทั้งอธิบายทิศทางความเสียหายผ่านเทนเซอร์การเพิ่มความเครียดการเสียหาย ทั้งนี้รูปแบบความเสียหาย CDM สามารถอธิบายพฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะได้โดยใช้สเกลาร์พารามิเตอร์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเค้นสามแกนและค่าโหลดเพียงสองค่าเท่านั้น ความเสียหายทั้งสองรูปแบบมีความแตกต่างกันในทฤษฎีพื้นฐานซึ่งการเลือกใช้รูปแบบความเสียหายในการวิเคราะห์พฤติกรรมความเสียหายจำเป็นต้องพิจารณาความเหมาะสมของรูปแบบความเสียหายดังกล่าวก่อน

กระบวนการทดสอบ ตัวอย่างการทดสอบ เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ และระบบวัดสนามความเครียดมีผลต่อการประเมินพฤติกรรมความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะเป็นอย่างมาก การใช้การคำนวณที่แม่นยำต้องควบคู่กับระบบตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความน่าเชื่อถือ การใช้เครื่องทดสอบสองแกนที่สามารถสร้างแรงดึงและแรงอัดในแกนต่างๆ ได้อย่างอิสระภายใต้ระบบตรวจวัดสนามความเครียดแบบดิจิทัลอิมเมจคอร์รีเลชัน DIC ซึ่งสามารถวัดสนามความเครียดผ่านการประมวลผลข้อมูลภาพถ่าย แสดงให้เห็นว่า การตรวจสอบพฤติกรรมความเสียหายของตัวอย่างการทดสอบสองแกนในบริเวณเล็กๆ สามารถกระทำได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ระบบดังกล่าว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความก้าวหน้าของการวิจัยในด้านความเสียหายที่เกิดขึ้นในโลหะเหนียว ทั้งนี้การศึกษากลศาสตร์ความเสียหายของโลหะเหนียวมีแนวโน้มที่ดีสำหรับใช้ในการพัฒนาการวิเคราะห์แบบจำลองต่างๆ ที่จำเป็นต้องนำพฤติกรรมความเสียหายของวัตถุไปร่วมพิจารณาด้วย

การประยุกต์ใช้ความรู้ด้านกลศาสตร์ความเสียหายส่วนใหญ่ให้ความสนใจต่อพฤติกรรมความเสียหายของโลหะเหนียวในช่วงความเค้นสามแกนเป็นศูนย์และเป็นบวกสูง ทั้งนี้การพัฒนาการวิจัยและตัวอย่างการทดสอบที่เหมาะสมต่อการพิสูจน์แนวความคิดด้านกลศาสตร์ความเสียหายจำเป็นต้องออกแบบตัวอย่างและวิธีการทดสอบที่สามารถสร้างความเค้นสามแกนเป็นลบสูงได้ ซึ่งการศึกษาและงานวิจัยในอนาคตจะเน้นสำหรับการสร้างตัวอย่างการทดสอบที่สามารถสร้างความเค้นสามแกนเป็นลบสูงเพื่อใช้สำหรับการยืนยันพารามิเตอร์ของทฤษฎี CDM ได้ โดยการพิสูจน์แนวความคิดดังกล่าวมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการพัฒนาสมการพื้นฐานสำหรับกลศาสตร์ความเสียหายในอนาคต

7. บรรณานุกรม

- (1) พันโท วสันต์ พัฒน์วิชัยโชติ, พันตรี ผศ.ดร.ณัฐพร นุตยะสกุล, "การทดสอบแปะเหล็กขึ้นรูปเย็นลักษณะรูปหมวกในโครงสร้างหลังคาเพื่อหาความสามารถในการรับน้ำหนัก," วารสารทางวิชาการ สภาอาจารย์ สกศ.ร.จปร., ปีที่ 10, เล่มที่ 10, หน้า 106-112, 2555.
- (2) ร้อยโท พีรศักดิ์ เอี่ยมละออ, พันตรี ผศ.ดร. ณัฐพร นุตยะสกุล, พันโท วสันต์ พัฒน์วิชัยโชติ, "การทดสอบบะเสของหลังคาเหล็กขึ้นรูปเย็นที่ใช้เหล็กชุบตัวเชื่อมสองตัวประกอบกันเพื่อใช้ในอาคารที่สามารถก่อสร้างได้อย่างรวดเร็วในภารกิจทางทหาร," วารสารทางวิชาการ สภาอาจารย์ สกศ.ร.จปร., ปีที่ 9, เล่มที่ 9, หน้า 23-31, 2554.
- (3) W. Hiranmarn, P. Chomcheun, N. Nuttayasakul, "Experiments on Cold-Formed Steel Lipped Channel Columns with End-Track in Compression," CRMA Journal, vol. 12, pp. 11-19, 2014.
- (4) I. Barsoum, J. Faleskog, S. Pingle, "The Influence of the Lode Parameter on Ductile Failure Strain in Steel," Procedia Engineering, pp. 69-75, 2011.
- (5) S. Gerke, M. Zistl, M. Schmidt, M. Brünig, "Damage and fracture of ductile sheet metal: New biaxially loaded specimens for material parameter identification," Procedia Structural Integrity, vol. 13, pp. 39-44, 2018.
- (6) M. Brünig, D. Albrecht, S. Gerke, "Numerical analyses of stress-triaxiality-dependent inelastic deformation behavior of aluminum alloys," International Journal of Damage Mechanic, pp. 299-317, 2003.

- (7) K. Danas, P. Ponte Castaneda, "Influence of the lode parameter and the stress triaxility on the failure of elasto-plastic porous materials," *International Journal of Solids and Structures*, pp. 1325-1342, 2012.
- (8) D. Gross, T. Seelig, "Bruchmechanik mit einer Einfuehrung in die Mikromechanik, Berlin Heidelberg," Springer-Verlag, 2007.
- (9) P. Kattan and G. Voyiadjis, "Damage Mechanics with Finite Elements, Berlin Heidelberg," Springer-Verlag, 2002.
- (10) A. Gurson, "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part i - Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media," *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, no. 99, pp. 2-15, 1977.
- (11) A. Needleman, V. Tvergaard, "An analysis of ductile rupture in notched bars," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, pp. 461-490, 1984.
- (12) Y. Bao, T. Wierzbicki, "On the cut-off value of the negative triaxiality for fracture," *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 1049-1069, 2004.
- (13) X. Gao, J. Kim, "Modeling of ductile fracture: Significance of void coalescence," *International Journal of Solids and Structures*, no. 43, pp. 6277-6293, 2006.
- (14) K. Zhang, J. Bai, D. Francois, "Numerical analysis of the influence of the Lode parameter on void growth," *International Journal of Solids and Structures*, no. 38, pp. 5847-5856, 2001.
- (15) M. Brünig, S. Gerke, V. Hagenbrock, "Micro-mechanical studies on the effect of the stress triaxiality and the Lode parameter on ductile damage," *International Journal of Plasticity*, no. 50, pp. 49-65, 2013.
- (16) L. Driemeier, M. Brünig, G. Micheli, M. Alves, "Experiments on stress-triaxiality dependence of material behaviour of aluminum alloys," *Mechanics of Materials*, no. 42, pp. 207-217, 2010.
- (17) M. Brünig, S. Gerke, M. Schmidt, "Damage and failure at negative stress triaxialities: Experiments, modeling and numerical simulations," *International Journal of Plasticity*, pp. 70-82, 2018.
- (18) M. Brünig, O. Chyra, D. Albrecht, L. Driemeier, M. Alves, "A ductile damage criterion at various stress triaxialities," *International Journal of Plasticity*, pp. 1731-1755, 2008.
- (19) M. Brünig, S. Gerke, D. Brenner, "New 2D-Experiments and Numerical Simulations on Stress-State-Dependence of Ductile Damage and Failure," *Procedia Materials Science*, pp. 177-182, 2014.
- (20) M. Gologanu, J. B. Leblond, G. Perrin, J. Devaux, "Recent extensions of Gurson's model for porous ductile metals," in *Continuum Micromechanics, CISM Courses and Lectures*, New York, Springer, no. 377, pp. 61-130, 1997.
- (21) M. Gologanu, J. B. Leblond, G. Perri, J. Devaux, "Theoretical models for void coalescence in porous ductile solid. I. Coalescence "in layers"," *International Journal of Solids and Structures*, pp. 5581-5594, 2001.
- (22) T. Pardoen, J. Hutchinson, "An extent model for void growth and coalescence," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, no. 48, pp. 2467-2512, 2000.
- (23) M. Gologanu, J. B. Leblond, G. Perrin, J. Devaux, "Theoretical models for void coalescence in porous ductile solids. II. Coalescence "in columns"," *International Journal of Solids and Structures*, no. 38, pp. 5595-5604, 2001.
- (24) X. Gao, T. Zhang, M. Hayden, C. Roe, "Effect of the stress state on the plasticity and ductile failure of an aluminum 5083 alloy," *International Journal of Plasticity*, no. 25, pp. 2366-2382, 2009.
- (25) X. Gao, G. Zhang, C. Roe, "A Study on the Effect of the Stress State on Ductile Fracture," *International Journal of Damage Mechanics*, no. 19, pp. 75-94, 2010.
- (26) S. Keralavarma, A. A. Benzerga, "A constitutive model for plastically anisotropic solids with non-spherical voids," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, no. 58, pp. 874-901, 2010.
- (27) N. Bonora, D. Gentile, A. N. G. Pirondi, "Ductile damage evolution under triaxial statte of stress theory and experiments," *International Journal of Plasticity*, pp. 981-1007, 2005.
- (28) M. Brünig, D. Brenner, S. Gerke, "Stress state dependence of ductile damage and fructure behavior: Experiment and numerical simulation," *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 152-169, 2015.
- (29) S. Gerke, P. Adulyasak, M. Brünig, "New biaxially loaded specimens for the analysis of damage and fracture in sheet metals," *International journal of Solids and Structures*, pp. 209-218, 2017.
- (30) Q. Yin, C. Soyarslan, K. Isik, A. Tekkaya, "A grooved in-plane torsion test for the investigation of shear

- fracture in sheet materials," *International Journal of Solids and Structures*, no. 66, pp. 121-132, 2015.
- (31) M. Arcan, Z. Hashin and A. Voloshin, "A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials," *Experimental Mechanics*, no. 18, pp. 141-146, 1978.
- (32) M. Brünig, S. Gerke, M. Schmidt, "Biaxial Experiments and Numerical Simulations on Damage and Fracture Mechanisms in Ductile Metals at Different Loading Conditions," *Procedia Structural Integrity*, no. 2, pp. 3109-3116, 2016.
- (33) A. Kao, H. Kuhn, O. Richmond, W. Spitzig, "Tensile fracture and fractographic analysis of 1045 spheroidized steel under," *J Mater Res*, no. 5, pp. 83-91, 1990.
- (34) M. Zisl, S. Gerke, M. Brünig, "Biaxial experiments on the effect of non-proportional loading paths on damage and fracture behavior of ductile metals," *Procedia Structural Integrity*, no. 13, pp. 57-62, 2018.
- (35) S. Gerke, M. Zisl, A. Bhardwaj, M. Brünig, "Experiments with the X0-specimen on the effect of non-proportional loading paths on damage and fracture mechanisms in aluminum alloys," *International Journal of Solids and Structures*, no. 163, pp. 157-169, 2019.
- (36) M. Brünig, S. Gerke, M. Zisl, "Experiments and numerical simulations with the H-specimen on damage and fracture of ductile metals under non proportional loading paths," *Engineering Fracture Mechanics*, no. 217, pp. 106531, 2019.

การศึกษาระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

The Study of the Mixing Duration Time and Recirculation Rate Effect to Biogas Production from Sweet Corn Waste by Dry Fermentation Process

ศศิธร ไสปา¹

Sasithorn Saipa¹

ฐปน ชื่นบาล²

Tapana Cheunbarn²

นิกราน หอมดวง¹

Nigran Homdoun

จุฑาภรณ์ ชนะถาวร¹

Jutaporn Chanathaworn

รจพรรณ นิรัญศิลป์^{1*}

Rotjapun Nirunsin^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
จังหวัดเชียงใหม่ 50290 ประเทศไทย

^{1*}Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University,
Chiang Mai 50290, Thailand.

²สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 50290 ประเทศไทย

²Environmental Technology, Faculty of Science, Maejo University,
Chiang Mai 50290, Thailand.

*Corresponding Author: rotjapun_energy@hotmail.com

(Received: September 18, 2019, Accepted: July 17, 2019)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในอุตสาหกรรมแปรรูปข้าวโพดหวาน และศึกษาระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง โดยทำการศึกษาภายใต้สภาวะการย่อยสลายแบบไร้อากาศในระดับต้นแบบ (Pilot Scale) ขนาด 1,000 L ด้วยกระบวนการหมักแบบกะ ภายใต้อุณหภูมิสภาวะแวดล้อม ที่ปริมาณค่าของแข็งทั้งหมด (TS) เริ่มต้น เท่ากับ 25% (w/v) และระยะเวลากักเก็บ 30 days โดยแบ่งเงื่อนไขการทดลองออกเป็น 2 เงื่อนไข ได้แก่ กระบวนการหมักภายใต้อัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h รอบละ 10 mins ตั้งแต่เวลา 06.00–18.00 น. จากการศึกษาพบว่าที่อัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันเฉลี่ยเท่ากับ 283.34 และ 240.63 L/day ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของระบบ

เท่ากับ 9,060.86 และ 7,688.11 L สัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 58.4% และ 59.6% และศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ยเท่ากับ 0.688 และ 0.564 L CH₄/g VS added ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด COD, TS และ VS พบว่าที่อัตราการกวนผสมทุก 6 h ให้ค่าสูงกว่าอัตราการกวนผสมทุก 12 h คือ 8.11%, 7.67% และ 6.71% ตามลำดับ ดังนั้นระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งที่ทำการเพิ่มอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า สามารถเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากขึ้นถึง 15.15% และผลจากการวิจัยนี้สามารถนำไปประกอบการพิจารณา เพื่อจัดทำระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในปริมาณมากได้

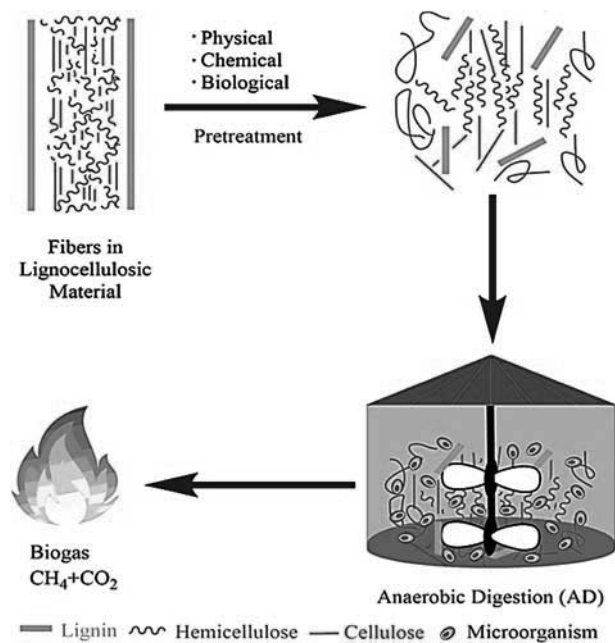
คำสำคัญ : ก๊าซชีวภาพ กระบวนการหมักแบบแห้ง อัตราการกวนผสม หมุนเวียนตะกอน

Abstract : The main purposes of this research are to study the potential of biogas production using sweet corn agricultural wastes from the food processing industry and to investigate the mixing duration time and recirculation rate of the sludge that affects the dry fermentation process. The experiment was set to produce the gases via dry batch anaerobic digestion which was carried out in pilot scale (1,000 L) under ambient temperature condition and fixing of the initial total solid (TS) at 25% (w/v). Hydraulic retention time was 30 days and the experiments were divided into two groups with the recirculating rate of every 6 and 12 h, 10 mins each time, from 6.00 am to 6.00 pm. The results of this study showed the effects of using the mixing duration and recirculating rate at every 6 and 12 h had a daily average biogas production at 283.34 and 240.63 L/day, the cumulative biogas content of the system were 9,060.86 and 7,688.11 L. The highest proportions of methane were 58.4% and 59.6%. The average methane productions potential were 0.688 and 0.564 L CH₄/g VS added. In addition, when comparing the efficiency of COD, TS and VS removal, it was found that the mixing rate of every 6 h gave higher value than the mixing rate of every 12 h, which were 77.08%, 61.26% and 62.56%, respectively. Therefore, the biogas production systems via dry fermentation process with the doubled recirculating rate were able to increase the gas production 15.15%. The results of this research can be used in establishing a biogas system with dry fermentation process for industrial plants that have large amounts of agricultural waste.

Keywords : Biogas, Dry Fermentation, Mixing, Recirculating Rate

1. บทนำ

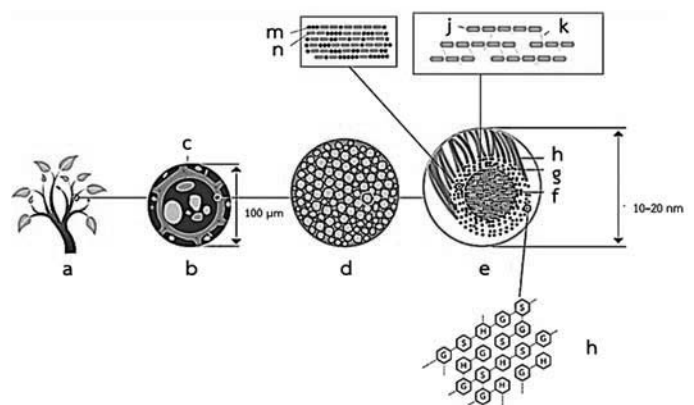
กากของเสียจากอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรจำพวกข้าวโพดหวาน (Sweet corn waste, SCW) ถือเป็นหนึ่งในชีวมวลที่มีศักยภาพสูงและสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานทดแทน ในกลุ่มเทคโนโลยีระบบก๊าซชีวภาพ ซึ่งสามารถนำกากของเสียจากอุตสาหกรรมมาก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยเปลี่ยนจากวัสดุเหลือทิ้งเป็นพลังงานหมุนเวียนกลับไปใช้ในองค์กรหรือสถานประกอบการภายใต้กระบวนการย่อยในสภาวะการหมักแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion, AD) ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส [2]

โดยกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จำแนกเป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการหมักแบบแห้ง (Dry anaerobic digestion) และแบบเปียก (Wet anaerobic digestion) ซึ่งมีการควบคุมการบ่อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid, TS) ประมาณ 20%–40% และน้อยกว่า 20% [1] ตามลำดับ โดย

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นก๊าซมีเทน (CH₄) ค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนอยู่ระหว่าง 55%–65% ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้ทั้งความร้อนและไฟฟ้า [3, 4] และพลังงานที่ผลิตได้ดังกล่าวสามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตของสถานประกอบการได้ รวมถึงผลพลอยได้อื่นๆ ที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพอันประกอบไปด้วยปุ๋ยอินทรีย์ เชื้อเพลิงอัดแท่งหรือเม็ด เป็นต้น [5]



a = Plant, b = Plant cell, c = Plant wall, d = Macrofibril, e = Microfibril, f = Cellulose, g = Hemicellulose, h = Lignin, j = Glucose, k = Hydrogen bond, m = Pentose, n = Hexose

ภาพที่ 2 โครงสร้างของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส [6]

โดยทั่วไปโครงสร้างของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นสารประกอบจำพวกลิกโนเซลลูโลส ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งส่วนใหญ่จะพบเซลลูโลส 40%–60% เฮมิเซลลูโลส 20%–30% และลิกนิน 15%–30% โดยประมาณ ซึ่งลักษณะองค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร [6] ดังแสดงในภาพที่ 2

สารประกอบลิกโนเซลลูโลสก่อนนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานก๊าซชีวภาพนั้นจะต้องทำการปรับสภาพเบื้องต้นก่อน เพื่อเพิ่มศักยภาพในการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ลดความเป็นผลึกของเซลลูโลสและเพิ่มความพรุนความวสุ ซึ่งกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบ สามารถ

แบ่งได้เป็น 4 วิธีหลัก ประกอบไปด้วยวิธีการทางกายภาพ วิธีการทางเคมี วิธีการทางกายภาพร่วมกับทางเคมี และวิธีการทางชีวภาพ โดยวิธีการปรับสภาพแบบทางชีวภาพถือเป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ซึ่งวิธีการดังกล่าวเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า พืชหมัก (Silage) [5] โดยเป็นวิธีการรักษาพืชที่ทำการหมักรวมโดยใช้แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดแลคติกเพื่อเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตไปเป็นกรดอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของกรดแลคติกส่วนใหญ่จะเกิดภายใต้สภาวะการหมักแบบไร้อากาศ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการหมักจะสามารถอยู่ได้นาน [2, 4] โดยคุณค่าทางอาหารจะไม่เปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่นิยมนำพืชประเภทลิกโนเซลลูโลสมาเป็นส่วนประกอบหลัก เนื่องจากหาง่ายและต้นทุนในการผลิตต่ำ [5] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างแลคติกในพืชหมักอีกทั้งยังส่งผลให้ค่า pH ของพืชหมักจะลดลงต่ำกว่า 4 การที่ค่า pH มีค่าความเป็นกรดสูงส่งผลให้จำนวนจุลินทรีย์ที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการหมักลดลง ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมทำการเติมแบคทีเรียกลุ่มกรดแลคติกลงในพืชหมัก เพื่อเร่งกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพให้เร็วขึ้น [6]

จากการสำรวจปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรแห่งหนึ่งในจังหวัดเชียงใหม่ พบว่าอุตสาหกรรมแห่งนี้มีปริมาณของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทข้าวโพดหวานเป็นจำนวนมากเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 100 Tons/day โดยปกติแล้วอุตสาหกรรมแห่งนี้มีระบบการจัดการปริมาณวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยการจำหน่ายให้แก่กลุ่มเกษตรกรโคนมและโคเนื้อ และหากมีปริมาณเหลือทิ้งมากกว่าที่กลุ่มเกษตรกรโคนมและโคเนื้อจะรับได้ จะใช้วิธีการทำลายทิ้งด้วยการนำไปฝังกลบ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ในระยะยาว ทางบริษัทจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาการกำจัดของเสียดังกล่าวด้วยการเปลี่ยนเป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบของพลังงานก๊าซชีวภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sopee and Natthanicha (2017) [7] ได้ทำการศึกษการผลิตก๊าซ

ชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานร่วมกับมูลสัตว์ (มูลวัว มูลสุกรและมูลแพะ) สัดส่วน เท่ากับ 1:1 (w/w) ด้วยกระบวนการหมักแห้งที่มีการป้อนสารอินทรีย์แบบครั้งเดียวและทำกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วย NaOH ค่าความเข้มข้น 2% (w/v) เป็นระยะเวลา 48 h ทำการอุณหภูมิควบคุม 35 ± 2 °C ความชื้น $74 \pm 3\%$ และค่าของแข็งทั้งหมดเริ่มต้นเท่ากับ 25% (w/v) จากการศึกษาพบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักรวมของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานร่วมกับมูลแพะมีค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biomethane potential, BMP) มากที่สุดเท่ากับ 68.2% ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน เท่ากับ 46.0% และศักยภาพของการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ $5.05 \text{ L CH}_4/\text{g VS}_{\text{Removed}}$

Meggyes and Nagy (2012) [8] ได้ทำการศึกษาใช้วัตถุดิบจากมูลสุกรผสมกับกากข้าวฟ่าง กากผลไม้ และกากข้าวโพด หมัก 43–50 days พบว่ากากของพืชชนิดต่างๆ มีผลต่อปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นแตกต่างกันคือ มูลสุกรผสมกากข้าวฟ่างได้มีเทน 52.0%–59.0% ใกล้เคียงกับที่ผสมกากข้าวโพด ได้มีเทน 52.2%–59.5% ผสมกากผลไม้ 50% ได้มีเทน 62.5%–74.9% และผสมกากผลไม้ 25% ได้มีเทนสูงสุด 66.8%–77.1%

Meixia, et al. (2014) [9] ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากซังข้าวโพดสำหรับการผลิตก๊าซมีเทน โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ Bionic คือถังปฏิกรณ์ที่ได้ทำการจำลองการย่อยสลายแบบสัตว์เคี้ยวเอื้อง โดยใช้ปริมาณของซังข้าวโพด เท่ากับ 100 g ร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ปริมาณ เท่ากับ 1,000 mL จากการศึกษาพบว่า ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด $265.5 \text{ mL/g VS}_{\text{added}}$ และผลิตก๊าซมีเทน 63.3% ของปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้

Libin, et al. (2015) [10] ได้ทำการศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการกวนผสม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการก่อตัวเป็นชั้นของซังข้าวโพด ซึ่งระบบทำการกำหนดระยะเวลาการกวนทุกๆ 2, 6 และ 10 h ทำการกวนผสมตลอดระยะ

เวลา 24 h โดยระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุประเภทของแข็งไม่มีระบบการกวนผสมภายในระบบจะทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงมากถึง 81.87%–87.90% จากการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลาการกวนผสมทุกๆ 2 h สามารถลดการก่อกวนของชั้นขี้ข้าวโพดได้มากที่สุด อีกทั้งการวิจัยดังกล่าวยังได้ทำการศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้ในการกวนผสมภายในระบบที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพในระยะเวลาทุกๆ 2, 4, 8, 12 และ 24 h ที่ OLR เท่ากับ 1.44, 1.78 และ 2.11 g COD/L-day ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า OLR เท่ากับ 1.78 g COD/L-day ที่ระยะเวลาการกวนผสมทุกๆ 2 h ให้ปริมาณศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุด เท่ากับ 563 ± 54 mL/g VS_{added} โดยศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของระยะเวลาการกวนผสมดังกล่าวยังให้ค่าที่ใกล้เคียงกับระยะเวลาการกวนผสมทุกๆ 4 และ 8 h ที่ทุกค่า OLR อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังพบว่าถ้าหากทำการกวนผสมมากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง

ดังนั้นจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานจากอุตสาหกรรมแปรรูปข้าวโพดหวานของบริษัทดังกล่าวมาเป็นกลุ่มตัวอย่าง สำหรับใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอย่างถูกวิธีและเหมาะสม รวมถึงแก้ไขโจทย์ปัญหาของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก และทำให้ได้ต้นแบบในการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบหมักไร้อากาศแบบแห้ง อันจะเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาเพื่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

2.2 เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

3. สมมติฐานการวิจัย

ถึงปฏิกรณ์ที่มีระบบการกวนผสมอย่างทั่วถึงจะทำให้จุลินทรีย์สามารถสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้เพิ่มมากขึ้นมากกว่าถึงปฏิกรณ์ที่ไม่มีระบบการกวนผสม โดยระยะเวลาการกวนต้องมีความเหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วย ซึ่งถ้าหากทำการกวนผสมมากเกินไปจนเกินไปก็จะส่งผลโดยตรงทำให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

4. ขอบเขตของงานวิจัย

4.1 ขนาดของถังปฏิกรณ์ของต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L

4.2 วัตถุดิบที่ใช้คือ วัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดหวานประเภทซัง เปลือก และเมล็ดที่คัดทิ้งจากอุตสาหกรรมแปรรูปข้าวโพดหวานแห่งหนึ่งในจังหวัดเชียงใหม่

4.3 การปรับสภาพซัง เปลือก และเมล็ดคัดทิ้งของข้าวโพดหวานจะใช้กระบวนการแบบ Pre-acidification เป็นระยะเวลา 72 h

4.4 หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้คือ กากตะกอนน้ำเสียจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Anaerobic filter (AF) จากอุตสาหกรรมแปรรูปข้าวโพดหวานร่วมกับกากตะกอนมูลสุกรจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Modified cover lagoon (MCL) ของฟาร์มสุกรขนาดกลางในเขตพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่

4.5 ระบบมีการกวนผสมภายในระบบ ซึ่งได้กำหนดอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนน้ำทุกๆ 6 และ 12 h แต่ละรอบจะกวนผสมและหมุนเวียนรอบละ 10 mins

4.6 การย่อยสลายภายใต้อุณหภูมิสถานะแวดล้อม

4.7 กระบวนการป้อนสารอินทรีย์แบบกะ

4.8 ระยะเวลาในการทดลอง 30 days

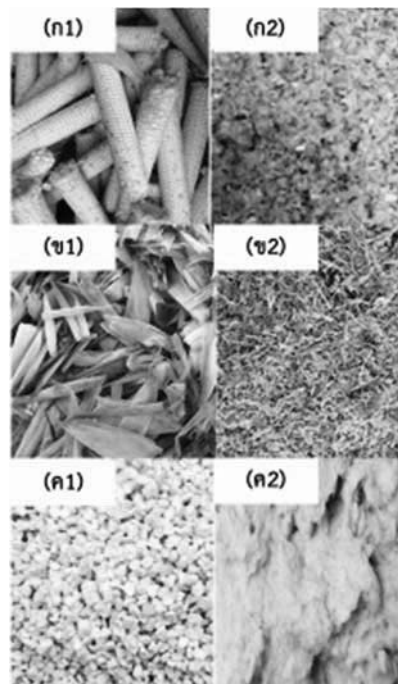
5. วิธีการดำเนินงานวิจัย

สำหรับขั้นตอนของการดำเนินการทำวิจัยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ส่วนที่ 2 วัสดุและอุปกรณ์ และส่วนที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

5.1 วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน ประกอบไปด้วย ชัง เปลือก และเมล็ดคัดทิ้ง ซึ่งสัดส่วนเหลือทิ้งที่เกิดจากกระบวนการผลิตมีค่าเท่ากับ 54:44:2 (w/w) ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานดังกล่าวเกิดจากกระบวนการแปรรูปข้าวโพดหวานบรรจุกระป๋อง โดยก่อนนำวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานดังกล่าวเข้ายังระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งจะต้องทำการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการปรับสภาพเชิงกลให้ได้ขนาดของวัสดุหมักขนาดประมาณ 5–10 mm จากนั้นจะนำวัสดุหมักที่ได้หลังจากกระบวนการปรับสภาพเชิงกลไปทำกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-acidification คือ การปรับสภาพให้วัสดุหมักเกิดกระบวนการหมักกรดก่อนหรือการเปลี่ยนสารอาหารตั้งต้นจำพวก น้ำตาล กรดอะมิโนและกรดไขมัน เป็นต้น ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ชนิดโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดวาเลอริก (Valeric acid) และกรดแลคติก (Lactic acid) โดยกรดที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีสัดส่วนของกรดอะซิติกสูงสุด [11] และมีการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นในขั้นตอนนี้ด้วย แบคทีเรียสร้างกรดมีอัตราการเจริญเติบโตสูง และทนทานต่อสภาพ

แวดล้อมได้ดี สำหรับการทดลองในครั้งนี้จะใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพแบบ Pre-acidification ประมาณ 72 h [11, 12]



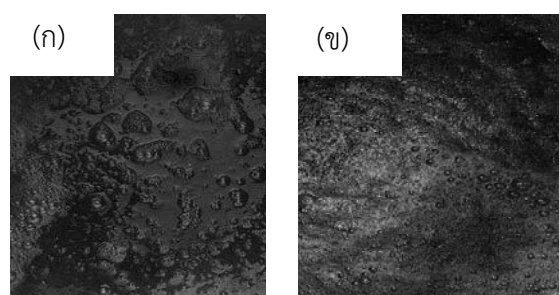
(ก) ชังข้าวโพดหวาน (ข) เปลือกข้าวโพดหวาน (ค) เมล็ดคัดทิ้งข้าวโพดหวาน (1) ก่อนปรับสภาพแบบ Pre-acidification (2) หลังปรับสภาพแบบ Pre-acidification

ภาพที่ 3 วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

5.2 หัวเชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งจะใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จากกากตะกอนจุลินทรีย์น้ำเสียจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Anaerobic filter ร่วมกับกากตะกอนมูลสุกรจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Modified cover lagoon จากฟาร์มสุกรขนาดกลางในเขตพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยสัดส่วนผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียต่อกากตะกอนมูลสุกร คือ 1:2 (v/v) [4, 5] ก่อนนำวัสดุหมักหลักคือ วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานจำพวก ชัง เปลือก

และเมล็ดคัดทิ้งเข้าระบบ จะต้องทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ โดยการนำหัวเชื้อจุลินทรีย์ใส่ถังถึงปฏิกรณ์ ก่อนเป็นระยะเวลา 7 days เพื่อให้หัวเชื้อจุลินทรีย์เกิดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพให้สิ้นสุดกระบวนการก่อน อีกทั้งยังเป็นการลดผลกระทบต่อหัวเชื้อที่จะส่งผลกระทบต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแห้ง [2, 3]



(ก) กากตะกอนน้ำเสีย

(ข) กากตะกอนมูลสุกร

ภาพที่ 4 หัวเชื้อจุลินทรีย์

5.3 วัสดุและอุปกรณ์

1) ถังปฏิกรณ์ระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

สำหรับวัสดุและอุปกรณ์ของถังปฏิกรณ์สำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 5 ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก

ส่วนที่ 1 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ สำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะใช้ถังปฏิกรณ์เป็นถังชนิดไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) จำนวน 1 ถัง ที่มีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อน ทนความร้อนและสารเคมีได้สูง รวมทั้งเป็นฉนวนไฟฟ้า สามารถป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ได้ สามารถรองรับวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานได้มากถึง 200 kg ระบบมีการกวนผสมภายในระบบที่อัตราการหมุนของมอเตอร์เท่ากับ 60 rpm และหมุนเวียนตะกอนภายในระบบที่อัตราการไหลเท่ากับ

60 L/mins

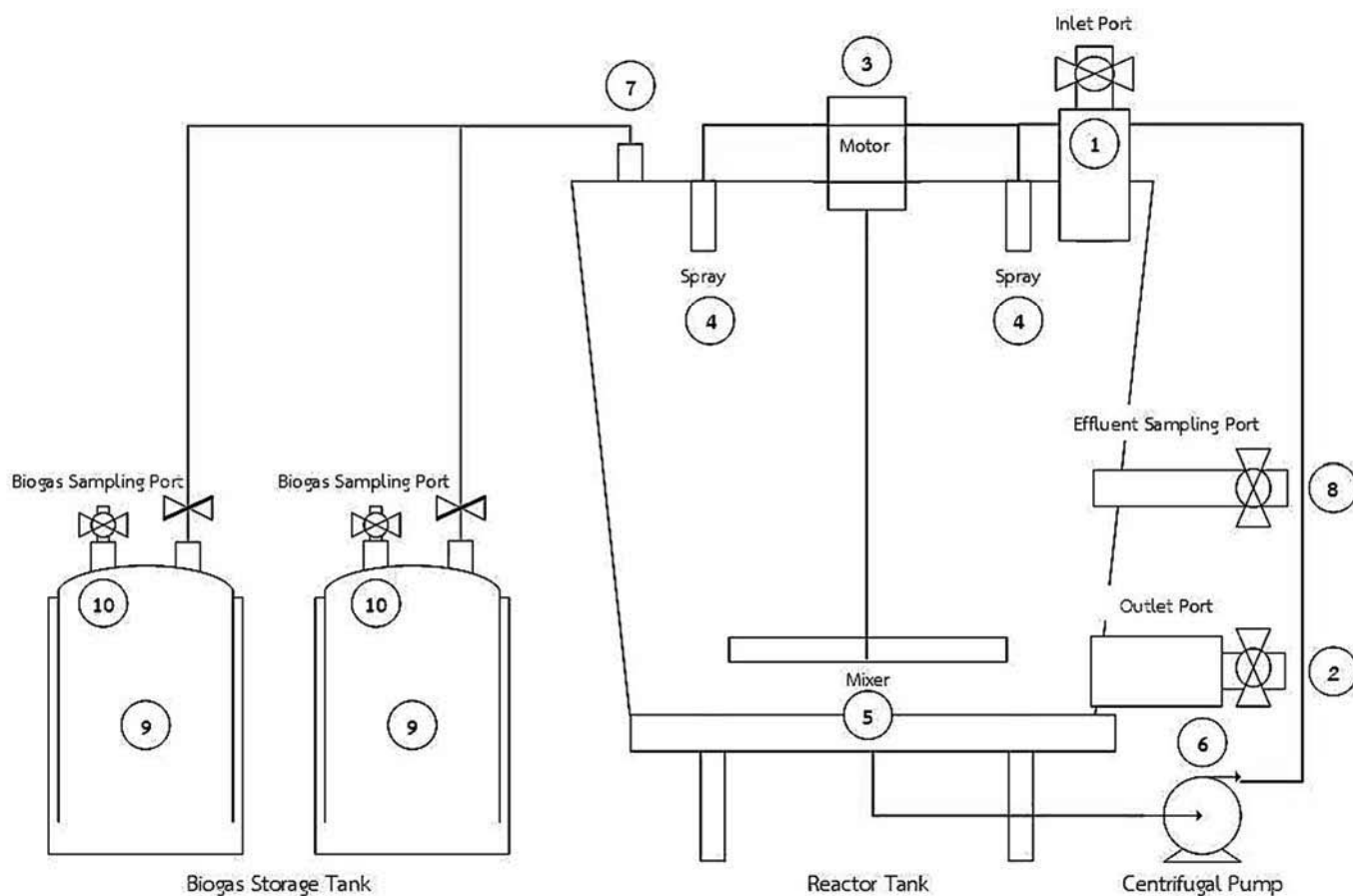
ส่วนที่ 2 ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ สำหรับระบบเก็บก๊าซชีวภาพจะใช้ถังเก็บก๊าซชีวภาพชนิด High density polyethylene (HDPE) ขนาด 150 L จำนวน 2 ถัง ที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นสูง แข็งแรง ทนทานต่อการกระแทก ทนทานต่อสภาพความเป็นกรด-ด่าง และไม่ไวต่อสารเคมี

2) หลักการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

โดยหลักการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งจะใช้หลักการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะการหมักแบบไร้อากาศ ขนาด 1,000 L ปริมาตรของวัสดุหมักเท่ากับ 500 L ลักษณะของกระบวนการหมักแบบกะ ระยะเวลาในการทดลอง 30 days สำหรับการเริ่มต้นทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งจะต้องทำการเติมวัสดุหมักเข้าถังระบบ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานและหัวเชื้อจุลินทรีย์ สัดส่วน 1 kg : 4 L [13] เข้าถังทางเข้าวัสดุหมักหมายเลข 1 โดยจะต้องทำการปรับค่า TS เริ่มต้น เท่ากับ 25% (w/v) [7, 8] จากนั้นทำการปิดระบบแล้วทำการกวนผสมหมายเลข 5 และหมุนเวียนตะกอนหมายเลข 6 มายังท่อผันตะกอนหมายเลข 4 ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยอัตราการกวนและหมุนเวียนจะทำการกวนผสมทุกๆ 6 และ 12 h แบบ Day time (06.00–18.00 น.) แต่ในรอบการกวนและหมุนเวียนตะกอนจะใช้ระยะเวลารอบละ 10 mins โดยระยะเวลาที่ใช้ในการกวนผสมได้ทำการอ้างอิงมาจากการวิจัยของ Libin, et al. (2015) [10] ที่ได้ทำการศึกษารากวนผสมภายในระบบทุกๆ 2, 4, 8, 12 และ 24 h จากการศึกษพบว่า ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุด คือ 2 h รองลงมา คือ 4, 8, 12 และ 24 h ตามลำดับ ซึ่งพบว่าอัตราการกวนผสมที่แตกต่างกัน 2 เท่า จะให้ผลผลิตของก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน ดังนั้นจากการศึกษางานวิจัยดังกล่าวจึงมาเป็นหัวข้อในการศึกษาผลของระยะเวลา

การกวนผสมที่อัตราการผสมแตกต่างกัน 2 อัตราการกวนผสม คือ ทุกๆ 6 และ 12 h เพื่อศึกษาความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการกวนผสม สำหรับจุดเก็บตัวอย่าง วัสดุหมักหมายเลข 8 สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วยค่า pH, TS, VS, COD, VFA และ ALK ตามลำดับ ซึ่งจะมีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทุก 3 days [7, 10] จากนั้นเมื่อระบบมีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น ก๊าซชีวภาพจะไหลผ่านท่อลำเลียงก๊าซชีวภาพหมายเลข 7 มายังถังเก็บก๊าซชีวภาพขนาด 250 L จำนวน 2 ถัง หมายเลข 9 ที่มีแรงดันน้อยกว่า โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะใช้หลักการแทนที่ด้วยน้ำ เพื่อรักษาสมดุลแรงดันทั้งหมดภายในระบบให้เท่ากัน โดยจะสังเกตได้

จากความสูงของถังเก็บก๊าซชีวภาพที่ดันสูงขึ้น ซึ่งแรงดันภายในระบบทำการดันน้ำให้เคลื่อนที่ต่างไปจากตำแหน่งเดิม [14] จากนั้นนำความสูงที่เปลี่ยนแปลงไปของถังเก็บก๊าซชีวภาพไปคำนวณหาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของระบบในแต่ละวัน จากนั้นเมื่อต้องการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจะทำการนำเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพแบบ Gas analyzer portable ยี่ห้อ Geotech รุ่น Biogas 5000 มาต่อเข้ายังจุดเก็บก๊าซชีวภาพหมายเลข 10 เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ จากนั้นเมื่อสิ้นสุดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เมื่อต้องการนำวัสดุหมักออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพสามารถนำวัสดุหมักออกได้ บริเวณทางออกของวัสดุหมักหมายเลข 2



- (1) Inlet port (2) Outlet port (3) Motor (4) Spray (5) Mixer (6) Pump
(7) Gas outlet (8) Effluent sampling port (9) Biogas storage tank (10) Biogas sampling port

ภาพที่ 5 แผนภาพแสดงลักษณะของถังปฏิกรณ์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

3) ขั้นตอนการทดลอง

สำหรับการทดลองของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L ปริมาตรของวัสดุหมักเท่ากับ 500 L ค่า TS เริ่มต้น เท่ากับ 25% (w/v) ลักษณะการป้อนสารอินทรีย์แบบกะ ระยะเวลาการทดลอง 30 days ทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 เงื่อนไขการทดลอง ภายใต้การศึกษาผลของอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง โดยทำการกำหนดอัตราการกวนและหมุนเวียนจะทำทุกๆ 6 และ 12 h แบบ Day time (06.00–18.00 น.) แต่ละรอบกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนรอบละ 10 mins ซึ่งมีขั้นตอนของกระบวนการทดลองดังต่อไปนี้

1. เก็บวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 วัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดหวาน ประกอบไปด้วย ชัง เปลือก และเมล็ดคั่วทั้งจากกระบวนการผลิตในสัดส่วน 54:44:2 (w/w) และส่วนที่ 2 หัวเชื้อจุลินทรีย์ ประกอบไปด้วย 2 ชนิด คือ กากตะกอนน้ำเสียจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Anaerobic filter ร่วมกับกากตะกอนมูลสุกรจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Modified cover lagoon จากฟาร์มสุกรขนาดกลางในสัดส่วน 1:2 (v/v)

2. ทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการนำหัวเชื้อจุลินทรีย์มาผลิตก๊าซชีวภาพให้สิ้นสุดกระบวนการก่อนนำวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานเข้ายังระบบ โดยจะใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพประมาณ 7 days

3. ทำการปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน จำพวก ชัง เปลือก และเมล็ดคั่วทั้งข้าวโพดหวาน ด้วยกระบวนการเชิงกลด้วยเครื่องสับหรือบดย่อยให้ได้ขนาด 5–10 mm เพื่อให้มีพื้นที่การย่อยสลายของจุลินทรีย์ทำงานได้ดีขึ้น จากนั้นจะทำการปรับสภาพแบบ Pre-acidification ภายใต้ระบบแบบปิดเป็นระยะเวลา 72 h เพื่อลดขั้นตอนของกระบวนการหมักกรดภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

4. จากนั้นเมื่อวัตถุดิบต่างๆ ได้มีการเตรียมความพร้อมในการนำเข้ากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยกระบวนการหมักแห้งแล้ว ให้นำชัง เปลือก และเมล็ดข้าวโพดหวานคั่วทั้งที่ได้ทำการปรับสภาพแล้วเข้าระบบ โดยสัดส่วนของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์ เท่ากับ 1 kg : 4 L และค่า TS เริ่มต้น เท่ากับ 25% (w/v)

