



วารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

Chulachomklao Royal Military Academy Journal

ปีที่ 23 (มกราคม-ธันวาคม 2568)
Vol. 23 (January - December 2025)

CRMA

ISSN 3057-191X (PRINT)
ISSN 3057-1944 (ONLINE)

วารสารวิชาการ
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

วารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

ปีที่ 23 ฉบับที่ 1 (มกราคม – ธันวาคม 2568)

Chulachomklao Royal Military Academy Journal Vol.23 No.1 (January 3 December 2025)

<https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/crma-journal>

ISSN 3057-1944 (Online)

ISSN 3057-191x (Print)

ที่ปรึกษากิตติมศักดิ์

พลเอกหญิง ศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า

กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี

ที่ปรึกษา

พลโท อุดม แก้วมหา

ผู้บัญชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

พลตรี เอกอนันต์ เหมะบุตร

รองผู้บัญชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

พลตรี เทพพิทักษ์ นิमित

รองผู้บัญชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

พลตรี ทองคำ ชุมพล

ผู้อำนวยการส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

พันเอก พงษ์สันต์ จันทร์สอน

รองผู้อำนวยการส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง

รองผู้อำนวยการส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

พันเอกหญิง ศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา

ประธานสภาคณาจารย์ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

บรรณาธิการ

พลตรี รองศาสตราจารย์ ดร.ผเดิม หนังสือ

จัดทำโดย

สภาคณาจารย์ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

ปรัชญาของโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

“เป็นสถาบันอุดมศึกษาที่สร้างผู้นำให้มีความรู้ มีวินัย มีคุณธรรม จริยธรรม และอุดมการณ์ความรักชาติ”

กองบรรณาธิการ

บรรณาธิการภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.จรงค์ ผลประเสริฐ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมชนม์ สติระพจน์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พลอากาศโท ศาสตราจารย์ ดร.นพพล หาญกล้า	มูลนิธิพระดาบส
พลตรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวน จันทวาลย์	สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
นาวาอากาศเอก ศาสตราจารย์ ดร.ประสาทพร วงษ์คำซ่าง	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
รองศาสตราจารย์ ดร.เวทิน ปิยรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิตต์อลิน พันธุ์อภัย	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศรีมรืน	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พรรณ ปรี่องาม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธพงศ์ เพียรโรจน์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.วรภรณ์ กลิ่นบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐดนัย พรธนะเจริญวงศ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์พัทยา
นาวาเอกหญิง รองศาสตราจารย์ศิริรัตน์ บุญโสมมา	โรงเรียนนายเรือ
นาวาอากาศเอก รองศาสตราจารย์ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
นาวาอากาศตรี รองศาสตราจารย์ปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพจน์ เวศพันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิศากร สมสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายสุนีย์ จำรัส	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรทิพย์ แก่งอินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไศมิดา สังข์สุนทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณิชาณัช เกศมุกดา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.จุฬารัตน์ เอี่ยมสมัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

บรรณาธิการภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

พันเอก ศาสตราจารย์ ดร.นราเทพ พฤกษ์ศิริชัย	พันเอก รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา อภิวัฒน์ตระกูล
พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชญ พวงสุนทรน	พันเอกหญิง รองศาสตราจารย์เยาวภา ทองอร่าม
พันเอก รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติภพ พรหมดี	พันเอกหญิง รองศาสตราจารย์ ดร.จินตนา แสนวงศ์
พันเอกหญิง ดร.ปวีณา วัธบัว	พันโท ดร.ภัทรพล คงสุข

คณะกรรมการประจำกองบรรณาธิการ

พันเอก อรรถพล จินดาทรัพย์

พันเอกหญิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤตยาภรณ์ เจริญผล

พันเอกหญิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐมนต์ สมราชสีจินดา

พันตรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญญา เกียรติภัชชัย

พันตรีหญิง ชญานันท์ จิตต์จำนงค์

ร้อยเอก ธนภูมิ มะวิญธร

พันเอกหญิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัดชา เพิ่มพิพัฒน์

พันเอกหญิง ดร.ปวีณา วัดบัว

พันโทหญิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์อำภา ช่างเกวียน

พันตรีหญิง กังสดาล อินทกุล

ร้อยเอกหญิง ธัญญลักษณ์ เอื้อสกุล

ร้อยเอก ชาญวิทย์ กตานิหาร

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่มีองค์ความรู้ในศาสตร์ทางวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี ของอาจารย์ นักวิชาการ นักวิจัย นิสิต และนักศึกษา ทั้งภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า กองทัพบก กองทัพไทย มหาวิทยาลัย และภาคเอกชน
2. เพื่อส่งเสริมและพัฒนางานวิจัยทางวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการทหาร การรักษาความปลอดภัย และความมั่นคงของประเทศ