5. จากนั้นให้ทำการปิดระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเตรียมการดำเนินการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งกระบวนการทดลองจะใช้ระยะเวลาของแต่ละการทดลอง 30 days โดยระบบดังกล่าวเป็นระบบการป้อนสารอินทรีย์แบบครั้งเดียว (Batch fermentation) โดยระบบจะมีการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนภายในระบบทุกๆ 6 และ 12 h แบบ Day time (06.00–18.00 น.) แต่ละรอบการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน รอบละ 10 mins

6. เมื่อระบบมีการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้น ก็จะทำทำการพิจารณาหาปริมาณของก๊าซชีวภาพจะทำการเติมน้ำลงในถังพลาสติกใสให้ท่วมถังเก็บก๊าซ โดยเปิดวาล์วก๊าซทองเหลือง เพื่อไล่อากาศที่อยู่ภายในถังเก็บก๊าซออกให้หมด

7. เติมน้ำลงในถังเก็บก๊าซชีวภาพด้านนอก โดยให้อยู่ที่ระดับอ้างอิง (0 cm) ตรวจสอบการรั่วซึมหลังการเติมน้ำวัตถุดิบ และวาล์ว เปิด-ปิด ให้อยู่ในตำแหน่งปกติ (ปิดวาล์วทุกวาล์ว)

8. ตั้งชุดการทดลอง ในบริเวณที่โล่งแจ้ง ซึ่งมีแสงแดดส่องทั่วถึงตลอดทั้งวัน เพื่อให้อุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานของหัวเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

9. การบันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบจะสามารถสังเกตได้จากการยกตัวสูงขึ้นของถังเก็บก๊าซชีวภาพ โดยจะมีระดับของถังเก็บก๊าซที่สูงต่างกันตามแต่ละความสูงของถังเก็บก๊าซชีวภาพ จากนั้นนำความสูงที่ได้จากข้างถังเก็บก๊าซไปเข้ายังสมการคำนวณ เพื่อหาปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน

10. เมื่อทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของระบบเรียบร้อยแล้วให้ทำการวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ โดยใช้เครื่องวัดก๊าซชีวภาพ Gas analyzer portable ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

11. การเก็บตัวอย่าง เพื่อนำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยวัตถุดิบที่จะนำไปผลิตก๊าซชีวภาพต้องทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบก่อนเริ่มต้นการทำงานของระบบ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบไปด้วย ค่า pH, COD, TS, VS, VFA และ ALK ซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ [1, 5]

สำหรับวิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งที่มีการกวนผสมและการหมุนเวียนตะกอนภายในระบบจะทำการวิเคราะห์ซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์ซึ่งจะมีวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

คุณสมบัติ	หน่วย	ตัวอย่าง	ความถี่	วิธีวิเคราะห์
pH ¹	-	วัสดุหมัก	1 day	APHA 4500
COD	g/L	วัสดุหมัก	3 days	APHA 5220
TS	mg/g	วัสดุหมัก	3 days	APHA 2540
VS	mg/g	วัสดุหมัก	3 days	APHA 2540
ALK	mg CaCO ₃ /L	วัสดุหมัก	3 days	APHA 2310
VFA	mg CH ₃ COOH/L	วัสดุหมัก	3 days	APHA 2310
Temperature ²	°C	ระบบ	1 day	Thermometer
Biogas volume	L	ก๊าซชีวภาพ	1 day	Water Replacement
Biogas composition ³	%	ก๊าซชีวภาพ	1 day	Biogas Analyzer

หมายเหตุ : ¹ยี่ห้อ Eutech รุ่น pH 510 (± 0.01)

²ยี่ห้อ Elitech รุ่น BT-3 ($\pm 1^{\circ}\text{C}$)

³ยี่ห้อ Geotech รุ่น Biogas 5000 ($\pm 0.5\%$)

6. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

6.1 คุณลักษณะของสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

1) วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

สำหรับลักษณะของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานก่อนการปรับสภาพแบบ Pre-acidification ประกอบไปด้วย ช่งข้าวโพดหวานมีลักษณะทางกายภาพสีเหลืองอ่อน แข็ง ความชื้นสูง ขนาดความยาว 10–15 cm เปลือกข้าวโพดหวานเปลือกมีลักษณะทางกายภาพสีเขียวอ่อนจนถึงเข้ม แข็ง ความชื้นสูง ขนาดความยาว 10–15 cm และเมล็ดคัดทิ้งข้าวโพดหวานมีลักษณะทางกายภาพสีเหลืองเข้ม อ่อนนิ่ม ความชื้นสูง ความยาว 1–2 cm และหลังจากทำการปรับสภาพแบบ Pre-acidification ประกอบไปด้วย ช่งข้าวโพดหวานมีลักษณะทางกายภาพสีเหลืองอ่อน แข็ง ความชื้นสูง เปลือกข้าวโพดหวานเปลือกมีลักษณะทางกายภาพสีเขียวอ่อนจนถึงเข้ม แข็ง ความชื้นสูง และเมล็ดคัดทิ้งข้าวโพดหวานมีลักษณะทางกายภาพสีเหลืองเข้ม อ่อนนิ่ม ความชื้นสูง โดยขนาดของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานจะมีขนาด 5–10 mm ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งหลังการปรับสภาพเชิงกลจะนำวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานจำพวก ช่ง เปลือก และเมล็ดคัดทิ้งมาผสมกันในสัดส่วน 54:44:2 (w/w) และลักษณะทางเคมีที่ได้ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ ประกอบไปด้วยค่า pH, Moisture Content, TS, VS และ C/N Ratio ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 พบว่าค่า pH ในวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานหมักลดลงก่อนกระบวนการปรับสภาพด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification จากค่า pH เท่ากับ 6.75 ± 0.32 เป็นค่า pH เท่ากับ 3.76 ± 0.12 มีค่า pH ที่ค่อนข้างเป็นกรด เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสารชีวโมเลกุลภายในของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว และจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ขนาดเล็ก เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ อีกทั้งยังพบว่าส่งผลทำให้

จุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ต้องการในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ
ลดจำนวนลง

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

คุณสมบัติ	หน่วย	ปริมาณ
ก่อนปรับสภาพด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification 72 h		
pH	-	6.75±0.32
Moisture Content	%	69.09±5.85
TS	mg/g	309.05±5.85
VS	mg/g	260.76±6.73
VS/TS Ratio	-	0.84±0.01
C/N Ratio	-	32.64
Cellulose	%	30.16
Hemicellulose	%	40.08
Lignin	%	5.56
หลังปรับสภาพด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification 72 h		
pH	-	3.76±0.12
Moisture Content	%	69.11±12.29
TS	mg/g	308.91±12.29
VS	mg/g	269.42±8.69
VS/TS Ratio	-	0.87±0.02
C/N Ratio	-	32.55
Cellulose	%	24.52
Hemicellulose	%	32.63
Lignin	%	4.08

เนื่องจากไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะที่มีความเป็นกรดได้ ถ้าปริมาณกรดแลคติกที่ผลิตได้มีมาก จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดแลคติกเองก็จะหยุดการเจริญเติบโตด้วยเช่นกัน ทำให้วัสดุเหลือทิ้งหมักเข้าสู่สภาวะคงที่ จุลินทรีย์จะหยุดการใช้สารอาหารในพืช เพื่อการเจริญเติบโตทำให้เหลือปริมาณสารอาหารในพืชหมักมากขึ้น ลดการสูญเสียโภชนาการเช่น โปรตีนในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจน (NH₃-N) [5] และค่า TS ก่อน และหลังปรับสภาพ มีค่า เท่ากับ 30.91% และ 30.89% ตามลำดับ และค่า VS มีค่า เท่ากับ 26.08% และ 26.94% ตาม

ลำดับ โดยอัตราส่วน VS/TS มีค่าเท่ากับ 0.84±0.01 และ 0.87±0.02 ตามลำดับ พบว่าค่า VS/TS Ratio ดังกล่าวเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่า VS/TS Ratio ควรอยู่ในช่วง 0.69–0.95 โดยจะให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุดคือ 0.95 [15, 16] และค่า C/N Ratio มีค่าเท่ากับ 32.64 และ 32.55 พบว่าค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นวัตถุดิบ สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดย C/N Ratio ของวัตถุดิบตั้งต้นที่สามารถนำมาผลิตก๊าซชีวภาพคือ ตั้งแต่ 8–35 [17, 18] แต่ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะอยู่ในช่วง 20–35 [9, 19]

2) หัวเชื้อจุลินทรีย์

สำหรับลักษณะของหัวเชื้อจุลินทรีย์อันประกอบไปด้วยกากตะกอนน้ำเสียมีลักษณะทางกายภาพเป็นสารแขวนลอย เม็ดกลมเล็กสีดำ มีการตกตะกอนไม่มึนกลื่น เหม็นเกิดจากการหมักตัวของสารอินทรีย์ และกากตะกอนมูลสุกรมีลักษณะทางกายภาพเป็นสารแขวนลอยเม็ด

ตารางที่ 3 คุณลักษณะของหัวเชื้อจุลินทรีย์

คุณสมบัติ	หน่วย	ปริมาณ
pH	-	7.72±0.18
Moisture Content	%	90.23±16.83
COD	mg/L	98,258.17±21.73
TS	mg/L	97,682.54±16.83
VS	mg/L	81,425.68±16.21
VS/TS Ratio	-	0.73±0.64
VFA	mg CH ₃ COOH/L	1,042.17±11.73
ALK	mg CaCO ₃ /L	4,685.76±12.49
VFA/ALK Ratio	mg CH ₃ COOH/ mg CaCO ₃	0.25±0.36
C/N Ratio	-	9.13

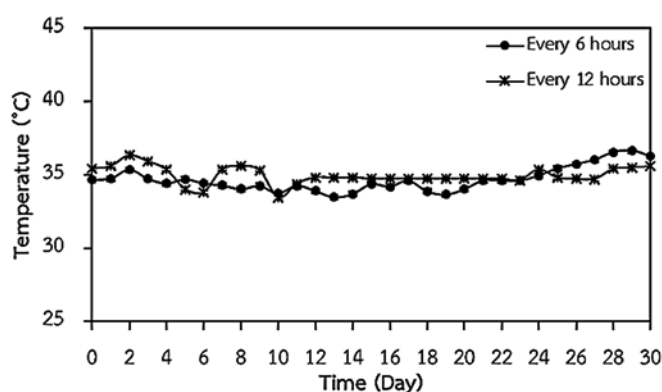
กลมเล็กสีน้ำตาลเข้ม มีการตกตะกอนและไม่มีการล้นเห้นเนื่องจากตะกอนที่ได้เกิดจากการชะล้างคอกหมูด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ของฟาร์มหมูจึงทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้ยังมีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์หลงเหลืออยู่ดังแสดงในภาพที่ 4 และลักษณะทางเคมีที่ได้ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ ประกอบไปด้วยค่า pH, Moisture content, COD, TS, VS, VFA, ALK และ C/N Ratio ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 พบว่าค่า pH มีค่าเท่ากับ 7.72 ± 0.18 พบว่าค่าดังกล่าวมีค่าที่ค่อนข้างเป็นเบสอ่อน เนื่องมาจากอัตราส่วนผสมระหว่างกากตะกอนมูลสุกรกับกากตะกอนน้ำเสียเท่ากับ 2:1 ซึ่งคุณสมบัติของกากตะกอนมูลสุกรเกิดจากการชะล้างคอกหมูด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ของฟาร์มหมู โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่า pH ที่เป็นเบสแก่จึงส่งผลทำให้ค่าสูงกว่าปกติเพียงเล็กน้อย สำหรับค่า pH ที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ใช้ในการดำรงชีวิตและใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ควรมีค่าอยู่ในช่วง 6.5–7.5 [3, 4] และค่า Chemical oxygen demand (COD) มีค่าเท่ากับ 98.25 ± 21.73 g/L พบว่าค่า ดังกล่าวยังบ่งบอกถึงศักยภาพในการนำหัวเชื้อจุลินทรีย์มาเป็นหัวเชื้อในการเดินระบบ โดยค่า COD ที่เหมาะสมต่อการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพและให้ค่าความคุ้มค่าต่อการลงทุนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 1,200 mg/L [1, 9] และค่า VS/TS Ratio มีค่าเท่ากับ 0.73 ± 0.64 พบว่าค่าดังกล่าวเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่า VS/TS Ratio ของตะกอนจุลินทรีย์ในบ่อหมักแบบไร้อากาศจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.70–0.85 [16] อีกทั้งยังพบว่าเมื่อระบบมีการเพิ่ม ค่า VS/TS Ratio ให้สูงขึ้นระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงขึ้น และจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบยังสามารถรักษาเสถียรภาพในระบบในคงที่ได้อย่างต่อเนื่อง และค่า VFA/ALK Ratio มีค่าเท่ากับ 0.25 ± 0.36 พบว่าค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ไม่เกิน 0.4 แสดงถึงกำลังในการบำบัดฟูลสูง หากอัตราส่วน

ดังกล่าวมีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่ากำลังบำบัดฟูลของระบบมีค่าต่ำมาก โดยอัตราการบำบัดฟูลของระบบที่มีค่าน้อยกว่า 0.4 จะส่งผลทำให้ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพในการทำงาน โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีใดๆ [17] และค่า C/N Ratio มีค่าเท่ากับ 9.13 พบว่า ค่าดังกล่าวมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ แต่ก็ยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นหัวเชื้อในการเดินระบบ โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่สามารถใช้ผลิตก๊าซชีวภาพคือ ตั้งแต่ 8–35 [18]

6.2 ผลการศึกษาอุณหภูมิภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับค่าอุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ เพื่อให้เกิดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจุลินทรีย์จะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 35 ± 2 °C ฉะนั้น เพื่อให้การทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ดำเนินการไปได้ด้วยดี ส่งผลทำให้เกิดก๊าซชีวภาพในปริมาณมากจะต้องรักษาอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ [11, 12]



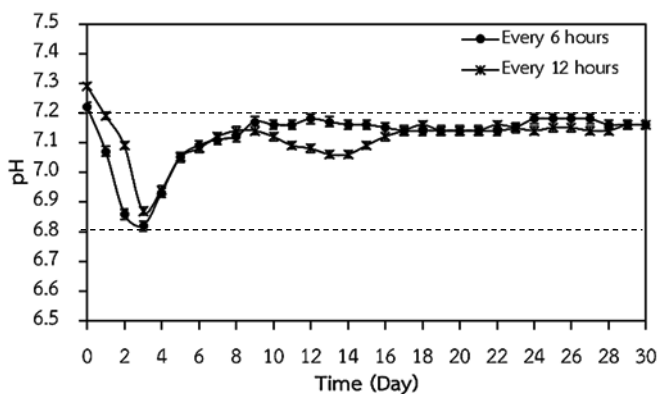
ภาพที่ 6 อุณหภูมิภายในเฉลี่ยของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

จากภาพที่ 6 พบว่าทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมและหมวนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h ซึ่งอุณหภูมิภายในเฉลี่ยของระบบผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ในช่วง 33.51–36.66 และ 33.45–36.35°C

โดยระบบมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งอุณหภูมิจะแปรผันตามอุณหภูมิของสภาพอากาศแวดล้อม โดยอุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยาเป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งอุณหภูมิในช่วงนี้มีชื่อเรียกว่า Mesophilic rang จะมีอุณหภูมิประมาณ 20–45°C [8, 9]

6.3 ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ใช้ในการดำรงชีวิตและใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนคือ ควรอยู่ในช่วง 6.5–7.5 [9] ซึ่ง ซึ่งถ้าค่า pH สูงหรือต่ำกว่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพลดลง [4] โดยค่า pH ที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนมากที่สุดสำหรับใช้ในการดำรงชีวิตและผลิตก๊าซมีเทน คือ ควรในช่วงระหว่าง 6.8–7.2 [14, 18]



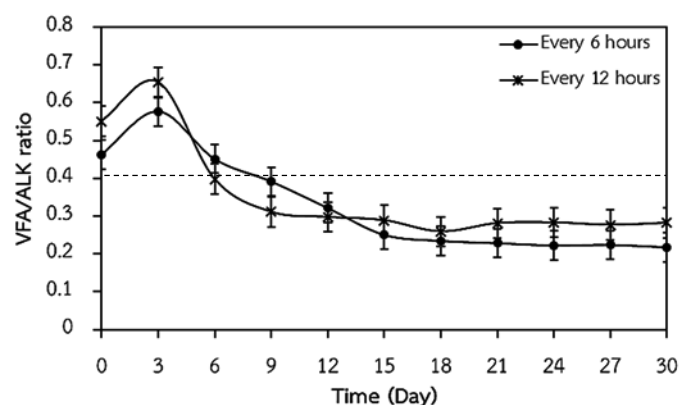
ภาพที่ 7 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

จากภาพที่ 7 พบว่าทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h โดยค่า pH ของระบบอยู่ในช่วง 6.82–7.22 และ 6.67–7.29 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์สร้างมีเทนสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้และเหมาะสมต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศ [12, 19] โดยในวันที่ 1–3 ของการทดลองของทั้ง 2 เงื่อนไขมีค่า pH ที่ลดลงอย่างรวดเร็ว อันเนื่องมาจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

ที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-acidification [20] ได้เปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายขนาดเล็ก เพื่อเปลี่ยนไปเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ [21]

6.4 ผลการศึกษาคัดส่วนของค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ต่อค่าสภาพความเป็นด่าง (ALK)

สำหรับสัดส่วนกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ต่อสภาพความเป็นด่าง (ALK) สภาพความเป็นกรดและความเป็นด่างเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากต่อการทำงานของแบคทีเรียในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งต้องอาศัยแบคทีเรียสองพวกทำงานร่วมกันอย่างต่อเนื่อง โดยปกติปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายจะอยู่ในรูปของกรดอะซิติก (CH_3COOH) ควรมีค่าอยู่ในช่วง 50–500 mg/L [3] หากปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายในรูปของกรดอะซิติกมีค่ามากกว่า 2,000 mg/L [4, 5] จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพลดลง ส่วนค่าความเป็นด่างไม่ควรต่ำกว่า 1,000 mg/L ในรูปของหินปูน (CaCO_3) [11] เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดค่าพีเอชภายในระบบมีค่าลดลงจนเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบ [12, 14]



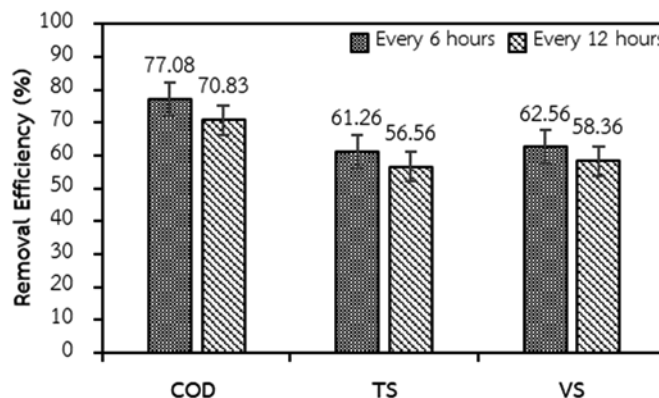
ภาพที่ 8 ค่า VFA/ALK Ratio

จากภาพที่ 8 พบว่าทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h อัตราส่วน VFA/ALK อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ไม่เกิน 0.4 [11, 20]

โดยมีค่า VFA/ALK Ratio เฉลี่ย เท่ากับ 0.33 และ 0.35 ตามลำดับ โดยในวันที่ 0–6 ของการทดลองพบว่า VFA/ALK ratio มีค่าที่เกิน 0.4 แต่ต่ำกว่า 0.8 ซึ่งค่าดังกล่าวส่งผลกระทบต่อตรงต่อค่า pH สามารถที่จะลดลงได้อย่างรวดเร็วอีกด้วย ซึ่งค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) และค่าสภาพความเป็นด่าง (ALK) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,843.45 และ 1,948.99 mg/L และ 5,682.42 และ 5,470.56 mg/L ตามลำดับ โดยค่าดังกล่าวของทั้ง 2 เงื่อนไขอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะถูกจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกิริยาไปใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จะทำให้ปริมาณ VFA ลดลงและการที่ปริมาณ VFA มีค่าไม่เกิน 4,000 mg/L [4, 20] แสดงให้เห็นถึงระบบไม่เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายทำให้ไม่มีผลไปยังการทำงานของจุลินทรีย์จำพวก Acetogenic bacteria และ Methanogenic bacteria [11, 12]

6.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS

สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะพิจารณาจากการกำจัดค่า Chemical oxygen demand (COD), Total solid (TS) และ Volatile solid (VS) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่า COD แสดงถึงความต้องการปริมาณออกซิเจนของน้ำเสียที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่างๆ ไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ [2, 4] ค่า TS แสดงถึงปริมาณของแข็งทั้งหมด ซึ่งเป็นสารที่เหลือยู่ในภาชนะหลังจากระเหยน้ำออกจากวัสดุหมักแล้วนำไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C [5, 7] จะบ่งบอกถึงลักษณะในการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบว่ามีประสิทธิภาพในการย่อยสลายหรือลดปริมาณของเสียในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ และค่า VS แสดงถึงของแข็งระเหยได้ เมื่อนำ TS ไปเผาที่อุณหภูมิ 550 °C จะทำให้ทราบถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในวัสดุหมัก [7, 11]

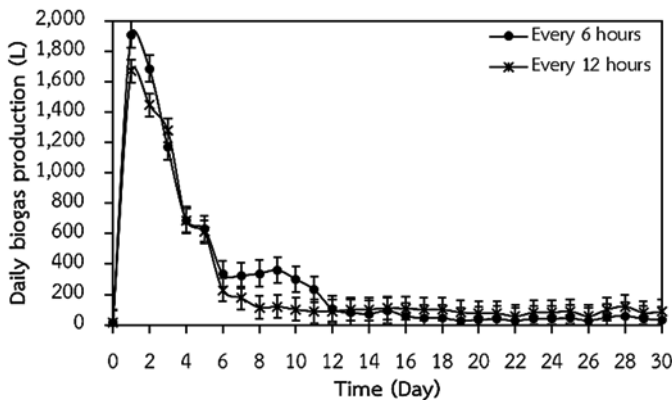


ภาพที่ 9 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS

จากภาพที่ 9 พบว่าทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 h มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD, TS และ VS มีค่าเท่ากับ 77.08%, 61.26% และ 62.56% ตามลำดับ และทุกๆ 12 h มีค่าเท่ากับ 70.83%, 56.56% และ 58.36% ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 h จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ตามลำดับ ได้ดีกว่าอัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 12 h เท่ากับ 8.11%, 7.67% และ 6.71% ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่าระบบมีการกวนผสมภายในระบบสามารถลดปัญหาการเกิดชั้นตะกอนลอยได้ ซึ่งการกวนผสมทำให้สารอินทรีย์และจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียในถังปฏิกิริยาผสมกันอย่างต่อเนื่องเป็นสิ่งสำคัญที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก [17] โดยภายในถังปฏิกิริยามีการกวนผสมอย่างทั่วถึงอาจจะทำให้จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียสามารถสัมผัสกับสารอินทรีย์มากขึ้นและทั่วถึงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดค่า COD, TS และ VS เพิ่มขึ้นถึง 60% [19, 22]

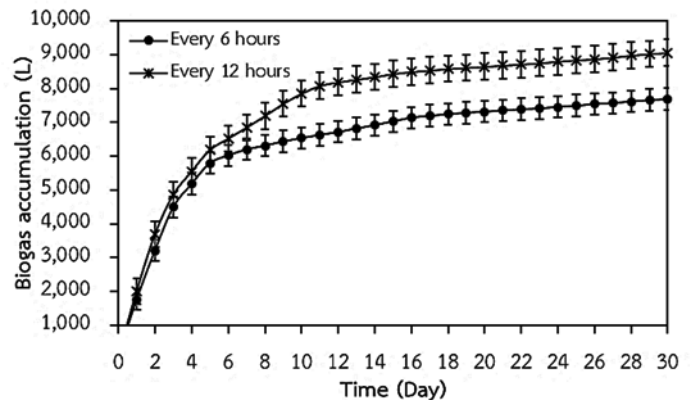
6.6 ผลการศึกษาปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

ก๊าซชีวภาพ หมายถึง ก๊าซที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยใช้จุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ต้องการออกซิเจนในการเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มก๊าซขึ้นขณะเกิดการย่อยสลาย โดยกลุ่มก๊าซนี้เรียกว่า ก๊าซชีวภาพ [11, 12]



ภาพที่ 10 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน

จากภาพที่ 10 พบว่าทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันเฉลี่ยเท่ากับ 283.34 และ 240.63 L/day ตามลำดับ โดยวันที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดคือ วันที่ 2 ของทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลอง ซึ่งมีค่าสูงถึง 1,910.73 และ 1,669.94 L/day โดยปริมาณก๊าซชีวภาพของทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองจะเกิดขึ้นมากที่สุดในช่วง 1-7 day แรกของการทดลอง อันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบนี้เป็นกระบวนการหมักแบบกะ ซึ่งมีการเติมสารอาหารเข้าระบบเพียงครั้งเดียว [7, 9] เมื่อจุลินทรีย์ทำการย่อยอาหารอย่างต่อเนื่องจะส่งผลให้ปริมาณสารอาหารในระบบลดลง เป็นสาเหตุทำให้ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ลดลง [5, 7] อีกทั้งยังพบว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุประเภทของแข็ง เมื่อระบบที่มีการกวนผสมภายในระบบในอัตราความถี่ที่ลดลง 50% จะส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดต่ำลงมากถึง 10%-20% [10, 12]

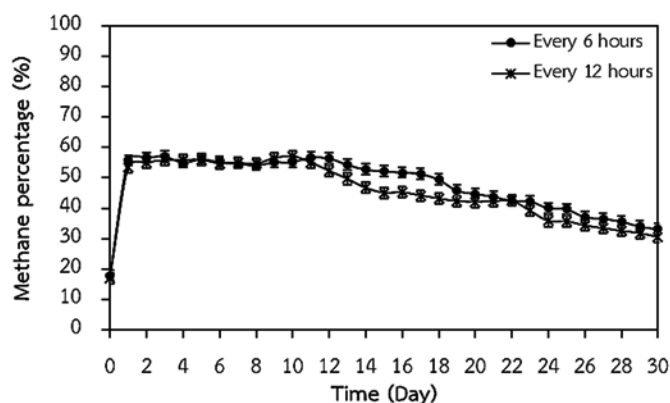


ภาพที่ 11 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด

จากภาพที่ 11 พบว่าทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของระบบตลอดระยะเวลาในการทดลอง 30 days มีค่าเท่ากับ 9,060.86 และ 7,688.11 L ตามลำดับ โดยในช่วงวันที่ 6 ถึงวันที่ 10 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันของระบบการกวนผสมทุกๆ 6 h มีค่าสูงกว่าทุกๆ 12 h เนื่องมาจากค่า pH ของระบบมีค่าที่สูงกว่าและเหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพส่งผลทำให้ปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมดในช่วงดังกล่าวสูงตามไปด้วย [7, 19] อีกทั้งเมื่อระบบได้ทำการเพิ่มอัตราการกวนผสมเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า หรือ 50% จากทุก 12 h เป็นทุก 6 h สามารถเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากถึง 15.15%

6.7 สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวัน

โดยองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจะประกอบไปด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 50%-70% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 30%-50% ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่นๆ เช่น แอมโมเนีย (NH_3) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และไอน้ำ (H_2O) เป็นต้น [14, 19] โดยก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่สูงมากกว่า 50% สามารถจุดติดไฟได้ดี และสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิง เพื่อผลิตพลังงานความร้อน ผลิตพลังงานกล และผลิตพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น [12, 20]

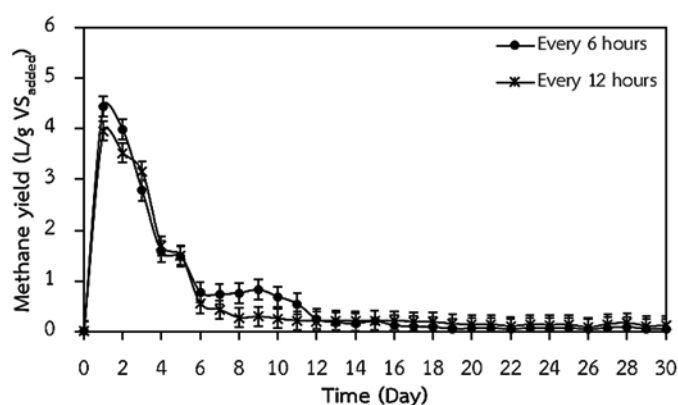


ภาพที่ 12 สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวัน

จากภาพที่ 12 พบว่าทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 17.9%–58.4% และ 16.8%–59.6% ตามลำดับ และมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเฉลี่ยเท่ากับ 46.4% และ 44.0% ตามลำดับ ตลอดระยะเวลา 30 days โดยในช่วงวันที่ 12 ถึงวันที่ 30 สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่อัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 h มีค่าที่มากกว่าทุกๆ 12 h เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ เช่น pH, VFA/ALK ratio และประสิทธิภาพของระบบมีค่าที่มากกว่าและอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพทำให้จุลินทรีย์ที่มีอยู่ภายในระบบสามารถเปลี่ยนอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนได้ง่ายกว่า [9, 10] สำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพนี้มีอัตราการผลิตของก๊าซมีเทนเฉลี่ย เท่ากับ 154.65 และ 134.92 L CH₄/day อีกทั้งยังมีปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) มากที่สุด เท่ากับ 783 และ 794 ppm ตามลำดับ และมีปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เฉลี่ย เท่ากับ 122.06 และ 126.69 ppm ตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพมีสัดส่วน ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

คุณสมบัติ	หน่วย	ปริมาณ
กวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 6 h		
Methane (CH ₄)	% (v/v)	17.9–58.4
Carbon dioxide (CO ₂)	% (v/v)	24.6–45.3
Oxygen (O ₂)	% (v/v)	0.0–5.5
Hydrogen sulphide (H ₂ S)	ppm	0–783
กวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 12 h		
Methane (CH ₄)	% (v/v)	16.8–59.6
Carbon dioxide (CO ₂)	% (v/v)	26.9–45.2
Oxygen (O ₂)	% (v/v)	0.0–10.5
Hydrogen sulphide (H ₂ S)	ppm	0–794



ภาพที่ 13 ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะ

6.8 ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะ

สำหรับผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะ คือ ปริมาณของก๊าซมีเทนต่อการย่อยสลายของสารอินทรีย์ต่อหน่วย โดยในขั้นตอนนี้จะทำการพิจารณาปริมาณของผลผลิตของก๊าซมีเทนต่อหน่วยของแข็งระเหยง่าย เนื่องจากวัตถุประสงค์ที่ได้ทำการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นของแข็ง คือ วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

จากภาพที่ 13 พบว่าทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ย เท่ากับ 0.688 และ 0.564 L CH₄/g VS_{added} และมีศักยภาพ

ในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 4.600 และ 3.851 L $\text{CH}_4/\text{g VS}_{\text{added}}$ โดยปกติของผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะที่เกิดจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-acidification จะอยู่ในช่วง 0.174–2.249 L $\text{CH}_4/\text{g VS}_{\text{added}}$ [21] โดยผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะมีความสอดคล้องกับปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน [8, 11] ดังแสดงในภาพที่ 10 และสัดส่วนของก๊าซมีเทน โดยสัดส่วนของก๊าซมีเทน ดังแสดงในภาพที่ 12 เมื่อก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันและสัดส่วนของก๊าซมีเทนมีปริมาณที่ลดลงจะส่งผลโดยตรงทำให้ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะมีปริมาณที่ลดลงตามไปด้วย [7]

7. สรุปผลการทำวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง โดยทำการศึกษากายใต้สภาวะการย่อยสลายแบบไร้อากาศขนาด 1,000 L ปริมาตรใช้จริง 500 L ระบบมีลักษณะการป้อนวัสดุหมักแบบกะ (Batch fermentation) วัตถุดิบที่ใช้คือ วัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวาน ประกอบไปด้วย ชัง เปลือกและเมล็ดคั่วทั้งในสัดส่วน 54:44:2 (w/w) โดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์คือ กากตะกอนมูลสุกรและกากตะกอนน้ำเสียในสัดส่วน 2:1 (v/v) ซึ่งอัตราส่วนวัตถุดิบ : หัวเชื้อจุลินทรีย์ เท่ากับ 1 kg : 4 L โดยแบ่งเงื่อนไขการทดลองออกเป็น 2 เงื่อนไขภายใต้อัตรากวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h เป็นระยะเวลารอบละ 10 mins ตั้งแต่เวลา 06.00–18.00 น. ทำการศึกษาในระดับต้นแบบ (Pilot scale) ภายใต้อุณหภูมิสภาพแวดล้อม เป็นระยะเวลาในการทดลองจำนวน 30 days จากการศึกษาพบว่า อัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 h มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันเฉลี่ย เท่ากับ 283.34 L/day ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของระบบ เท่ากับ 9,060.86 L สัดส่วน

ของก๊าซมีเทนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 57.1% ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ยเท่ากับ 0.688 L $\text{CH}_4/\text{g VS}_{\text{added}}$ ประสิทธิภาพในการกำจัด COD, TS และ VS เท่ากับ 77.08%, 61.26% และ 62.56% ตามลำดับ ดังนั้นระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง เมื่อระบบได้ทำการเพิ่มอัตราการกวนผสมเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าสามารถเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากถึง 15.15% และการนำวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานมาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถเป็นแนวทางในการจัดการปัญหาของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอย่างถูกวิธี รวมถึงเป็นแนวทางในการนำวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานมาผลิตเป็นพลังงานทดแทน เพื่อใช้ลดต้นทุนในการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมได้อีกทางหนึ่ง

8. ข้อเสนอแนะ

8.1 ระบบควรมีการศึกษาระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 0, 3, 6, 12 และ 24 h

8.2 ระบบควรมีการศึกษาระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน เป็นระยะเวลา 24 h

8.3 ระบบควรมีการศึกษาแยกระหว่างระบบการกวนผสมและระบบการหมุนเวียนตะกอน

9. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะผู้บริหารของบริษัท ชันสวีท จำกัด (มหาชน) จังหวัดเชียงใหม่ ที่ได้ให้โอกาสในการทำวิทยุวิจัยร่วมกับสถานประกอบการ รวมถึงบุคลากรแผนกระบบบำบัดน้ำเสียและระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ให้คำแนะนำ การสนับสนุน รวมทั้งความรู้ในด้านระบบผลิตก๊าซชีวภาพตลอดจนให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ อีกทั้งยังต้องขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากวิทยาลัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” ประจำปี

ปี 2560 ทุ่การศึกษาาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ “ทุนศิษย์กัณภูมิ” ประจำปี 2560 และทุนสนับสนุนการวิจัยแผนงานเสริมสร้างศักยภาพและพัฒนาักวิจัยรุ่นใหม่ตามทิศทางการยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรมประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2562 จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

10. บรรณานุกรม

- (1) นคร ทิพย์วงศ์, “เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล,” สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2553
- (2) P. Schulze, A. Seidel-Morgenstern, H. Lorenz, M. Leschinsky, G. Unkelbach, “Advanced Process for Precipitation of Lignin from Ethanol Organosolv Spent Liquors,” *Bioresource Technology*, vol. 199, pp. 128-134, 2016.
- (3) อัจฉริยา เจริญวัย, สิริชัย คุณภาพดีเลิศ, “ผลของเวลาเก็บกักทางเซลล์และความเข้มข้นของบิสฟีนอลเอต่อสมรรถนะของถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน,” *วิทยานิพนธ์, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2556.
- (4) จินตนา ทองเอี้ยว, บุญญฤทธิ์ เผ่าเพ็ง, พงษ์ศักดิ์ นพรัตน์, “การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเหลือทิ้งขนมหวาน,” *การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, วันที่ 4-8 พฤศจิกายน 2558, หน้า 99-102*, 2558.
- (5) สุพจน์ เกติมี, “พัฒนาการใช้พลังงานก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์และเศษวัสดุทางการเกษตร,” *คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์*, 2555.
- (6) S. P. Kumar S. Singh, I. M. Mishra, D. K. Adhikari, “Continuous ethanol production by *Kluyveromyces* sp. IIPE453 immobilized on bagasse chips in packed bed reactor,” *Journal of Petroleum Technology and Alternative Fuels*, vol. 2, no. 1, pp. 1-6, 2011.
- (7) P. Sopee, P., S. Natthanicha, “Methane production potential from anaerobic co-digestions of different animal dungs and sweet corn residuals,” *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 943-948, 2017.
- (8) A. Meggyes, V. Nagy, “Biogas and energy production by utilization of different agricultural wastes,” *acta Polytechnica Hungarica*, vol. 9, no. 6, pp. 65-80, 2012.
- (9) Z. Meixia, Z. Guangming, Z. Panyue, F. Shiyang, J. Shuguang, W. Dan, W., F. Wei, “Anaerobic digestion of corn stovers for methane production in a novel bionic reactor,” *Bioresource Technology*, vol. 166, pp. 606-609, 2014.
- (10) T. Libin, Z. Dexun, Y. Hairong, W. Linfeng, Z. Xin, L. Xiujin “Identifying proper agitation interval to prevent floating layers formation of corn stover and improve biogas production in anaerobic digestion,” *Bioresource Technology*, vol. 186, pp. 1-7, 2015.
- (11) ชลลดา แดงประดับ, “ผลของเวลาเก็บกักต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นข้าวโพดหมัก โดยกระบวนการไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน,” *ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2554.
- (12) ทวีพันธ์ สเลอาด, “ผลของเวลาการกวนผสมและการเวียนตะกอนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร โดยระบบหมักแบบไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริง,” *วิทยานิพนธ์, วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2554.
- (13) P. Pornpan, N. Annop, A. Birgitte, C. Pawinee, “Anaerobic co-digestion of cassava pulp and pig manure: effects of waste ratio and inoculum-substrate ratio,” *The 2nd Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)”*, 21-23 November 2006. Bangkok, Thailand, 2006.
- (14) ทรงวุฒิ นิธิศิลป์, “คู่มือแนะนำการติดตั้งและใช้งานระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์,” *งานบริการและวิจัยด้านพลังงาน, ศูนย์ฝึกศึกษานุเคราะห์ด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร, กรมการพลังงานทหาร, หน้า 2-22.*, 2555.
- (15) S. Michel, W. H. Stijn, H. Van, H. Sander, V. Han, R. Katleen, “Laccase enzyme detoxifies hydrolysates and improves biogas production from hemp straw and miscanthus,” *Bioresource Technology*, vol. 244, no. 1, pp. 597-604, 2017.
- (16) O. Akindele, B. Kamoru, A. Olusola, “Biogas production from anaerobic co-digestion of corn cobs with pig and poultry droppings,” *Journal of Engineering Research and Development (AJERD)*, vol. 1, no. 2, pp. 273-282, 2018.
- (17) X. Wang, X. Duan, J. Chen, K. Fang, L. Feng, Y. Yan, Q. Zhou, “Enhancing anaerobic digestion of waste activated sludge by pretreatment: effect of volatile to total solids,” *Journal of Environmental Technology*, vol. 37, pp. 1520-1529, 2016.
- (18) กิตติยา บ่อเงิน, ประภา ไร่สละม, รัชพล พะวงศรีรัตน์, “การผลิตแก๊สชีวภาพจากต้นธูปฤๅษีที่ผ่านการปรับสภาพ (*Typha angustifolia* L.) ร่วมกับมูลวัวโดยกระบวนการหมักแบบกึ่งแก็ง,” *Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 5, เดือนกันยายน - ตุลาคม, หน้า 28-41, 2560.

- (19) B. Budiyo, L. Syaichurrozi, S. Sumardiono, "Biogas production from bioethanol waste: the effect of pH and urea addition to biogas production rate," *Waste Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 2338-6207, 2013.
- (20) H. Young, S. Kyung, E. Richard, "Pre-acidification in anaerobic sludge bed process treating brewery wastewater," *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 35, pp. 4267-4276, 2001.
- (21) E. Ignatius, A. P. Jabakumar, "Optimization of pre-hydrolysis conditions for the productions of biogas," Thesis (Sustainable Technology and Industrial Biotechnology), School of Engineering. University of Boras, Sweden, 2011.
- (22) C. Chen, D. Zheng, G. J. Liu, L. W. Deng, Y. Long, Z. H. Fan, "Continuous dry fermentation of swine manure for biogas production," *Waste Chalcombe Publications*, Marlow, Bucks, UK., 2015.

The Efficient Forecast of Demand Side Management for Flight Simulator Energy Management System

Wing Commander Kritsana Sukdee^{1*}
Assistant Professor Dr. Watchara Wongpanyo²

^{1*} 701 Fighter Tactical Squadron, Wing 7 Royal Thai Air Force Base, Surat Thani 84130, Thailand

² Assistant Professor, Renewable Energy Department, University of Phayao 65000, Thailand

*Corresponding Author. E-mail : Oakf16@gmail.com

(Received: November 14, 2019, Accepted: July 17, 2020)

Abstract : This study aims to investigate the efficiency of the utilization of renewable energy, which plays a significant role in developing energy assurance and preventing the blackout damage to the Royal Thai Air Force (RTAF) flight simulator facility equivalent to that of the fighter F-22 of U.S. demonstrates. The United State Air National Guard has already applied the research of microgrid and Building Energy Management System (BEMS) to supply energy independently into its flight simulator system. However, this research's dissimilar environments are energy demand, microgrid location, Global Horizon Irradiation (GHI), and weather conditions, which affect the microgrid proficiency performs differently. In addition, ensuring the efficiency of energy-enabled and safe, the key to success for energy planning and management is the Efficiency Forecast of Demand Side Management (DSM) design for isolating the main grid's preliminary problem and increasing the cyber security level of RTAF energy. Consequently, the researcher selects the HOMER Pro® Microgrid Software, which is one of the global commercial microgrid standards for energy modeling tools and other distributed energy projects to simulate the DSM forecast to evaluate the microgrid design in Nanogrid level.

Keywords : Demand Side Management, Nanogrid, Smart Grid, Zero Net Energy

1. Introduction

In the last decades, “Energy supplies are never enough”, more and more stress is put on the electricity supply and infrastructure by increasing of energy demand. The evidence in Thailand has shown that the electricity demand trend has continued to increase during the last 10 years. More energy efficiency is believed to be the key reason behind the slow growth of electricity demand compared to the economic growth rate [1]. In the same way, the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) has reported the Gross Energy Generation and Purchase (by Type of Fuel) [2] that outlook described the purchased supply trend increased from 88,496.04 Million kWh/year in 2011 to 121,233.72 Million kWh/year in 2016 and reduced to 94,957.46 Million kWh/year in 2017 due to the increase of the EGAT’s Gross Energy Generation.

Consequently, from the fact above, the Royal Thai Air Force (RTAF) has been aware of instability of energy security. The challenge is how maintain the RTAF operational readiness in the Humanitarian Assistance and Disaster Relief (HADR) mission when on-grid system is unable to provide the electrical power resources. In 2016, the decision was made to initiate the change of strategic energy management from the old-fashioned “Build and Connect” to the “Connect and Manage” concept [3] by implementing smart grid technology. In addition, reviewing the RTAF Energy Strategic Plan 2010-2025 with attaching the supplement of smart grid project [4], and launching the RTAF smart grid’s

academic to the RTAF Energy committee and staff during the smart grid seminar on 20 June, 2018 [5]. The flight simulator building of wing 7 Surat Thani was selected for the smart grid’s demonstration site in Building Energy Management System (BEMS) level. The problem of this building was reported that its equipment was damaged frequently, resulting from blackout and brownout findings.

According to the studies of the demonstrated sustainable microgrid power station and BEMS Concept from the United State Air Force F-22 flight simulator building at Joint Base Pearl Harbor Hickam, Hawaii [6], the solution of the energy problem is to provide on-site energy sources, including fuel and solar power, making up a majority of energy demand-side management. So, microgrids allow power to be stored and distributed directly to the end-user (Flight Simulator), instead of going through a large interconnected network of energy systems. In turn, microgrids offer a more resilient energy source, resistant to weather and external attacks, both physical and cyber-related. From existed solution, this research referred to the similar microgrid concept by installing the additional on-grid 43 kW Nanogrid (The Microgrid level is 50 kW and below) [7] and integrating with AMI, and EMS control application. Before procuring the system for installation, the researcher used The HOMER Pro® Microgrid Software to evaluate the efficient forecasting of Demand Side Management (DSM) and the reliability of BEMS to ensure the EMS meets the desired demand response criteria.