ขอบเขตการตีพิมพ์

บทความวิจัยและบทความวิชาการในศาสตร์ทางวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

กำหนดการเผยแพร่ ปีละ 1 ฉบับ ภายในเดือนธันวาคม

ค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์ ไม่มีค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์

ติดต่อวารสาร

✉ บรรณาธิการวารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
เลขที่ 99 ถนนเขาชะโงก ตำบลพรหมณี อำเภอเมืองนครนายก จังหวัดนครนายก 26000

☎ โทรศัพท์: 037-393010-4 ต่อ 62305

✉ E-mail: crmajournal@crma.ac.th

โรงพิมพ์

✉ บริษัท โรงพิมพ์วชิรินทร์พี.พี จำกัด
เลขที่ 177 หมู่ 1 ตำบลปลายบาง อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี 11130

☎ โทรศัพท์: 02-4976183

✉ E-mail: www.wacharinprint.com

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า เป็นวารสารทางวิชาการที่มีการตีพิมพ์อย่างต่อเนื่องทุกปี ปีละ 1 ฉบับ ภายในเดือนธันวาคมของทุกปี ปีนี้เป็นปีที่ 23 พ.ศ. 2568 วัตถุประสงค์ของวารสารเพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่มีองค์ความรู้ในศาสตร์ทางวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี ของอาจารย์ นักวิชาการ นักวิจัย นิสิต และนักศึกษา ทั้งภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า กองทัพบก กองทัพไทย มหาวิทยาลัย และภาคเอกชน รวมทั้งส่งเสริมและพัฒนางานวิจัยทางวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการทหาร การรักษาความปลอดภัย และความมั่นคงของประเทศ โดยขอบเขตการตีพิมพ์ในการรับพิจารณาบทความวิจัยและบทความวิชาการในศาสตร์ทางวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ซึ่งวารสารได้รับการคัดเลือกเข้าสู่ฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai-Journal Citation Index Centre-TCI) ในการประเมินคุณภาพรอบที่ 5 โดยได้รับการจัดอันดับให้อยู่ในกลุ่มที่ 2 และได้รับการรับรองคุณภาพจนถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2572

ในปีนี้มีบทความของวารสารมีจำนวน 9 บทความ แบ่งเป็นบทความวิจัย 8 บทความ และบทความวิชาการ 1 บทความ เนื้อหาการวิจัยของบทความในปีนี้มีบทความที่เกี่ยวข้องการใช้ศาสตร์ทางวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้งานทางทหาร อาทิ แนวทางการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์สำหรับการประยุกต์ใช้ทางการทหาร การพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหุ่นยนต์ในกองทัพไทย : ความท้าทายและโอกาส การศึกษาและพัฒนาวิธีการและอุปกรณ์ในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มจากปฏิกิริยาเคมีเพื่อใช้ในการฝึกภาคสนาม นอกจากนี้ยังมีบทความที่มีองค์ความรู้ที่แสดงถึงความก้าวหน้าในการสร้างองค์ความรู้ใหม่ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์มาช่วยแก้ปัญหา อาทิ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพื้นที่จัดเก็บในแพลตฟอร์มบิ๊กดาต้า การพัฒนาอาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าในจักรวาลเสมือนเพื่อเป็นสื่อการเรียนวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน เป็นต้น รวมทั้งมีบทความที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการรักษาความปลอดภัย และความมั่นคงของประเทศ อาทิ การวิเคราะห์การไหลเวียนของอากาศและฝุ่นละอองขนาดเล็กผ่านแผงเกล็ดบังแดดภายในช่องว่างอากาศด้วยแบบจำลอง CFD การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนและแนวทางการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่: กรณีศึกษาเมืองพัทยา และคำนวณเพื่อการทำนายการใช้งานของแผ่นวัสดุคอมโพสิตด้วยการประยุกต์หลายรูปแบบ เป็นต้น

กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่า บทความเหล่านี้จะเป็นผลงานทางวิชาการที่มีประโยชน์ในศาสตร์ทางวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี ต่อนักวิชาการและผู้สนใจ อันจะนำไปสู่การต่อยอดทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับการทหาร การรักษาความปลอดภัย และความมั่นคงของประเทศ ต่อไป

พลตรี



(รองศาสตราจารย์ ดร.ผเดิม หนึ่งสือ)

บรรณาธิการ

สารบัญ

บทความวิจัย

หน้า

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพื้นที่จัดเก็บในแพลตฟอร์มบิ๊กดาต้า