The research methodologies of DSM approach are applied from the cost-effective trade-off based renewable power augmented energy efficient load model for the DSM of the manufacturing industries [8], and the design technic of a Hybrid AC/DC Microgrid Using HOMER Pro: Case Study on an Islanded Residential Application [9]

2. Objectives

The objectives of the study are

2.1 Creating more redundant energy reliability in order to secure the flight simulator system as well as to the flight simulator from the blackout/brownout damage with smart grid technology,

2.2 Implementing the Nanogrid concept into the BEMS network as The RTAF pilot project, and

2.3 Developing the RTAF renewable strategy and the RTAF cyber security policy to interoperate with Network Centric Operations (NCOs) Concept by the capability of real-time monitoring.

3. Definitions

Demand Response (DR) [10] : The demand response provides an opportunity for consumers to play a significant role in the operation of the electric grid by reducing or shifting their electricity usage criteria. Demand response programs are being used by some electrical system planners and operators, as resource options for balancing supply and demand.

Demand Side Management (DSM) [11] : The control or influence of end-users' energy consumption, typically at times of peak demand on the network.

Efficiency Forecast [12] : The forecast analysis of the electrical produce effectiveness of efficiency measures that are simulated yearly performance by HOMER Pro® Microgrid Software.

4. Scopes

For a smart grid's successful introduction, the developers will face a number of technical challenges [13]. To improve better monitored and managed grid, a so-called "Smart grid", we need to consider five key technologies required for the smart grid as follows: 1) Sensing and measurement, 2) Integrating communications, 3) Advance components, 4) Improve interfaces and decision support, and 5) Advanced Control. In this research, the researcher focuses on the Areas of Sensing and Measurement, and Decision support only. Because the demonstration site is located inside the airport area (Airside), the developer shall concern the additional design factor that shall not affect the flight safety.

4.1 Location of Demonstration Site

The Flight Simulator Building at RTAF Wing 7 Air base [14] located on LAT-LONG N 09° 08.2' 99 08.2'E, Surat Thani province in the southern territory of Thailand. The Global Horizon Irradiation (GHI) [15] values approximately 1750-1800 kWh/m² [16]. The limitation of the research is the lack of the potential PV electricity production (PVOUT) information due to no explicit reference [17].

4.2 Flight Safety Factor

The critical flight safety factor is the environmental factor. For flight safety reasons, The FAA recommended the Reflectivity of Photovoltaic (PV) Retrofitted Panels [18] be one the most critical factors to flight safety. According to researchers at Sandia National Lab, when light is reflected off from the surfaces, that risks are glint and glare can cause pilots or air traffic controllers the loss of vision, also known as “Flash blindness” for a period of 4-12 seconds. This occurs when $7-11 \text{ W/m}^2$ (or 650-1,100 Lumens/m²) reaches the eye [19]

4.3 PV directional installation technic

Based on 4.2, the installation of the Solar PV Retrofitted is compulsory to offset from facing south. The reason is to prevent the pilot glare effect during takeoff and landing. According to the environmental factor, the Surat Thani airport has the runway alignment on axis 42.4° and 222.4° which resembles the RTAF simulator building’s alignment direction. Therefore, the Solar 43 kW PV rooftop is tilted angle between installed 10-18 degrees from horizon axis with the maximum best angle to absorb the solar irradiation and offsetting from south to west 42.4° (no facing south directly).

5. Methodology

The steps of methodology are as follows:

Firstly, the primary load by the Demand Response Assessment and set prioritization are defined because the nature of renewable energy is unpredictable and inflexible. Therefore, the 40 kW microgrid is unable to support the whole load of the building, it is necessary to prioritize and manage the energy distribution.

Secondly, the microgrid infrastructure and Demand Side Management (DSM) are defined. This research is simulated to install the Solar PV rooftop microgrid on the flight simulator building because there is no space for installing solar farms. Creating the microgrid infrastructure and network with The HOMER Pro® Microgrid Software.

Lastly, the required data is processed into the software, followed by the execution of the simulation of DSM efficiency forecasting, analysis and evaluation.

5.1 The Demand Response (DR) Assessment and Prioritization

The survey of DR identification is shown as *Table 1-Demand Response Assessment*. The Prioritize sets of DSM are DR#1 Flight Simulator unit (16 kW), DR#2 Data Server (15 kW), and the lower priority for the rest.

Table 1 Demand Response Assessment

DR Priority	Meter Monitoring		Load consumption kW (Actual Load)	Electrical back up			Remarks
	Brand	Model		Transformer kVA	Electric Generator kW	Power UPS kW	
1. Simulator Unit	Schneider	PM-800	16	800	500	120	DR#1 and DR#2 are connected with islanded microgrid stability
2. Simulator Building	Schneider	PM-800					
2.1 Data Server			15				
2.2 Office			40				
3. 701 Office	Schneider	PM-800	34	500	-	-	
4. 702 Office	Schneider	PM-800	25				
5. 701 Maintenance	Schneider	PM-800	193				
6. 702 Maintenance	ENTES	MPR50	64	500	-	-	

5.2 Nanogrid Design

The design concept is the hybrid Nanogrid that integrated with Solar 40 kW PV rooftop, 120 KVA UPS battery backup, and 800 kW diesel gas generators with the islanded mode capability during office hour (8 am – 4 pm) as shown in Figure 1. The Nanogrid algorithms are; a) when on-grid condition and daytime, the tasks of 40 kW PV rooftop supplies to the primary load DR no.1 (flight simulator unit) via 120 KVA UPS and the primary load DR no.2 (Data Server). Besides, the excessive load will automatically return into the grid and feeding the electrical energy to the rest of secondary DR, and b) when off-grid condition and blackout/brownout condition, similar to the previous algorithm except the 800 kW diesel generators shall operate automatically when the efficiency of PV rooftop is below 43% of total performance.

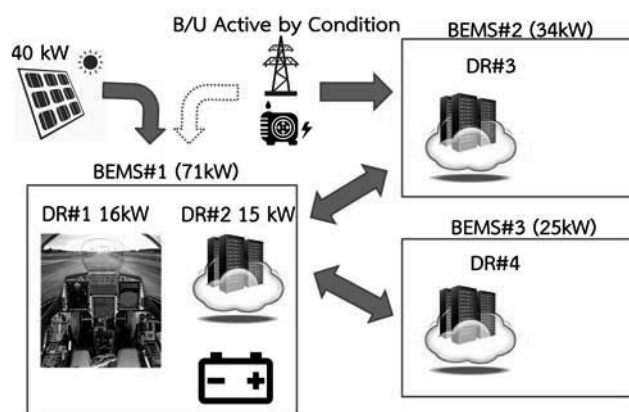


Fig. 1 The Demand Side Management of the Nanogrid supports for the flight simulator system

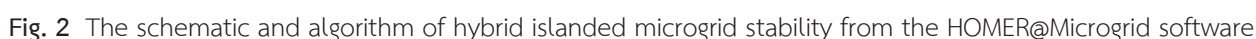
5.3 The Simulation of DSM Efficiency Forecasting by The HOMER Pro® Microgrid Software

5.3.1 The HOMER Pro® Microgrid Software Benefit

The HOMER Pro® Microgrid Software [20] is the global standard for optimizing microgrid design in all sectors, from village power and island utilities for grid-connected campuses and military bases. The core benefit of the HOMER software is the simulation model,

and the DR#2 15 kW Data Server Schedule with 24/7 operation which consumes 360 kWh/day. The backup 800 kW diesel gas generator shall turn on automatically when there is a blackout or a brownout or when the PV output value is below 43%. The optimization algorithm of DR#1 and DR#2 options are

- 1) Off-Grid first,
- 2) If unable to maintain option 1, the algorithm shall select the power from the grid, and
- 3) If unable to maintain options 1 or 2, the algorithm shall select the power from the 800 kW diesel generator.



5.3.2 The conceptual of Demand Side Management (DSM) Simulation

Firstly, managing the Demand Response (DR) with optimization which matrix in the Schematic of Hybrid Islanded Microgrid stability is made from The HOMER Pro® Microgrid Software is shown in Figure 2. The overall conceptual algorithm is designed based on the input-process-output (IPO) model [21], which automated thinking likes the way the computer thinks.

Secondly, reminding the limitations of DSM Simulation are suitable for a low voltage microgrid design and small-scale power network topology, and not complex. The modeled

systems and simulation run are limited with the flexibility options of conventional power Distribution Automation (DA) units.

Lastly, establishing the network community of Building Energy Management System (BEMS) is shown in Figure 3. The Algorithm is based on the peer-to-peer connecting that is one design of major Distribution Automation System Architectures [22]. The benefits of peer-to-peer are, better decision making, more efficiency, handling more event, and the ability to handle a wider variety of events. On the other hand, the disadvantage of peer-to-peer are its requirements for some communication, higher costs, and higher complexity level.

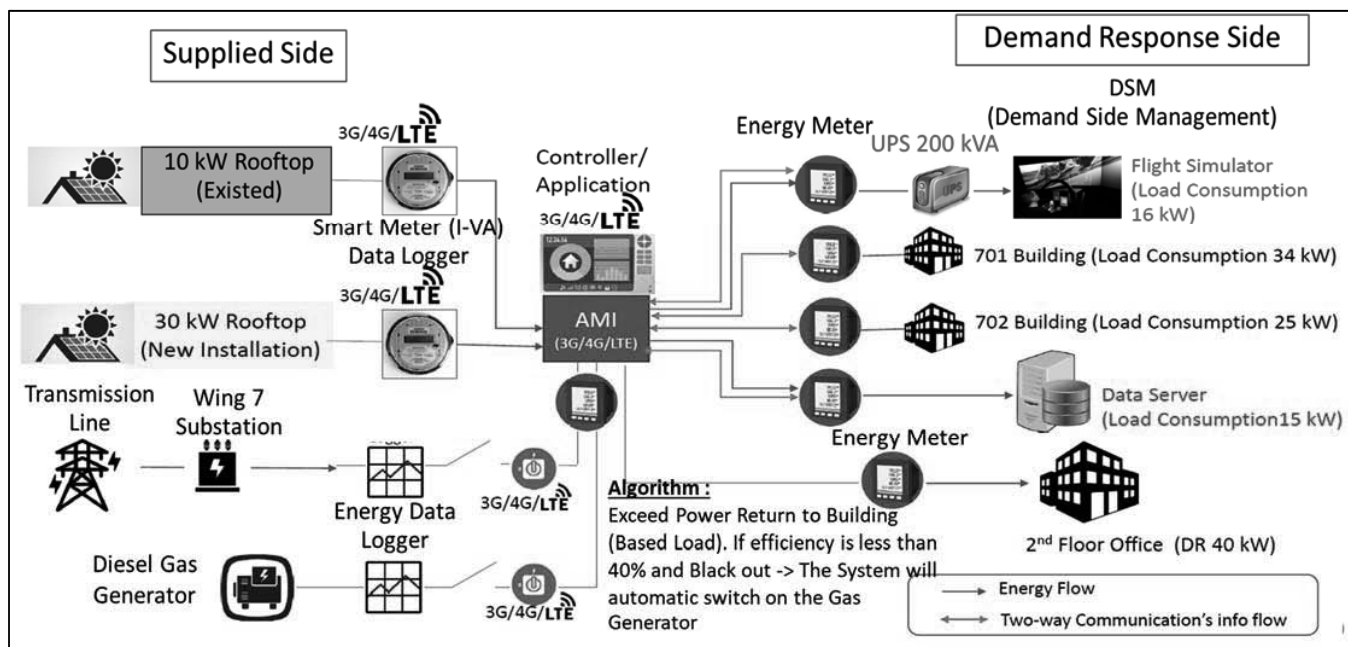


Fig. 3 The network topology of the active energy management system of flight simulator building

Before installing the additional 30 kW PV Rooftop, the existing 800 kW diesel generator has just supplied the electrical power to the building with no specific demand side management. In fact, the 800 kW power production is over supply when comparing to the total load of the actual demand response is required only 387 kW. The researcher redesigns the flow of electrical transmission by initiating from the first priority 387 kW load of five operational buildings as in Table 1. (1. The 71 kW of Flight Simulator Building, 2. The 34 kW of 701 Building, 3. The 25 kW of 702 Building, 4. The 193 kW of 701 Maintenance Hangar, and 5. The 64 kW of 702 Maintenance Hangar). The rest of the 410 kW negative load will be shared to the next lower priority DRs in the vicinity, including the aircraft revetment, the airfield terminal, the support and service office, and the weather forecast office.

The DSM concept is set the 43% of PV output value as the command signal to standby the 800 kW backup diesel generator and readiness for backup the electrical power into the system with some gap of 30-second lag time of fully diesel generator operation. The first prioritized DR is DR#1 16 kW Flight Simulator Unit. The maximum of Solar PV Rooftop is 40 kW, so the 43% of 40 kW is 17.2 kW, the gap between PV output below the DR#1 Load is 1.2 kW ($17.2 \text{ kW} - 16 \text{ kW} = 1.2 \text{ kW}$). Hence, the researcher set this value as the alert trigger point to automatically send the operational command signal to turn on the 800 kW diesel generator automatically.

5.3.3 Constraints

The limitations of the active energy management system network are: 1) inability to service for 24/7 due to no storage installation, 2) Low sun irradiation when it is raining, cloudy or with low GHI (Global Horizontal Irradiation) situation. The system switches automatically from off-grid mode into an on-grid mode when total of energy performance factor is below 48% of the maximum efficiency of 40 kWh from PV AC-DC Distributed Generation (DG) [23]; the value is from simulator DR is required 16 kWh, that is divided by 40 kWh PV outputs with 0.8 efficiencies, and then multiplying with a 20% safety factor. Furthermore, the additional design is implemented with the fighter pilot's decision making theory named the "OODA loop" (Observe-Oriented-Decision-Action) and the automatic redundant of fly-by-wire [24] system in the modern fighter aircraft. As its smart flight control computer shall respond to monitor, manage, and reconfigure the aircraft stability automatically whatever any worst condition. From US Army War College (2012) [25], The Cyber security is a very concerned issue. It was found that 46 percent of the electricity sector respondents noticed the hidden cyber threats inside their computer systems.

6. Result and Discussion of Efficient Forecast

6.1 Scenario Inputs

The logical algorithm of HOMER@Microgrid software will output the efficient result of the Demand Side Management (DSM) by identifying

the best optimization with the least operational cost. The critical combined scenarios are input into DSM are: 1) Off-grid with the economic factor in 2013, the DR of the southern region of Thailand keeps rising on demand continuously. The wide-scale power outage was happened in 2013 [26]. A massive power blackout damaged the 14 southern provinces' cause of a transmission failure by cutting off supplies from the central region. The urgent healing cost of importing the energy from Malaysia was a very high rate-charged that was raised up to 12 Million Thai Baht (Approximately 343,116 \$) per 200 MW supply [27]. The average unplanned outage cost of 825 industries in term of peak demand and energy not supplied is 68.47 Baht/kWp and 308.41 Baht/kWh, while the average planned

outage cost is 16.23 Baht/kWp and 74.94 Baht/kWh [28], 2) The Data Source of the scaled annual average is 38.5 °C. The value is calculated from the Statistics of temperature at meteorology station, Surat Thani province from 12 years records (2003-2015) [29] as in Table 2. The monthly average temperature and the min/max ambient temperature. The secondary statistic data were referred to as the website accuweather.com [30]. The sets of ambient temperature data are used for calculating the power produced by the PV array, and 3) Blackout/Brownout occurred, and PVOUT is less than 48% of efficiency, then the 800 kW diesel generators shall handover automatically with the average of the diesel fuel price is 1 US dollar per liter.

Table 2 The Statistics of temperature at meteorology station, Surat Thani province: 2003-2015 (12 years records)

Item	2546 (2003)	2547 (2004)	2548 (2005)	2549 (2006)	2550 (2007)	2551 (2008)	2552 (2009)	2553 (2010)	2554 (2011)	2555 (2012)	2556 (2013)	2557 (2014)	2558 (2015)
Surat Thani Meteorology Station													
Extreme maximum temperature	-	-	-	-	38.3	38.1	37.0	39.8	36.5	37.3	39.5	38.2	38.5
Extreme minimum temperature	-	-	-	-	18.3	19.0	18.4	19.5	19.0	20.2	19.0	15.5	18.3
Surat Thani Airport Meteorology Station													
Extreme maximum temperature	37.1	37.5	38.2	36.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Extreme minimum temperature	19.2	18.5	18.7	18.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ko Samui Meteorology Station													
Extreme maximum temperature	36.0	35.8	35.4	35.5	35.3	34.8	35.8	36.3	35.3	36.7	36.2	36.8	36.6
Extreme minimum temperature	20.3	21.9	19.4	20.0	19.5	20.7	20.7	21.5	20.7	22.4	21.5	17.8	19.6
Phra Sang Meteorology Station													
Extreme maximum temperature	38.0	38.0	38.6	37.0	36.8	36.8	37.0	38.3	36.0	36.5	38.6	39.3	39.0
Extreme minimum temperature	19.4	18.3	18.5	16.8	14.4	18.0	16.3	19.0	18.0	20.5	18.8	15.2	17.0

Source : Meteorological Department, Ministry of Information and Communication Technology

6.2 Results of Simulation

According to simulation analysis at the Surat Thani Airport, the monthly PVOUT reports of the baseline data monthly averages and the extraterrestrial horizontal radiation monthly averages are shown in Table 3. In reference to Table 3, the simulated solution has the significant uncontrolled factor that will impact the systematic reliability during November to October (The peak period of the monsoon season). For the demand side management (DSM) of flight simulator,

the total of primary demand response is 31 kWh (DR#1 16 kW + DR#2 15 kW = 31 kW = 77.5% from maximum PVOUT 40 kW). The PVOUT productions of baseline data monthly averages from November to October are 0.71966 and 0.71518 (kW/m²), which are lower than the mean of baseline is 0.78375 (kW/m²). Based on this data analysis, there is the possibility to turn on the backup 800 kW diesel gas generators for assisting the PV system when blackout or off-grid happens.

Table 3 The Efficiency forecast output from the optimize model simulation in 2018

Month	Baseline data Monthly Averages (kW/m ²)			Extraterrestrial Horizontal Radiation Monthly Averages (kW/m ²)		
	Minimum Daily low	Average	Maximum Daily high	Minimum Daily low	Average	Maximum Daily high
Jan	0.20371	0.76168	1.11764	0.37489	1.21688	1.24928
Feb	0.23946	0.88106	1.11890	0.40200	1.28660	1.31972
Mar	0.25100	0.90959	1.13502	0.42770	1.34475	1.35776
Apr	0.23808	0.86600	1.08688	0.43761	1.34980	1.35789
May	0.21167	0.74103	1.08953	0.43194	1.31134	1.33335
Jun	0.20792	0.75446	1.07706	0.42490	1.28107	1.28996
Jul	0.20842	0.77481	1.10496	0.42657	1.29109	1.30755
Aug	0.20850	0.76598	1.12720	0.43255	1.32641	1.33988
Sep	0.20713	0.76562	1.15085	0.42868	1.33693	1.34164
Oct	0.20054	0.74997	1.06731	0.40763	1.29218	1.32287
Nov	0.18638	0.71966	1.14027	0.37963	1.22260	1.25462
Dec	0.18867	0.71518	1.00543	0.36469	1.18740	1.19486
Annual	0.21243	0.78375	1.15085	0.41158	1.28725	1.35789

Besides, as shown in Figure 4, the primary demand response load profile (energy consumption) in January is the most critical month. The DR load profile is higher than that of other months because the flight simulator schedules are in

operation more than other months to support the pilots upgrade period (Full operating 8 hours per office day). The consequence is the higher usage of two 120,000 BTU air conditioner consumption for cooling the flight simulator

system, which was related to the simulated humidity and temperature factor. Conversely, the reasons for the usage of load profiles from February to December in 2018 are due to the lower usage rate of the flight simulator based on annual flying syllabus (Operating 4 to 6 hours per office day). If a blackout or a brownout event

occurs in January 2018, the result of the DSM efficient forecast said it is impossible to maintain an islanded condition. Therefore, to maintain the energy assurance and damage prevention for the flight simulator system, the algorithm is necessary to turn on the backup mode of diesel gas generator to support the DSM.

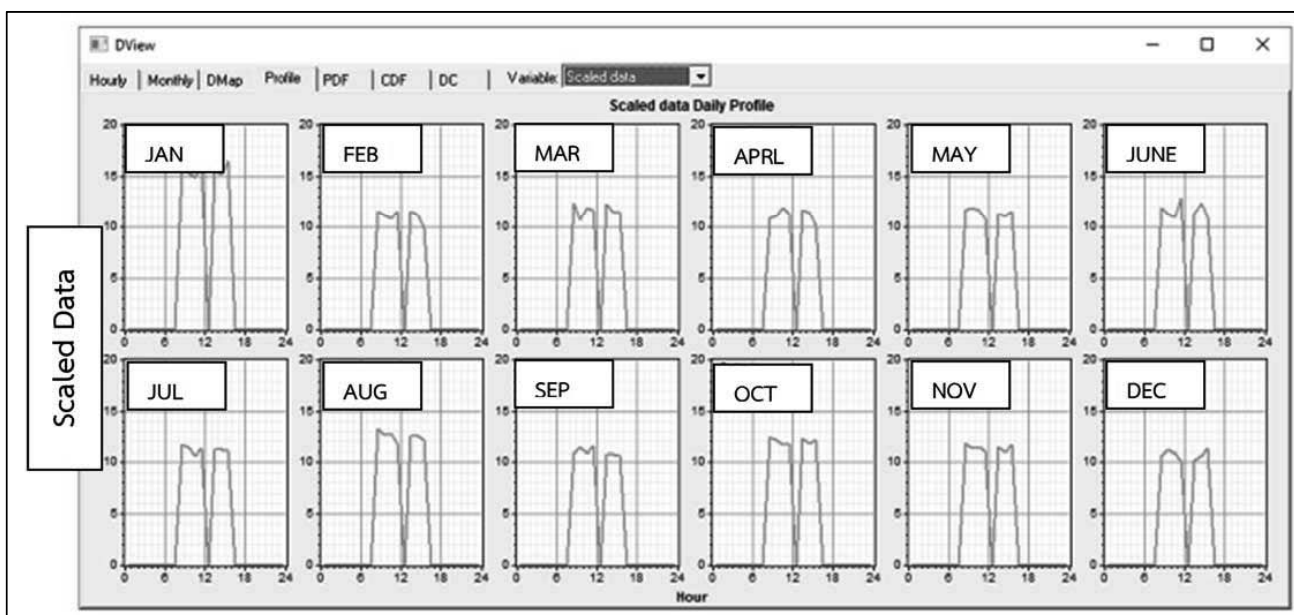


Fig. 4 The primary demand response load profile (Scaled Data Profile) in 2018

The assumption is the low average monthly efficient forecast of output baseline (less than 0.80 kW/m²) in January and between May to December, which is more related to the cloudy condition and humidity and is less related to monthly horizontal extraterrestrial radiation directly even if that has high value. For example, from June to September, the horizontal extraterrestrial radiation has a high value but the monthly efficient forecast of output baseline is low due to cloudy conditions. Subsequently, the solar microgrid produces lower energy and is

unable to supply the primary load with islanded mode.

7. Conclusion and Recommendation

The conclusion of the DSM-efficient forecast study is to be able to partially concrete more energy reliability to assure energy and protect the flight simulator from the blackout/brownout damage by installing the islanded Nanogrid model, defining the load prioritization, connecting DSM into BEMS network, and executing software simulation, then analyze and

evaluate. This methodology is interoperated along with the RTAF renewable strategy and cyber security policy. The result of simulation, finding the possibility of risk that makes the islanded mode may be degraded from November to January. The two main reasons are:

1) During monsoon season, the GHI received low radiation that caused low of the PVOUT Productivity as well. Because it was the uncontrollable factor by nature, the researcher recommends installing more PV panels on nearby buildings and/or installing energy storage in the future to solve the problem.

2) Gradually, in January, the high load profile consumed a lot of electrical energy caused by the controllable and uncontrollable factors. Firstly, the controllable factor is the high rate of flight simulator scheduling. The researcher recommends solving this trouble by rescheduling some of the non-priority flight simulator activities are shifted after January. Secondly, the weather condition was dry, low humidity and high temperature, and a high consumption of 120,000 BTU air conditioners are the uncontrollable factors. As a result of climate change, the climate in Surat Thani in January is dry, low humidity, and high temperature. The characteristic of Solar Photovoltaic prefers the relative contribution if the high solar irradiance (SI), low ambient temperature (AT), and high relative humidity (RH) [31].

This study's recommendation can apply to sustain the information in the company server or the hospital business. The costs of data or equipment are high-value assets than microgrid and energy management investment. Even though the researcher recommends the energy assurance program, microgrid is unable to fully maintain the islanded mode condition without a diesel gas generator. Especially, the southern area of Thailand has very low GHI radiation during the rainy season. That affects the performance of Solar PV energy production directly. For further implementation, the researcher plans to study the DSM algorithm when installing the Energy Storage System (ESS), including the energy-conservative program for a sustainable organization.

However, this research does not cover all dimensions of DSM conquerable. The recommendation for the next researcher is to investigate the other challenge of EMS approval, which are Integrating communications, Advance components, Improve interfaces, and Advanced Controlling.

8. Acknowledgements

This pilot project was successful because of the great hospitality supports from many aspects of RTAF specialists and workmanships, such as civil engineers, communication engineers, and ICT programmers.

9. References

- (1) DBS Group Research-Equity, "Thailand Power Industry," Asian Insights SparX, Printed 26 April 2017, (Online). Available: https://www.dbs.com/aics/pdfController.page?pdfpath=/content/article/pdf/AIO/042017/170426_insights_neutral_on_thai_power_sector.pdf.
- (2) EGAT (Electricity Generating Authority of Thailand), Gross Energy Generation and Purchase (by Type of Fuel), 2017, (Online). Available: <https://www.egat.co.th/en/information/statisticaldata?view=article&id=78:gross-energy-generation-and-purchase&catid=15>.
- (3) Chris Bread, Logica, "Smart grids for Dummies-Logica Limited Edition," John Wiley & Sons, Ltd. England. Printed 2010, (Online). Available: https://www.smartgrid.gov/files/Smart_Grids_for_Dummies_201005.pdf, p. 37.
- (4) Royal Thai Air Force (RTAF), "Smart Community project with smart grid enable," RTAF Energy Strategy plan 2010-2025, (Online). Available: https://www.rtafenergy.com/attachments/view/?attach_id=142241, p. 28.
- (5) Royal Thai Air Force (RTAF), "Smart Grid Seminar. RTAF Renewable Energy News," 2018, (Online). Available: <https://www.rtafenergy.com>.
- (6) Corrie Poland, Air Force Energy, "Air Force Energy supports sustainable microgrid project," (Online). Available: <https://www.ang.af.mil/Media/ArticleDisplay/Article/2062656/air-force-energy-supports-sustainable-microgrid-project/>.
- (7) B. Buchholz, Dr., Global Product Manager Microgrids & Distributed Generation, ABB, "Briefing: Affordable renewable microgrids for robust power supply Experiences and trends," PowerPoint., pp. 11-17, 21, 32, 2016.
- (8) A. Parida, "A cost effective trade-off based renewable power augmented energy efficient load model for manufacturing industries for demand side management," Cogent Engineering, 2016 (Online). Available: <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1239299>.
- (9) A. O. Rousis, "Design of a Hybrid AC/DC Microgrid Using HOMER Pro: Case Study on an Islanded Residential Application," 5.2 Discussion on the HOMER Pro Optimisation Platform. Licensee MDPI, Basel, Switzerland., 2018.
- (10) U.S. Department of Energy, "Demand Response," 2018, (Online). Available: <https://www.energy.gov/oe/activities/technology-development/grid-modernization-and-smart-grid/demand-response>.
- (11) Chris Bread, Logica, "Smart grids for Dummies-Logica Limited Edition," John Wiley & Sons, Ltd. England, 2010, (Online). Available: https://www.smartgrid.gov/files/Smart_Grids_for_Dummies_201005.pdf, pp. 50, 2010.
- (12) Homer Energy, "Homer Pro: Efficiency Advance," 2018, (Online). Available: https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.11/efficiency_advanced.html.
- (13) K. Inewski, "Smart Grid Infrastructure & Networking. Chapter 1: Demand-Side Energy Management," The McGraw-Hill Companies, Inc., ISBN 978-0-07-178774-1, pp. 7-10, 2013.
- (14) Wing 7 Royal Thai Air Force Base, 2016, (Online). Available: <http://wing7.rtaf.mi.th>.
- (15) NREL: National Renewable Energy Laboratory, Glossary of Solar Radiation Resource Terms, "GHI: Global Horizon Irradiation," 2017, (Online). Available: http://rredc.nrel.gov/solar/glossary/gloss_g.html.
- (16) SOLAGIS, "Global Horizon Irradiation (GHI) map," 2013, (Online). Available: <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/asia>
- (17) Netherlands Embassy of Bangkok, "Solar power in Thailand: Factsheet solar power of Thailand," 2016, (Online). Available: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2017/03/FACTSHEET-SOLAR-POWER-IN-THAILAND.pdf>, pp. 1-2, 2016.
- (18) FAA (The Federal Aviation Administration), "Technical Guidance for Evaluating Selected Solar Technologies on Airports," pp. 37-40, 2013.
- (19) H. Clifford, C. Ghanbari, R. Diver, "Hazard Analysis of Glint and Glare from Concentrating Solar Power Plants," SolarPACES. Berlin Germany, Sandia National Laboratories, 2009.
- (20) HOMER Energy LLC, "The HOMER_g Microgrid Software," 2016, (Online). Available: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>.
- (21) Wikipedia, "IPO (input-process-output) Model," 2016, (Online). Available: https://en.wikipedia.org/wiki/IPO_model.
- (22) K. Inewski, "Chapter 2 The modernization of Distribution Automation featuring intelligent FDIR and Volt-Var optimization: DA Systems Architecture and Commu-

- nication," Smart grid: infrastructure & networking, The McGraw-Hill Companies, Inc., ISBN 978-0-07-178774-1, pp. 23 -24, 2013.
- (23) S. M. Amin, A. M. Giacomoni, 2012. "Smart Grid-Safe, Secure, Self-Healing," IEEE power and energy magazine, 2012, (Online). Available: <http://magazine.ieee-pes.org/january-february-2012/smart-grid-safe-secure-self-healing/>.
- (24) G. Creech, "Digital Fly By Wire: Aircraft Flight Control Comes of Age," NASA Dryden Flight Research Center. 2003, (Online). Available: http://www.nasa.gov/vision/earth/improvingflight/fly_by_wire.html.
- (25) B. L. Magnuson, Colonel., United States Marine Corps, "DoD Installation Energy Security: Evolving to a Smart Grid," Strategy Research Project, United States Army War College Class of 2012, Carlisle Barracks, Pennsylvania, 2012, (Online). Available: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA 561398>, pp.14.
- (26) T. Fredrickson, Bangkok post: South power restored after Thailand's "worst-ever" blackout (updated), 2013, (Online). Available: <http://www.bangkokpost.com/learning/learning-news/351298/south-power-restored-after-thailand-s-worst-ever-blackout>.
- (27) Minister of Ministry of Energy, "Interviewing: The blackout case in south path of Thailand," 2013
- (28) P. Teansri, R. Bhasaputra, W. Pattaraprakorn, P. Bhasaputra, "Outage Cost of Industries in Thailand by Considering Thailand Standard Industrial Classification," 3.6 The outage cost evaluation. GMSARN International Journal 4, pp. 44, 2010.
- (29) Meteorological Department, Ministry of Information and Communication Technology, The Statistics of temperature at meteorology station, surat thami province: 2003-2015, 2017, (Online). Available: <http://service.nso.go.th/nso/web/statseries/statseries27.html>.
- (30) Accuweather, "The record of Surat thani province's temperature," 2017, (Online). Available: <https://www.accuweather.com/th/th/thailand-weather>.
- (31) H. Zainuddiin, M. Ismail, N. H. Ahmad Bostamam, M. M. Muhamad Hanifah, M.Z.Hussin, M.F.M Taib, "Ambient Factors Influencing Photovoltaic Module Temperature in Klang Valley," ASEAN Smart Grid Congress 2. Faculty of Applied Sciences, Universiti Teknologi MARA, Shah Alam, Selangor, Malaysia, 2016, (Online). Available: https://fsg.uitm.edu.my/v2/images/images/stories/asgc2/18_asgc2_muhamad_mukhzani.pdf.

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการถ่ายเทความร้อนภายในกำแพงหลายชั้น Mathematical Model of Heat Transfer Within Multi-layered Wall

เรืออากาศตรี ดร.วิศรุต คล้ายแจ้ง^{1*}

Pilot Officer Dr. Witsarut Kraychang^{1*}

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ โพธิ์ชัย²

Assistant Professor Dr. Nopparat Pochai²

นาวาอากาศเอก รองศาสตราจารย์ สมภูมิ มีชานา³

Group Captain Associate Professor Sompoom Meechowna³

^{1*}อาจารย์ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร 10220 ประเทศไทย

^{1*}Instructor, Academic Division, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy,

Sai Mai, Bangkok 10220, Thailand

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาคณิตศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 10520 ประเทศไทย

²Assistant Professor, Department of Mathematics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang 10520, Thailand

³รองศาสตราจารย์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

³Associate Professor, Academic Division, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force

cademy, Sai Mai, Bangkok 10220, Thailand

*Corresponding Author. E-mail : kiatkulchai@yahoo.com

(Received: December 14, 2019, Accepted: August 4, 2020)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนภายในกำแพงหลายชั้น โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งใช้สมการความร้อนหนึ่งมิติที่อยู่ในรูปไร้มิติเพื่ออธิบายการถ่ายเทความร้อนจากผนังกำแพงด้านนอกที่ได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ไปสู่ผนังด้านในของกำแพง โดยผ่านแต่ละชั้นของกำแพงที่สร้างจากวัสดุต่างชนิดกัน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นชั้นกันคอนกรีตมวลเบาและคอนกรีตมวลเบา ประกอบกับการใช้ระเบียบวิธีผลต่างจำกัดที่ใช้แก้สมการควบคุมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณากรณีกำแพง 2 ชั้น 4 ชั้น และ 5 ชั้น ตามลำดับ ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณค่าอุณหภูมิของกำแพง 2 ชั้น ในกรณีที่นำวัสดุที่ใช้ในการสร้างกำแพงด้วยอิฐมวลเบาเป็นชั้นด้านในและอิฐมวลเบาเป็นชั้นนอก กับกรณีนำวัสดุสร้างกำแพงด้วยอิฐมวลเบาที่เป็นชั้นด้านนอกและอิฐมวลเบาเป็นชั้นด้านใน พบว่าค่าอุณหภูมิขอบด้านในกำแพงที่ถูกคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าเท่ากัน สำหรับการถ่ายเทความร้อนกำแพง

4 ชั้น และ 5 ชั้น ซึ่งนำเสนอในรูปแบบของกราฟเส้นเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิและตารางค่าอุณหภูมิที่ขอบด้านในของกำแพงที่เวลา 5 นาที 15 นาที 30 นาที 45 นาที 1 ชั่วโมง 1.5 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 2.5 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ อีกทั้งผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถยืนยันประสิทธิภาพการนำความร้อนของวัสดุโดยปูนซีเมนต์ที่มีการนำความร้อนสูงสุดและอิฐมวลเบามีการนำความร้อนต่ำสุด

คำสำคัญ : ระเบียบวิธีผลต่างจำกัด กำแพงหลายชั้น การถ่ายเทความร้อน

Abstract : This research aims to study the heat transfer within multi-layered wall by using a mathematical model that has one - dimensional heat equation in a non-dimensional form. The heat transfer equation was used to describe the heat transfer from outer surface to the inner surface of the wall by going through each layer of the wall with made of different materials including cement, lightweight concrete and bricks. The equation was used to evaluate the temperature of different configurations of wall comprising two layers, four layers and five layers of wall respectively. The results indicated that the temperature of two layers of wall with the brick located inner side and lightweight concrete as an outer side and the lightweight concrete located inner side and brick as an outer side, are significantly equal. For the total heat transfer rate, in case of four layers and five layers of wall were calculated by comparing the temperature profile at 5 minute 15 minute 30 minute 45 minute 1 hour 1.5 hour 2 hour 2.5 hour and 3 hour respectively. Also, the obtained results of this research from using mathematical models could confirm that the thermal conductivity of the material made of the cement has the highest thermal conductivity compared to another materials.

Keywords : Finite Difference Method, Multi-Layered Wall, Heat Transfer

1. ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเครื่องปรับอากาศภายในอาคารมากขึ้นจากสาเหตุของอุณหภูมิภายนอกอาคารที่สูงขึ้นเนื่องจากปัญหาโลกร้อน ด้วยเหตุนี้จึงมีการวิจัยวัสดุในการสร้างกำแพงเพื่อลดอุณหภูมิความร้อนจากภายนอกอาคารสู่ภายในอาคารที่อยู่อาศัยเพื่อลดการใช้พลังงานจากเครื่องปรับอากาศ ในงานวิจัย [1] ศึกษาวัสดุสร้างกำแพงเพื่อลดการนำความร้อนจากภายนอกสู่ภายในอาคารโดยใช้อิฐมวลเบาแบบมีรูกลวงสามารถช่วยลดอุณหภูมิภายในบ้านได้ 5 - 6 องศาเซลเซียส สำหรับงานวิจัย [2] และ [3] ศึกษาประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิภายในอาคารโดยใช้ผนังกระจกปล่องรังสีอาทิตย์แบบบานเปิดพบว่าช่วยลดอุณหภูมิลง 2 - 4 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับการใช้ผนังกระจกชั้นเดียวแบบทั่วไปสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องปรับอากาศได้เฉลี่ย 10 - 20 เปอร์เซ็นต์

การวัดค่าอุณหภูมิภายในกำแพงนับว่าทำได้ยากหรืออาจจะต้องใช้เครื่องมือที่มีค่าใช้จ่ายสูง อีกทั้งยังต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ความสามารถ จึงได้มีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อลดต้นทุนในการวิเคราะห์และข้อจำกัดต่างๆ ในการหาค่าอุณหภูมิภายในกำแพง ในงานวิจัย [4] ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของบ้านโดยเปรียบเทียบกับอุณหภูมิจริงที่ได้จากการวัดค่าภาคสนามเพื่อดูประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ [5] ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณหาค่าอุณหภูมิภายในกำแพงและขอบกำแพงด้านใน โดยพิจารณาวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างกำแพงชั้นเดียว เช่น อิฐมอญ อิฐมวลเบาและอิฐบล็อก เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้สร้างกำแพงรวมถึงพฤติกรรมการแพร่กระจายความร้อนจากผนังกำแพงด้านนอกสู่ขอบกำแพงด้านในโดยมีกำแพงเป็นตัวกลาง ยังมีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในกำแพงที่มีลักษณะเป็นกำแพงหลายชั้น ในงานวิจัย [6] ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์และ

ประมาณค่าอุณหภูมิภายในกำแพงหลายชั้นที่ก่อสร้างด้วยปูนซีเมนต์ อิฐดินเหนียว พอลิस्टาไร์น เป็นต้น ที่ถูกคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปคอมพิวเตอร์ (COMSOL) บนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ อีกทั้งยังมีการพัฒนาสมบัติของวัสดุที่สร้างกำแพงด้วยวัสดุต่างๆ [7]

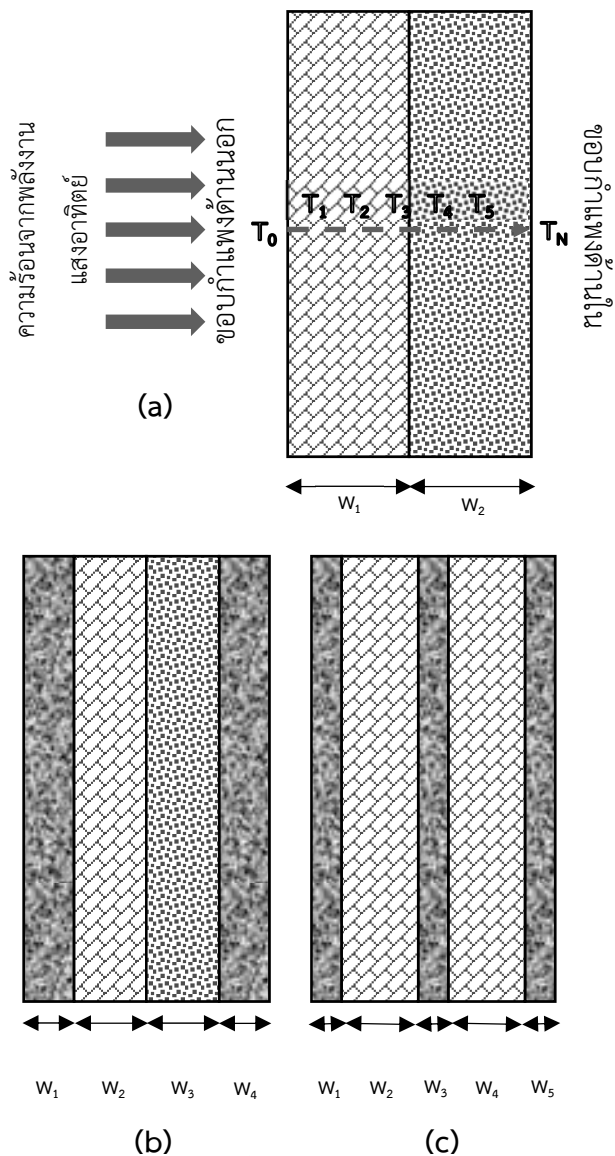
จุดประสงค์ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาค่าอุณหภูมิภายในกำแพงหลายชั้นที่สร้างจากวัสดุปูนซีเมนต์ อิฐมอญและอิฐมวลเบาตลอดจนอุณหภูมิที่ขอบกำแพงด้านในโดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างจำกัด (Finite Different Method)

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติของกำแพงหลายชั้น (Multi-Layered Wall) โดยในแต่ละชั้นจะใช้วัสดุต่างกัน โดยใช้สมการความร้อนหนึ่งมิติแบบไร้หน่วย (Non-Dimensional Form) และใช้ระเบียบวิธีผลต่างจำกัด สำหรับแก้สมการดังกล่าว

2.1 กำแพงหลายชั้น

งานวิจัยนี้จะศึกษากำแพง 2 ชั้น กำแพง 4 ชั้น และกำแพง 5 ชั้น ดังภาพที่ 1 โดยมีความหนาเท่ากัน แต่ละชั้นของกำแพงจะสร้างด้วยวัสดุต่างชนิดกันที่มีค่าการนำความร้อนและค่าความหนาแน่นต่างกันดังตารางที่ 1 โดยด้านนอกอาคารได้รับอิทธิพลความร้อนจากดวงอาทิตย์ทำให้ตลอดแนวขอบกำแพงด้านนอกมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ T_0 โดยความร้อนกระจายเข้ามายังด้านในกำแพง ทำให้ภายในของกำแพงมีค่าอุณหภูมิ $T_1, T_2, \dots, T_{m-1}, T_m$ เมื่อ m เป็นจำนวนเต็มบวกที่น้อยกว่า N โดยแต่ละค่าของ T_m เป็นตัวแทนของค่าอุณหภูมิในแนวระดับความหนาของกำแพงที่ตำแหน่ง m จนถึงขอบกำแพงด้านในที่มีค่าอุณหภูมิเท่ากับ T_N ดังภาพที่ 1(a) เป็นการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติ โดยกำแพงหลายชั้นที่ศึกษาจะกำหนดความหนาของแต่ละชั้นและประเภทของวัสดุที่ใช้ต่างกัน ดังรายละเอียดในตารางที่ 2 - 3



ภาพที่ 1 การถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติ (a) กำแพง 2 ชั้น
(b) กำแพง 4 ชั้น (c) กำแพง 5 ชั้น

ตารางที่ 1 ค่าความหนาแน่นและค่าการนำความร้อน
ของวัสดุ

วัสดุ	ค่าความหนาแน่น (Kg/m ³)	ค่าการนำความร้อน (w/(m.k))
อิฐมวลเบา	1800	0.47
อิฐมวลเบา	2000	0.13
ปูนซีเมนต์	2320	0.91