1

เกียรติศักดิ์ อุทัยศรี

วรภัทร ไพรีเกรง

ทศพล พันธุ์กำแหง

วีรพงศ์ ตันเจริญ

ณรงค์ ภูมิสุข

การวิเคราะห์การไหลเวียนของอากาศและฝุ่นละอองขนาดเล็กผ่านแผงเกล็ดบังแดด
ภายในช่องว่างอากาศด้วยแบบจำลอง CFD

12

วินัย หมั่นคดิธรรม

รัฐศักดิ์ พรหมมาศ

การทำนายระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบ
ยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ ด้วยการวิเคราะห์แบบถดถอย

25

กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข

ปิยะพันธ์ ธรรมปัญญา

พงษ์นุกร ไทยะ

การพัฒนาอาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าในจักรวาลนฤมิต
เพื่อเป็นสื่อการเรียนรู้วิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน

35

ปรเมศวร์ กุมารบุญ

สิรภาพ แสงทองคำ

ผเดิม หนังสือ

อาศิส บุญยะประภัศร

ลัญฉกร วุฒิสิตกุลกิจ

การเสียรูปของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่น
และอีกสองด้านปล่อยอิสระ

51

กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข

ปิยะพันธ์ ธรรมปัญญา

พงษ์นุกร ไทยะ

การศึกษาและพัฒนาวิธีการและอุปกรณ์ในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มจากปฏิกิริยาเคมี
เพื่อใช้ในการฝึกภาคสนาม

62

ภัทริยา ตันทิกุล

สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)

หน้า

การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนและแนวทางการนำน้ำเสียที่ผ่าน

77

การบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่: กรณีศึกษาเมืองพัทยา

วรพต พงษ์पालี

อภิเสฏฐ์กร สุวรรณสะอาด

มนิรัตน์ เข้มขาว

แนวทางการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์สำหรับการประยุกต์ใช้ทางการทหาร:

87

กรณีศึกษาบนระบบซอฟต์แวร์สำหรับการถอดรหัสและแสดงผลข้อมูลเรดาร์

สุทธิชัย รอดแก้ว

ภูจนา ปาติยะวรรณ

กิงกาญจน์ สุขคณาภิบาล

วรวัฒน์ เขียวสวัสดิ์

บทความวิชาการ

การพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหุ่นยนต์ในกองทัพไทย: ความท้าทายและโอกาส

104

ธัญวารีย์ อมรภูวดล

อรณิชา คงวุฒิ

พัฒนศรัณย์ เลหาไพบูลย์

วุฒิรงค์ คงวุฒิ

วิสัยทัศน์ของโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

“แหล่งกำเนิดผู้นำที่สร้างทหารอาชีพ มีคุณธรรม ที่ประเทศชาติเชื่อมั่นและนานาชาติยอมรับ”

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพื้นที่จัดเก็บในแพลตฟอร์มบิ๊กดาต้า Comparison of Storages Performance in Big Data Platform

เกียรติศักดิ์ อุทัยศรี^{1*}, วรภัทร ไพรีเกรง¹, ทศพล พันธุ์กำแพง²,
วีรพงศ์ ตันเจริญ², ณรงค์ ภูมิสุข²

Kiattisak Utaisri^{1*}, Worapat Paireekreng¹, Tosapon Pankumhang²,
Weerapong Tuncharoen², Narong Phoomsuk²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ วิทยาลัยนวัตกรรมด้านเทคโนโลยี และวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ กรุงเทพฯ 10210 ประเทศไทย

¹Information Technology, College of Innovative Technology and Engineering,
Dhurakij Pundit University, Bangkok 10210, Thailand

²กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, นครนายก, 26001

²Mathematics and Computer Department, Academic Division,
Chulachomklao Royal Military Academy, Nakhon Nayok, 26001, Thailand

*Corresponding Author. E-mail: worapat.png@dpu.ac.th

(Received: May 31, 2024, Revised: July 8, 2024, Accepted: July 25, 2024)

บทคัดย่อ: ระบบสารสนเทศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยข้อมูลที่เกิดจากแหล่งข้อมูลต้นทางจะเก็บแบบกระจายในระบบภายนอก ก่อนจะถูกรวบรวมมาจัดเก็บในแพลตฟอร์มบิ๊กดาต้า ซึ่งถูกออกแบบมาให้สามารถรองรับการจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ได้ทุกประเภทอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในมิติต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์ข้อมูล การให้บริการและแลกเปลี่ยนข้อมูล และการทำรายงาน เพื่อให้ผู้บริหารสามารถนำข้อมูลและรายงานเหล่านี้ ไปใช้ในการวิเคราะห์และวางแผนการขับเคลื่อนองค์กรด้วยข้อมูลได้อย่างแท้จริง