ตารางที่ 2 วัสดุและความหนาของกำแพงแต่ละชั้นของ
กำแพง 2 ชั้นและกำแพง 4 ชั้น

ประเภทกำแพง	ชนิดของวัสดุ	ความหนา (เมตร)
กำแพง 2 ชั้น ชนิดที่ 1	อิฐมวลเบา	$W_1 = 0.2$
	อิฐมวลเบา	$W_2 = 0.2$
กำแพง 2 ชั้น ชนิดที่ 2	อิฐมวลเบา	$W_1 = 0.2$
	อิฐมวลเบา	$W_2 = 0.2$
กำแพง 4 ชั้น	ปูนซีเมนต์	$W_1 = 0.05$
	อิฐมวลเบา	$W_1 = 0.15$
	อิฐมวลเบา	$W_1 = 0.15$
	ปูนซีเมนต์	$W_1 = 0.05$

ตารางที่ 3 วัสดุและความหนาของกำแพงแต่ละชั้นของ
กำแพง 5 ชั้น

ประเภทกำแพง	ชนิดของวัสดุ	ความหนา (เมตร)
กำแพง 5 ชั้น ชนิดที่ 1	ปูนซีเมนต์	$W_1 = 0.050$
	อิฐมวลเบา	$W_2 = 0.125$
	ปูนซีเมนต์	$W_3 = 0.050$
	อิฐมวลเบา	$W_4 = 0.125$
	ปูนซีเมนต์	$W_5 = 0.050$
กำแพง 5 ชั้น ชนิดที่ 2	ปูนซีเมนต์	$W_1 = 0.050$
	อิฐมวลเบา	$W_2 = 0.125$
	ปูนซีเมนต์	$W_3 = 0.050$
	อิฐมวลเบา	$W_4 = 0.125$
	ปูนซีเมนต์	$W_5 = 0.050$
กำแพง 5 ชั้น ชนิดที่ 3	ปูนซีเมนต์	$W_1 = 0.050$
	อิฐมวลเบา	$W_2 = 0.125$
	ปูนซีเมนต์	$W_3 = 0.050$
	อิฐมวลเบา	$W_4 = 0.125$
	ปูนซีเมนต์	$W_5 = 0.050$

2.2 สมการความร้อนหนึ่งมิติ

การถ่ายเทความร้อนจากขอบกำแพงด้านนอกสู่
ขอบกำแพงด้านใน โดยมีกำแพงหลายชั้นเป็นตัวกลาง
ในการนำความร้อน ถูกอธิบายโดยสมการเชิงอนุพันธ์

อันดับสองที่ประกอบด้วยเทอมของการแพร่และเทอมของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของอุณหภูมิของความร้อนเทียบเวลา เรียกว่า “สมการความร้อนหนึ่งมิติ” จาก [8] ดังสมการที่ (1)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \text{ ทุก } (x, t) \in D \text{ และ } u = u(x, t) \quad (1)$$

โดยที่ l คือความหนาของกำแพง (เมตร)

u คือค่าอุณหภูมิความร้อน (องศาเซลเซียส)

กำหนดให้ $\alpha = \frac{K}{c\rho}$ เมื่อ K เป็นค่าการนำความร้อนและค่า ρ เป็นความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ในการสร้างกำแพงกับ c เป็นอุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

2.3 เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบ

สมการความร้อนหนึ่งมิติเป็นปัญหาค่าขอบและค่าเริ่มต้น โดยการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นกำหนดจากอุณหภูมิของความร้อนภายในกำแพงเมื่อเริ่มต้นหรือที่เวลา t_0 ทุกตำแหน่ง x ใดๆ ที่ $x \in [0, l]$ มีค่าเท่ากับ u_0 ดังสมการที่ (2) จะได้ว่า

$$u(x, 0) = u_0 \quad (2)$$

ค่าอุณหภูมิความร้อนเฉลี่ยจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ขอบด้านนอกกำแพงเป็นค่าเงื่อนไขขอบมีค่าเท่ากับ T_0 และอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างกำแพงแต่ละชั้นและขอบกำแพงด้านในมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (3) นั่นคือ

$$u(0, t) = T_0 = u_{\max} \text{ และ } u_x(l, t) = 0 \quad (3)$$

2.4 รูปไร้มิติ

รูปไร้มิติเป็นการแปลงสมการที่มีหน่วยให้เป็นสมการที่ไม่คิดหน่วยเพื่อความสะดวกและลดความซับซ้อนในการคำนวณ โดยกำหนดตัวแปร x, u, t ที่มีหน่วย ให้เป็นตัวแปรไม่มีหน่วย X, U, T ดังสมการที่ (4) – (6) ด้วยการแปลงดังนี้

$$X = \frac{x}{l} \text{ หรือ } x = Xl \quad (4)$$

$$T = \frac{\alpha t}{l^2} \text{ หรือ } t = \frac{Tl^2}{\alpha} \quad (5)$$

$$U = \frac{u}{u_{\max}} \text{ หรือ } u = u_{\max} U \quad (6)$$

หาอนุพันธ์ย่อยเทียบตัวแปร t ในสมการที่ (6) จะได้

$$\frac{\partial u}{\partial t} = u_{\max} \frac{\partial U}{\partial t} = u_{\max} \frac{\partial U}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

จากสมการที่ (5) หาอนุพันธ์เทียบ t

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{l^2} \quad (8)$$

แทนค่าสมการที่ (8) ลงในสมการที่ (7)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \left(u_{\max} \frac{\alpha}{l^2} \right) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

หาอนุพันธ์ย่อยเทียบตัวแปร x ในสมการที่ (6) จะได้

$$\frac{\partial u}{\partial x} = u_{\max} \frac{\partial U}{\partial x} = u_{\max} \frac{\partial U}{\partial X} \cdot \frac{\partial X}{\partial x} \quad (10)$$

จากสมการที่ (4) หาอนุพันธ์เทียบ x

$$\frac{\partial X}{\partial x} = \frac{1}{l} \quad (11)$$

แทนค่าสมการที่ (11) ลงในสมการที่ (10)

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{\max}}{l} \frac{\partial U}{\partial X} \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) หาอนุพันธ์ย่อยเทียบกับ x จะได้

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u_{\max}}{l} \frac{\partial U}{\partial X} \right) = \frac{u_{\max}}{l} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial X} \\ &= \frac{u_{\max}}{l} \frac{\partial}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial X} = \frac{u_{\max}}{l} \frac{\partial}{\partial X} \frac{\partial U}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \\ &= \frac{u_{\max}}{l} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} \frac{1}{l} = \frac{u_{\max}}{l^2} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2}\end{aligned}\quad (13)$$

แทนสมการที่ (9) และ (13) ในสมการที่ (1) นั่นคือ

$$\left(u_{\max} \frac{\alpha}{l^2} \right) \frac{\partial U}{\partial T} = \alpha \left(\frac{u_{\max}}{l^2} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} \right)$$

$$\frac{\partial U}{\partial T} = \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} \quad \text{ทุก ๆ } (X, T) \in [0, 1] \times [0, T] \quad (14)$$

จากสมการที่ (2) และสมการที่ (3) จะได้เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบของปัญหาใหม่ $U(X, 0) = \frac{u_0}{u_{\max}}$ และ $U(0, T) = 1$ และ $U_X(1, T) = 0$ เรียกสมการที่ (14) ว่าสมการความร้อนหนึ่งมิติในรูปไร้มิติ

3. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการประมาณผลเฉลยของค่าอุณหภูมิความร้อนที่ได้จากสมการความร้อนหนึ่งมิติในรูปไร้มิติ การประมาณค่าอนุพันธ์ย่อยที่เงื่อนไขขอบ รวมถึงขั้นตอนวิธีการคำนวณหาค่าผลเฉลย [9]

3.1 ระเบียบวิธีผลต่างจำกัด

ปัญหาที่ศึกษาในงานวิจัยนี้จะประมาณค่าอุณหภูมิความร้อนแต่ละตำแหน่งภายในกำแพงเป็นระยะห่างเท่ากัน สามารถที่จะประมาณหาค่าผลเฉลยด้วยระเบียบวิธีผลต่างจำกัด โดยการใช้ระเบียบวิธีผลต่างทางหลังในเวลาและผลต่างศูนย์กลางในปริภูมิ ด้วยการประมาณค่าแต่ละเทอมของสมการที่ (14) ด้วยการกระจายอนุกรมเทเลอร์และไม่คิดค่าคลาดเคลื่อนตัดปลาย

$$\frac{\partial U}{\partial T} = \frac{U_i^j - U_i^{j-1}}{\Delta T} \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} = \frac{U_{i-1}^j - 2U_i^j + U_{i+1}^j}{\Delta X^2} \quad (16)$$

แทนสมการที่ (15) และ (16) ในสมการที่ (14) จะได้

$$\frac{U_i^j - U_i^{j-1}}{\Delta T} = \frac{U_{i-1}^j - 2U_i^j + U_{i+1}^j}{\Delta X^2} \quad (17)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (7) จะได้

$$-\frac{1}{\Delta x^2} U_{i-1}^j + \left(\frac{1}{\Delta T} + \frac{2}{\Delta x^2} \right) U_i^j - \frac{1}{\Delta x^2} U_{i+1}^j = \frac{1}{\Delta T} U_i^{j-1} \quad (18)$$

โดยที่ $U_i^j = U(i\Delta X, j\Delta T)$ ทุกๆ $i = 2, 3, \dots, N-1, N$ ซึ่ง $N\Delta X = 1$ และ ΔX คือความกว้างของช่วงย่อย X กับค่า $j = 1, 2, \dots, J-1, J$ ซึ่ง $J\Delta T = T$ และ ΔT คือความกว้างของช่วงย่อย T จากเงื่อนไขขอบที่เป็นอนุพันธ์ $U_X(1, T) = 0$ จะประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีผลต่างทางหน้าด้วยสมการที่ (19) และจะได้สมการที่ (20)

$$\left. \frac{\partial U}{\partial X} \right|_{X=1} = \frac{U_{N+1}^j - U_N^j}{\Delta X} = 0 \quad (19)$$

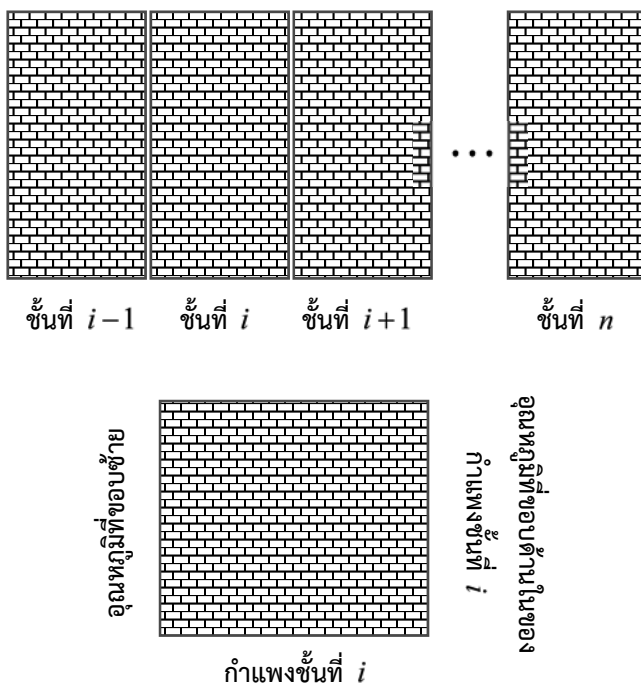
$$U_{N+1}^j = U_N^j \quad (20)$$

3.2 ขั้นตอนวิธีการคำนวณ

การประมาณค่าอุณหภูมิภายในกำแพงหลายชั้นจะมีระเบียบวิธีและขั้นตอนคล้ายกับการประมาณค่าอุณหภูมิภายในกำแพงชั้นเดียว [4] แต่ไม่สามารถคำนวณหาอุณหภูมิทุกตำแหน่งพร้อมกันได้ต้องคำนวณค่าอุณหภูมิตีละชั้นของกำแพง เนื่องจาก T เป็นตัวแปรเวลาที่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าเวลาจริง t ซึ่ง $T = \frac{t\alpha}{l^2}$ แปรผันตามค่า α แตกต่างกันของแต่ละชั้นกำแพงที่สร้างจากวัสดุต่างชนิด

กัน จะทำให้ค่า T สำหรับนำไปใช้คำนวณหาค่าอุณหภูมิของแต่ละชั้นกำแพงต่างกันด้วย วิธีการคำนวณค่าเวลาที่ไม่คิดหน่วยของแต่ละชั้นของกำแพงที่มีจำนวนชั้นเท่ากับ n ชั้นและ $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-1}, \alpha_n$ คือค่าคงที่ของแต่ละชั้นของกำแพงตามลำดับโดยที่ $\alpha_i = \frac{K_i}{c\rho_i}$ ที่ $i = 1, 2, \dots, n-1, n$

จากภาพที่ 2 อุณหภูมิขอบซ้ายกำแพงชั้นที่ i คือค่าที่ได้จากอุณหภูมิขอบขวากำแพงชั้นที่ $i-1$ โดยการประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีผลต่างจำกัด ซึ่งเป็นค่าเงื่อนไขขอบของการคำนวณค่าอุณหภูมิภายในกำแพงชั้นที่ i สามารถคำนวณค่าเวลาที่ไม่คิดหน่วยของกำแพงชั้นที่ i จาก $T_i = \frac{t\alpha_i}{l_i^2}$ เมื่อ T_i แทนเวลาแบบไม่คิดหน่วยของชั้นที่ i และ l_i เป็นความหนาของกำแพงชั้นที่ i ตัวอย่างการคำนวณค่าเวลาที่ไม่คิดหน่วยของกำแพงชั้นที่สร้างจากปูนซีเมนต์ที่มีความหนา 0.1 เมตร โดยคำนวณ

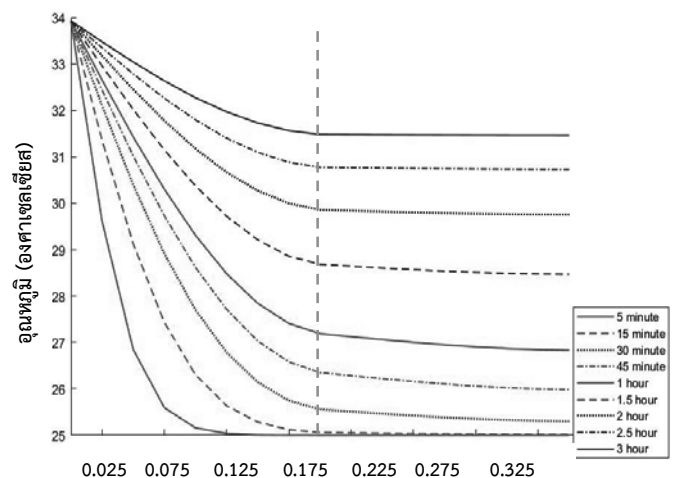


ภาพที่ 2 กำแพงหลายชั้น

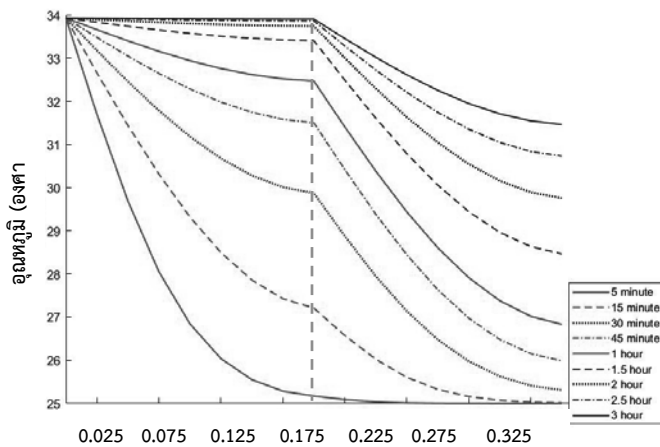
ค่า $\alpha = \frac{K_0}{c\rho} = \frac{0.91}{(25)(2320)}$ สมมติต้องการหาค่าอุณหภูมิภายในกำแพงที่เวลาจริง 1 ชั่วโมง นั่นคือ $t = 3600$ วินาที คำนวณหาค่าเวลาที่ไม่คิดหน่วย $T = 5.65$ ในทำนองเดียวกันสำหรับกำแพงชั้นที่สร้างจากอิฐมวลเบาที่มีความหนา 0.1 เมตรเช่นกัน คำนวณหาค่าเวลาที่ไม่คิดหน่วย $T = 3.76$ นั้นหมายถึง การคำนวณค่าอุณหภูมิทั้งแผ่นกำแพงที่เวลา 1 ชั่วโมง แต่ละชั้นของกำแพงจะคำนวณหาค่าอุณหภูมิด้วยการคำนวณค่าเวลาที่ไม่คิดหน่วยที่ต่างกัน

4. ผลลัพธ์และการอภิปราย

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการประมาณค่าอุณหภูมิภายในของกำแพงหลายชั้นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยสมมติอุณหภูมิเฉลี่ยที่กระทำต่อผนังกำแพงด้านนอกมีอุณหภูมิเฉลี่ย 33.93 องศาเซลเซียส เมื่อเริ่มต้นอุณหภูมิภายในกำแพงเท่ากับ 25 องศาเซลเซียสและกำแพงมีความหนา 0.4 เมตร



ภาพที่ 3 เส้นกราฟแสดงอุณหภูมิความร้อนภายในกำแพง 2 ชั้น ชนิดที่ 1



ภาพที่ 4 เส้นกราฟแสดงอุณหภูมิความร้อนภายในกำแพง 2 ชั้น ชนิดที่ 2

ในงานวิจัยพิจารณาลำดับของการใช้วัสดุในการสร้างกำแพงมีผลต่อค่าอุณหภูมิขอบกำแพงด้านในอย่างไร โดยศึกษาการถ่ายเทความร้อนของกำแพง 2 ชั้นชนิดที่ 1 ที่มีความหนาเท่ากับ 0.4 เมตร สร้างจากอิฐมวลเบาในชั้นแรกมีความหนาเท่ากับ 0.2 เมตร ชั้นถัดมาใช้วัสดุเป็นอิฐมวลเบาที่มีความหนาเท่ากับ 0.2 เมตรกับกำแพง 2 ชั้นชนิดที่ 2 ที่สร้างจากอิฐมวลเบาชั้นแรกมีความหนาเท่ากับ 0.2 เมตร ชั้นถัดมาใช้วัสดุเป็นอิฐมวลเบามีความหนาเท่ากับ 0.2 เมตร โดยจะพิจารณาค่าอุณหภูมิที่เวลา 5 นาที 15 นาที 30 นาที 45 นาที 1 ชั่วโมง 1.5 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 2.5 ชั่วโมงและ 3 ชั่วโมง ดังผลลัพธ์แนวโน้มการถ่ายเทความร้อนภายในกำแพงแต่ละเวลา ในภาพที่ 3 – 4 ตารางที่ 4 แสดงค่าอุณหภูมิที่จุดรอยต่อ (ที่ความหนา 0.2 เมตร) ที่เชื่อมระหว่างกำแพงชั้นที่ 1 กับชั้นที่ 2 และค่าอุณหภูมิที่ขอบกำแพงด้านใน (ที่ความหนา 0.4 เมตร) พบว่ากำแพง 2 ชั้น ชนิดที่ 1 และกำแพง 2 ชั้น ชนิดที่ 2 ให้ค่าอุณหภูมิที่ขอบกำแพงด้านในไม่แตกต่างกัน นั่นหมายถึงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การลำดับวัสดุที่ใช้ในการสร้างกำแพงของทั้ง 2 ชนิดนี้ไม่มีผลต่อค่าอุณหภูมิที่ขอบกำแพงด้านใน

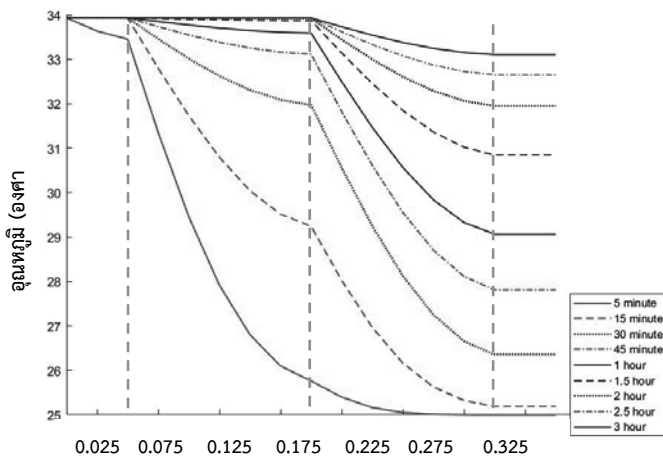
ตารางที่ 4 แสดงค่าอุณหภูมิที่จุดต่อและจุดขอบด้านในของกำแพง 2 ชั้นชนิดที่ 1 และชนิดที่ 2

เวลา (หน่วย)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
	กำแพง 2 ชั้น ชนิดที่ 1		กำแพง 2 ชั้น ชนิดที่ 2	
	จุดต่อ	จุดขอบ ด้านใน	จุดต่อ	จุดขอบ ด้านใน
15 นาที	27.2031	25.0142	25.0578	25.0142
30 นาที	29.8758	25.3025	25.5541	25.3025
1 ชั่วโมง	32.4741	26.8334	27.1905	26.8334
1.5 ชั่วโมง	33.4072	28.4639	28.6793	28.4639
2 ชั่วโมง	33.7422	29.7569	29.8590	29.7569
3 ชั่วโมง	33.9058	31.4668	31.4844	31.4668

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่จุดขอบกำแพงด้านในของกำแพง 2 ชั้นและ 4 ชั้น

เวลา (หน่วย)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
	กำแพง 2 ชั้น	กำแพง 4 ชั้น
15 นาที	25.0142	25.1886
30 นาที	25.3025	26.3583
1 ชั่วโมง	26.8334	29.0661
1.5 ชั่วโมง	28.4639	30.8462
2 ชั่วโมง	29.7569	31.9515
3 ชั่วโมง	31.4668	33.1044

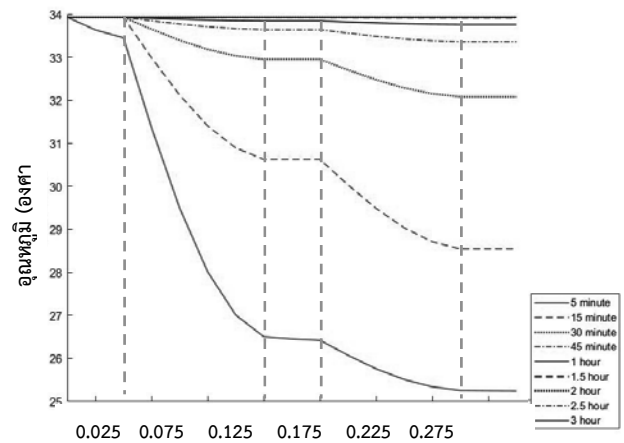
พิจารณากำแพง 4 ชั้น มีความหนาเท่ากับ 0.4 เมตร โดยชั้นที่ 1 และ 4 สร้างจากปูนมีความหนา 0.05 เมตร ชั้นที่ 2 สร้างจากอิฐมวลเบามีความหนา 0.15 เมตรและชั้นที่ 3 สร้างจากอิฐมวลเบามีความหนา 0.15 เมตร แสดงกราฟเส้นการถ่ายเทความร้อนภายในกำแพงที่เวลา 5 นาที 15 นาที 30 นาที 45 นาที 1 ชั่วโมง 1.5 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 2.5 ชั่วโมงและ 3 ชั่วโมง ในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 เส้นกราฟแสดงอุณหภูมิความร้อนภายในกำแพง 4 ชั้น

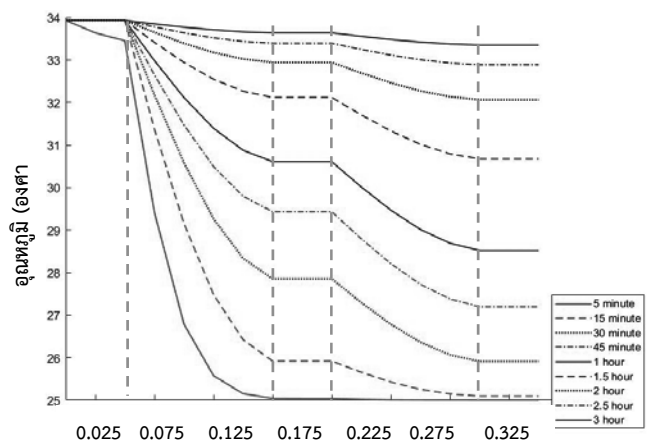
เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขอบกำแพงด้านในของกำแพง 4 ชั้นกับกำแพง 2 ชั้น ชนิดที่ 2 เพื่อดูค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปตามเวลา เมื่อใช้วัสดุชนิดเดียวกันในการสร้างกำแพง แต่กำแพง 4 ชั้น ที่มีการฉาบปูนหนา 0.025 เมตร ไว้ที่ผนังด้านนอกและผนังด้านในของกำแพงแสดงค่าอุณหภูมิดังตารางที่ 5 จะได้ว่าค่าอุณหภูมิที่ขอบกำแพงด้านในเมื่อสร้างกำแพง 2 ชั้น สามารถลดค่าอุณหภูมิได้สูงสุดเมื่อช่วงเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมงและอุณหภูมิจะเข้าสู่สภาวะคงที่ได้ช้ากว่าเมื่อสร้างกำแพง 4 ชั้น ในกรณีพิจารณา

พิจารณาการถ่ายเทความร้อนของกำแพง 5 ชั้น ชนิดที่ 1 ที่เวลา 5 นาที 15 นาที 30 นาที 45 นาที 1 ชั่วโมง 1.5 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 2.5 ชั่วโมงและ 3 ชั่วโมงดังตารางที่ 2 ชนิดที่ 1 มีความหนาเท่ากับ 0.4 เมตร โดยชั้นที่ 1, 3 และ 5 สร้างจากปูนมีความหนา 0.05 เมตร ชั้นที่ 2 สร้างจากอิฐมวลเบามีความหนา 0.125 เมตรและชั้นที่ 4 สร้างจากอิฐมวลเบามีความหนา 0.125 เมตร แสดงกราฟเส้นการถ่ายเทความร้อนภายในกำแพงแต่ละเวลา ในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 เส้นกราฟแสดงอุณหภูมิความร้อนภายในกำแพง 5 ชั้นชนิดที่ 1

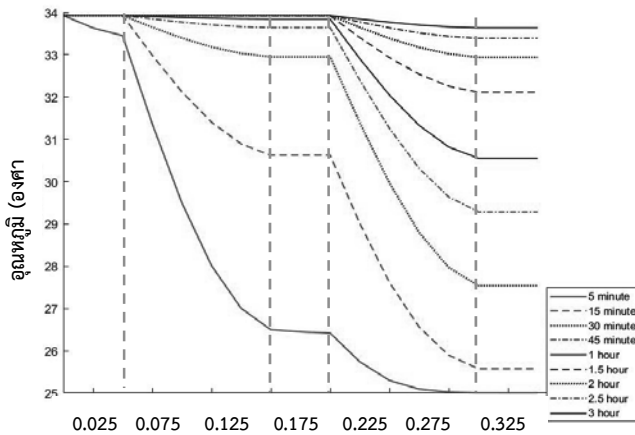
พิจารณากำแพง 5 ชั้น ชนิดที่ 2 มีความหนาเท่ากับ 0.4 เมตร โดยชั้นที่ 1, 3 และ 5 สร้างจากปูนมีความหนา 0.05 เมตร ชั้นที่ 2 และ 4 สร้างจากอิฐมวลเบามีความหนา 0.125 เมตร แสดงกราฟเส้นการถ่ายเทความร้อนภายในกำแพงแต่ละเวลา ในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 เส้นกราฟแสดงอุณหภูมิความร้อนภายในกำแพง 5 ชั้นชนิดที่ 2

พิจารณากำแพง 5 ชั้น ชนิดที่ 3 มีความหนาเท่ากับ 0.4 เมตร โดยชั้นที่ 1, 3 และ 5 สร้างจากปูนมีความหนา 0.05 เมตร ชั้นที่ 2 และ 4 สร้างจากอิฐมวลเบามีความหนา 0.125 เมตร

0.125 เมตร แสดงกราฟเส้นการถ่ายเทความร้อนภายใน
กำแพงแต่ละเวลา ในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 เส้นกราฟแสดงอุณหภูมิความร้อนภายในกำแพง 5 ชั้น
ชนิดที่ 3

สมมติให้ความร้อนเฉลี่ยที่ขอบกำแพงด้านนอก 33.93 องศาเซลเซียสตลอดเวลา จะทำให้ค่าอุณหภูมิภายใน
กำแพงและขอบกำแพงด้านในถึงจุดสถานะคงที่ที่อุณหภูมิ
33.93 องศาเซลเซียส จากตารางที่ 6 อุณหภูมิเฉลี่ยในช่วง
3 ชั่วโมง กำแพง 5 ชั้น ชนิดที่ 3 จะเข้าสู่สภาวะนี้ได้เร็ว
กว่าและกำแพง 5 ชั้น ชนิดที่ 2 จะเข้าสู่สภาวะนี้ได้ช้ากว่า
เมื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ขอบกำแพงด้านในของ
กำแพง 5 ชั้น ทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 6 แสดงค่าอุณหภูมิที่จุดขอบกำแพงด้านในของ
กำแพง 5 ชั้นชนิดที่ 1 ชนิดที่ 2 และชนิดที่
3

เวลา (หน่วย)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	กำแพง 5 ชั้น ชนิดที่ 1	กำแพง 5 ชั้น ชนิดที่ 2	กำแพง 5 ชั้น ชนิดที่ 3
15 นาที	25.5780	25.0943	28.5415
30 นาที	27.5416	25.9121	32.0820
1 ชั่วโมง	30.5535	38.5207	33.7598
1.5 ชั่วโมง	32.1122	30.6740	33.9150
2 ชั่วโมง	32.9415	32.0635	33.9286
3 ชั่วโมง	33.6364	33.3524	33.9300

5. สรุปผลงานวิจัย

ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนภายในกำแพง
นอกจากวัสดุที่ใช้ในการสร้างกำแพง นั่นคือการออกแบบ
กำแพงที่แบ่งเป็นหลายชั้นเพื่อให้เหมาะสมกับเงื่อนไขที่
จำกัด การสร้างกำแพงหลายชั้นมีความยืดหยุ่นสูงกว่า
กำแพงชั้นเดียวเนื่องจากสามารถนำวัสดุหลายชนิดมาเพิ่ม
คุณภาพในการสร้างกำแพงที่ช่วยลดค่าอุณหภูมิของขอบ
กำแพงด้านในเพื่อช่วยลดการใช้พลังงานจากเครื่องปรับอากาศ
ภายในอาคาร โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาถ่ายเทความร้อน
ภายในกำแพงที่มีลักษณะการสร้างแบบหลายชั้นที่
แต่ละชั้นของกำแพงสร้างจากอิฐมอญ อิฐมวลเบา หรือ
ปูนซีเมนต์ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นอีก
ทางเลือกหนึ่งในการคำนวณหาอุณหภูมิที่ขอบกำแพง
ด้านในสำหรับกำแพงหลายชั้น เพื่อนำค่าอุณหภูมิที่ได้ไป
เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงาน
และสามารถคำนวณหาอุณหภูมิภายในของกำแพงเพื่อ
ดูประสิทธิภาพของวัสดุใหม่ที่ถูกคิดค้นสำหรับใช้เป็นวัสดุ
ในการสร้างกำแพงได้

6. ข้อเสนอแนะ

การปรับเงื่อนไขค่าขอบจากค่าคงที่ที่ได้จากอุณหภูมิความร้อนเฉลี่ยเป็นฟังก์ชันค่าอุณหภูมิที่ขึ้นอยู่กับเวลา โดยใช้อ้างอิงจากข้อมูลกรมอุตุนิยมวิทยาจะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีประสิทธิภาพในการหาค่าอุณหภูมิภายในกำแพงได้สอดคล้องกับค่าความจริงมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถนำค่าอุณหภูมิที่ขอบกำแพงด้านในไปเป็นข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการใช้เครื่องปรับอากาศได้

7. บรรณานุกรม

- (1) J. Rattanachotinun, P. Pairojn, "The Comparative Effectiveness of Practice of Autoclaved Aerated Concrete with Hollow Hole and Typical Autoclaved Aerated Concrete," EAU Heritage Journal Science and Technology, vol. 10, no. 3, 2016.
- (2) J. Rattanachotinun, P. Pairojn, "A Feasibility Study of Glass Solar Chimney Wall for Tropical Area, Case Study: Bangkok, Thailand," International Energy Journal, vol. 14, no. 1, pp. 95-106, 2014.
- (3) J. Rattanachotinun, P. Pairojn, 2017. "Assessment of the effectiveness and practical feasibility of glass solar chimney walls by open frame in Thailand," Journal of Building Services Engineering Research & Technology, vol. 38, no. 2, pp. 151-162, 2017.
- (4) โยธิน อึ้งกุล, พิชัย นามประกาย, นริศ ประทินทอง, รังสิต ศรจิตติ, "แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนและความชื้นในบ้านที่ใช้ผนังคอนกรีตมวลเบาภายใต้สภาวะอากาศของประเทศไทย," KCU Engineering Journal, ฉบับที่ 33, หน้า 375-390, 2006.
- (5) วิศรุต คล้ายแจ้ง, นพรัตน์ โพธิ์ชัย, "การจำลองแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนจากผนังภายนอกสู่ผนังภายในอาคาร โดยใช้วัสดุคอนกรีตมวลเบา คอนกรีตมอดูและคอนกรีตบล็อก," วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ, ฉบับที่ 15, หน้า 9-18, 2562.
- (6) A. Missoum, M. Elmir, M. Bouanini, B. Draoui, "Numerical Simulation of Heat Transfer Through the Building Facades of Buildings Located in the City of Bechar," The International Journal of Multiphysics, vol. 10, no. 4, pp. 441-450, 2016.
- (7) สุธน รุ่งเรือง, นิชาภา มินาบุญ, รัชต์ศักดิ์ พรหมมาศ, "การศึกษาคุณสมบัติของผนังเบาจากถลุงกระดาษปูนซีเมนต์," วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, ฉบับที่ 16, หน้า 95-105, 2018.
- (8) M. J. Hancock, "The 1 D Heat Equation. United States of America," 2006.
- (9) A. R. Mitchell, "Computational Methods in Partial Differential Equations," United Kingdom, John-Wiley and Sons., 1969.

คำแนะนำสำหรับผู้นิพนธ์บทความ

วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า มีจุดประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้และผลงานทางวิชาการด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี ในทุกแขนง โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานที่มีประโยชน์ต่อการวิชาการ การพัฒนาประเทศ และงานที่สามารถประยุกต์ใช้ในทางทหาร การรักษาความปลอดภัย และความมั่นคงของชาติ โดยมีกำหนดออกในเดือนธันวาคมของแต่ละปี ผู้นิพนธ์สามารถส่งบทความมาตีพิมพ์ได้ โดยไม่จำเป็นต้องเป็นสมาชิกของวารสารหรือเป็นบุคลากรของกองทัพไทย

วารสารฯ รับผิดชอบต้นฉบับทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ผลงานที่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์ จะต้องมีความน่าสนใจ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เป็นองค์ความรู้ใหม่ หรือนำเสนอองค์ความรู้เดิมในมุมมองใหม่ ไม่เคยถูกนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารอื่นใดมาก่อน และไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นใด

วารสารฯ รับผิดชอบบทความดังต่อไปนี้

1. บทความวิจัย (Research Articles) เป็นบทความที่นำเสนอผลการดำเนินการวิจัยอย่างเป็นระบบ และได้บรรลุวัตถุประสงค์ของการวิจัย ประกอบด้วยชื่อเรื่องและรายละเอียดผู้เขียน บทคัดย่อ และเนื้อหางานวิจัยซึ่งประกอบไปด้วย บทนำ วัตถุประสงค์ เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วิธีดำเนินการศึกษา ผลการศึกษา สรุปและอภิปรายผล กิตติกรรมประกาศ และบรรณานุกรม
2. บทความปริทัศน์ (Review Articles) เป็นบทความที่เขียนจากการรวบรวมความรู้ในเรื่องที่น่าสนใจในปัจจุบัน เรื่องใดเรื่องหนึ่ง ผ่านกระบวนการ วิเคราะห์ สังเคราะห์ เปรียบเทียบ และ/หรือ วิจารณ์ เพื่อให้เกิดเป็นองค์ความรู้ในมุมมองใหม่ ประกอบด้วย บทนำ เนื้อหา วิจารณ์ สรุป และบรรณานุกรม

การส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์

ผู้นิพนธ์สามารถส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารฯ ได้ 2 ช่องทางคือ

1. จัดส่งบทความผ่านอีเมลล์ crmajournal@crma.ac.th
2. จัดส่งบทความผ่านเว็บไซต์ <http://veel.crma.ac.th/Journal>

การดำเนินงานของกองบรรณาธิการวารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

เมื่อกองบรรณาธิการได้รับบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ จะจัดให้มีการกลั่นกรองเพื่อคัดเลือกเฉพาะบทความที่อยู่ในขอบข่ายของการตีพิมพ์ของวารสารฯ และมีระดับคุณภาพที่ยอมรับได้ โดยบทความที่ได้รับการยอมรับให้ตีพิมพ์ ต้องผ่านเกณฑ์การประเมินจากผู้กลั่นกรองและประเมินบทความอย่างน้อย 2 คนจากผู้กลั่นกรองและประเมินบทความจำนวน 3 คนและ/หรือ ผ่านการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็นรายกรณี สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับอย่างมีเงื่อนไข ผู้นิพนธ์ของบทความนั้นต้องดำเนินการแก้ไขให้เสร็จสมบูรณ์ภายในระยะเวลาที่กองบรรณาธิการระบุ เมื่อบทความได้ถูกตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารฯ แล้วบทความดังกล่าวจะถูกนำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์ของวารสารฯ ด้วย ผู้นิพนธ์แต่ละคนจะได้รับเล่มวารสาร ที่มีบทความของตนอยู่ จำนวนคนละ 1 เล่ม การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ส่งบทความโดยตรง กองบรรณาธิการฯ ขอสงวนสิทธิ์ในการรับหรือปฏิเสธบทความเข้าสู่กระบวนการประเมินคุณภาพโดยผู้ทรงคุณวุฒิ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Double Blind Review) และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการฯ

ลิขสิทธิ์

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสารฯ

บทบาทและหน้าที่ของผู้นิพนธ์ (Duties of Authors)

1. ผู้นิพนธ์ต้องรับรองว่าผลงานที่ส่งมานั้นเป็นผลงานใหม่และไม่เคยตีพิมพ์ที่ไหนมาก่อน
2. ผู้นิพนธ์ต้องรายงานข้อเท็จจริงที่เกิดขึ้นจากการทำวิจัย ไม่บิดเบือนข้อมูล หรือให้ข้อมูลที่เป็นเท็จ
3. ผู้นิพนธ์ต้องอ้างอิงผลงานของผู้อื่น หากมีการนำผลงานเหล่านั้นมาใช้ในผลงานของตนเอง รวมทั้งจัดทำบรรณานุกรมท้ายบทความ
4. ผู้นิพนธ์ต้องเขียนบทความวิจัยให้ถูกต้องตามรูปแบบที่กำหนดไว้ใน “คำแนะนำสำหรับผู้นิพนธ์บทความ”
5. ผู้นิพนธ์ที่มีชื่อปรากฏในบทความทุกคน ต้องเป็นผู้ที่มีส่วนในการดำเนินการวิจัยจริง
6. ผู้นิพนธ์ต้องระบุแหล่งทุนที่สนับสนุนในการทำวิจัยนี้ (ถ้ามี)
7. ผู้นิพนธ์ต้องระบุผลประโยชน์ทับซ้อน (ถ้ามี)

บทบาทและหน้าที่ของบรรณาธิการ (Duties of Editors)

1. บรรณาธิการมีหน้าที่พิจารณาคุณภาพของบทความ เพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารฯ
2. บรรณาธิการต้องไม่เปิดเผยข้อมูลผู้นิพนธ์ และผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ แก่บุคคลอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความ
3. บรรณาธิการต้องตัดสินใจคัดเลือกบทความมาตีพิมพ์หลังจากผ่านกระบวนการประเมินบทความแล้ว โดยพิจารณาจากความสำคัญ ความใหม่ ความชัดเจน และความสอดคล้องของเนื้อหา กับนโยบายของวารสารฯ
4. บรรณาธิการต้องไม่ตีพิมพ์บทความที่เคยตีพิมพ์ที่อื่นมาแล้ว

5. บรรณาธิการต้องไม่ปฏิเสธการตีพิมพ์บทความ เพราะความสงสัยหรือไม่แน่ใจ โดยให้ผู้นิพนธ์หาหลักฐานมาพิสูจน์ข้อสงสัยนั้น ๆ ก่อน
6. บรรณาธิการต้องไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้นิพนธ์ ผู้ประเมิน และทีมผู้บริหาร
7. บรรณาธิการต้องมีการตรวจสอบบทความในด้านการคัดลอกผลงานผู้อื่น (Plagiarism) อย่างจริงจัง เพื่อให้แน่ใจว่าบทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารฯ ไม่มีการคัดลอกผลงานของผู้อื่น หากตรวจพบการคัดลอกผลงานของผู้อื่นในกระบวนการประเมินบทความ บรรณาธิการต้องหยุดกระบวนการประเมิน และติดต่อผู้ประพันธ์หลักทันที เพื่อขอคำชี้แจง เพื่อประกอบการ “ตอบรับ” หรือ “ปฏิเสธ” การตีพิมพ์บทความนั้น ๆ

บทบาทและหน้าที่ของผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ (Duties of Reviewers)

1. ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความต้องรักษาความลับ และไม่เปิดเผยข้อมูลบางส่วนหรือทุกส่วนของบทความที่ส่งมาเพื่อพิจารณาแก่บุคคลอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้อง ในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความ (Confidentially)
2. หลังจากได้รับบทความจากบรรณาธิการ และผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ ตระหนักว่าตนเองอาจมีผลประโยชน์ทับซ้อนกับผู้นิพนธ์ เช่น เป็นผู้ร่วมโครงการ หรือรู้จักผู้นิพนธ์เป็นการส่วนตัว หรือเหตุผลอื่นๆ ที่ทำให้ไม่สามารถให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะอย่างอิสระได้ ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความควรแจ้งให้บรรณาธิการทราบ และปฏิเสธการประเมินบทความนั้น ๆ
3. ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความ ควรประเมินบทความในสาขาวิชาที่ตนมีความชำนาญ โดยพิจารณาความสำคัญของเนื้อหาในบทความที่จะมีต่อสาขาวิชานั้นๆ คุณภาพของการวิเคราะห์ และความเข้มข้นของผลงาน ไม่ควรใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่มีข้อมูลรองรับในการตัดสินบทความ
4. ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความต้องระบุผลงานวิจัยที่สำคัญ ๆ และสอดคล้องกับบทความที่กำลังประเมิน แต่ผู้นิพนธ์ไม่ได้อ้างถึงเข้าไปในการประเมินบทความด้วย นอกจากนี้หากมีส่วนใดของบทความที่มีความเหมือน หรือซ้ำซ้อนกับผลงานอื่น ๆ ผู้กลั่นกรองและประเมินบทความต้องแจ้งให้บรรณาธิการทราบด้วย



แบบฟอร์มขอส่งบทความเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ข้าพเจ้า

ตำแหน่ง / สังกัด

ตำแหน่งทางวิชาการ ☐ ผศ. ☐ รศ. ☐ ศ.

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย (Research Article) ☐ บทความปริทัศน์ (Review Article)

ชื่อเรื่องภาษาไทย.....

คำสำคัญ

ชื่อเรื่องภาษาอังกฤษ.....

Keywords (ภาษาอังกฤษ).....

ชื่อผู้เขียน (ภาษาไทย).....

ชื่อผู้เขียน (ภาษาอังกฤษ).....

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้..... หมู่ที่..... ซอย..... ถนน.....

ตำบล..... อำเภอ..... จังหวัด..... รหัสไปรษณีย์.....

โทรศัพท์..... โทรศัพท์มือถือ..... โทรสาร.....

E-mail.....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้

1. เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุในบทความ (ถ้ามี) จริง
2. ไม่เคยถูกนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารอื่นใดมาก่อน และไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นใด

ลงนาม.....

(.....)



มิตรไมตรีภาควิชาการ
ร่วมสืบสานเครือข่ายญาติวิถี
เพื่อก้าวหน้ามั่นคงคุณความดี
พัฒนาทุกชีวิตให้ยั่งยืน

CRMA Journal 2020

CRMA Journal 2020