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเชื่อมโยงเข้ามาจัดเก็บในแพลตฟอร์มบิ๊กดาตานั้น มาจากระบบภายนอกที่มีรูปแบบการจัดเก็บที่หลากหลาย ทำให้ระบบมีรูปแบบข้อมูลบนหน่วยจัดเก็บข้อมูลที่แตกต่างกัน เช่น โครงสร้างแบบเรียงตามแถวเป็นหลัก หรือแบบเรียงตามคอลัมน์เป็นหลัก การจัดเก็บข้อมูลเป็นไฟล์แบบไบนารี หรือเป็นไฟล์แบบข้อความ รวมทั้งรองรับการบีบอัดข้อมูล เป็นต้น เนื่องจากแต่ละรูปแบบต่างก็มีทั้งข้อดีและข้อเสียที่ต่างกันทำให้ไม่มีรูปแบบใดที่ดีที่สุด คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปแบบไฟล์ข้อมูลจัดเก็บบนแพลตฟอร์มบิ๊กดาต้า เพื่อหารูปแบบไฟล์ข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการทำงานในกรณีต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยผลการทดลองชี้ให้เห็นว่ารูปแบบไฟล์ข้อมูลแบบเรียงตามแถวเหมาะกับการนำเข้าและจัดเก็บข้อมูลที่นำมาจากต้นทางมากกว่า ส่วนรูปแบบไฟล์ข้อมูลแบบเรียงตามคอลัมน์จะเหมาะกับการเรียกดูข้อมูลหรือนำข้อมูลไปวิเคราะห์ด้วยชุดคำสั่งที่ซับซ้อนมากกว่า

คำสำคัญ: รูปแบบไฟล์ ข้อมูลขนาดใหญ่ แพลตฟอร์มบิ๊กดาต้า

Abstract: From the continuous application of information technology in various fields today. This causes the amount of data in information systems to increase rapidly. The data that comes from the data source

is stored sparsely in external systems. Before being imported and linked to store in the Big Data Platform, which is designed to support the storage and processing of large data. Get all types efficiently before being put to use in various dimensions such as data analysis, data service and sharing, and reporting. So that executives can use these data and reports to truly analyze and plan to drive the organization with data.

However, the imported data is stored in the big data platform coming from different external systems resulting in a variety of data storage formats. Each format has a different structure on the storage, such as a row-based or column-based data structure, storing as a binary or text file, and supporting data compression. Because each format has both advantages and disadvantages, we therefore studied and compared the efficiency of data file formats stored on the big data platform in order to find the most suitable data file format for working in various cases as efficiently as possible. The results of the experiment indicated that column-based data structures are better suited for importing and storing data taken from external sources, while row-based data structures are suitable for querying or analyzing the data with more complex commands.

Keywords: File Format, Big Data, Big Data Platforms

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีสารสนเทศมีสำคัญในการดำเนินการในด้านต่าง ๆ ทำให้เกิดความสะดวกรวดเร็วในการทำกิจกรรมและการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น นอกจากนี้เรายังสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีเหล่านี้ได้ง่ายกว่าเดิม ด้วยการให้บริการผ่านทางแพลตฟอร์มต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการติดต่อสื่อสาร การเดินทาง ร้านอาหาร การเกษตร การศึกษา การท่องเที่ยว การกีฬา แม้กระทั่งการแพทย์ เช่น ระบบอัจฉริยะทางการแพทย์ ได้นำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการรักษาผู้ป่วยแบบครบวงจร ตั้งแต่การติดตั้งอุปกรณ์แบบสวมใส่ (Wearable Device) เพื่อใช้ตรวจจับและติดตามอาการของผู้ป่วย การนำระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) หรือ AI มาทำโมเดลวิเคราะห์ข้อมูลและสามารถให้คำแนะนำในการรักษาขั้นต้น ไปจนถึงการรักษาที่ซับซ้อนโดยไม่ต้องเดินทางไปโรงพยาบาลได้

จากการนำเทคโนโลยีสารสนเทศ มาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ที่มีมาอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดข้อมูลที่หลากหลายจำนวนมาก ซึ่งถูกจัดเก็บในรูปแบบที่แตกต่างกันไปตามแหล่งข้อมูลต้นทาง (Data Source) การนำข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะต้องดำเนินการเชื่อมโยงบูรณาการข้อมูล (Data Integration) จากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ มาจัดเก็บไว้ที่ทะเลสาบข้อมูล (Data

Lake) ซึ่งเป็นพื้นที่รวบรวมข้อมูลดิบ (Raw Data) ของแพลตฟอร์มบิ๊กดาต้า (Big Data Platforms) ซึ่งถูกออกแบบมาให้สามารถรองรับการจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ได้ทุกประเภทอย่างมีประสิทธิภาพก่อนจะนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ หรือใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ ต่อไป

อย่างไรก็ตามรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลบนแพลตฟอร์มบิ๊กดาตานั้นมีการพัฒนาและปรับปรุงมาอย่างต่อเนื่อง จนในปัจจุบันมีรูปแบบให้เลือกใช้ที่หลากหลาย เช่น ไฟล์แบบข้อความ และไฟล์แบบไบนารี ไฟล์ที่มีโครงสร้างการจัดเก็บแบบเรียงตามแถว และไฟล์แบบเรียงตามคอลัมน์ เป็นต้น

เพื่อให้การเลือกรูปแบบในการจัดเก็บข้อมูลบนแพลตฟอร์มให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากที่สุด คณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษาวิจัย “การวิจัยศึกษาการเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของพื้นที่จัดเก็บในแพลตฟอร์มบิ๊กดาต้า” [1] [2]

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการนำเข้าและเรียกใช้ไฟล์ในรูปแบบต่าง ๆ ในงานแพลตฟอร์มบิ๊กดาต้า

2.2 เพื่อวิเคราะห์ไฟล์ในรูปแบบต่าง ๆ ว่าไฟล์ประเภทใดมีความเหมาะสมในการประมวลผล และวิเคราะห์ ในแพลตฟอร์มบิ๊กดาต้า

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รูปแบบไฟล์ในแพลตฟอร์มบิกดาต้า

การวิจัยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพื้นที่จัดเก็บในแพลตฟอร์มบิกดาต้า (Big Data Platforms) จะใช้ชุดข้อมูลสำหรับการประมวลผลด้วยคำสั่งภาษา Hadoop Query Language (HQL) ซึ่งเป็นคำสั่งที่ใช้ในการสืบค้นและเรียกดูข้อมูลที่จัดเก็บอยู่ในแพลตฟอร์มบิกดาต้า ซึ่งชุดข้อมูลเหล่านี้จัดเก็บไว้หลายรูปแบบและมีขนาดต่างกัน เพื่อให้ใช้ในการศึกษาวิจัยสำหรับรูปแบบของชุดข้อมูลที่เลือกมาใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ เลือกมาจากชุดข้อมูลที่มีนิยมใช้ในปัจจุบัน ประกอบด้วย ชุดข้อมูลจำนวน 4 ประเภท ได้แก่ รูปแบบไฟล์ข้อความ (Text), รูปแบบไฟล์ AVRO, รูปแบบไฟล์ Parquet, และรูปแบบไฟล์ ORC

รูปแบบไฟล์ข้อความ (Text)

ไฟล์ข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบไฟล์ข้อความ (Text File Format) เป็นรูปแบบพื้นฐานที่มีในทุกระบบ ซึ่งยังเป็นที่ยอมรับใช้ในแพลตฟอร์มบิกดาต้าในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นไฟล์ข้อมูลที่เราสามารถเปิดอ่านเนื้อหาในไฟล์ได้โดยตรง โดยอาจเป็นไฟล์แบบไม่มีโครงสร้าง (Unstructured File) เช่น ไฟล์ Log หรือไฟล์ข้อความทั่วไป แต่ไฟล์ข้อความที่นิยมจัดเก็บมากที่สุดในแพลตฟอร์มบิกดาต้าจะเป็นไฟล์แบบกึ่งโครงสร้าง (Semi-Structured File) เพราะมีประโยชน์ในการใช้งานหลายอย่าง และที่ใช้มากที่สุดในปัจจุบัน ได้แก่ ไฟล์แบบ CSV และไฟล์แบบ JSON

Shafranovich ได้กำหนดไฟล์แบบ CSV (Comma-Separated Values) ให้เป็นมาตรฐานตาม RFC 4180 [3] เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการแลกเปลี่ยนข้อมูลและแปลงข้อมูลระหว่างโปรแกรม Spreadsheet เช่น MS Excel หรือ Google Sheet เป็นต้น โดยไฟล์ข้อมูลแบบ CSV จะประกอบด้วย ส่วนหัว (Header) ซึ่งอาจจะมีหรือไม่มีก็ได้ แล้วตามด้วยส่วนระเบียนข้อมูล (Record) ซึ่งเป็นแถวของข้อมูล (Row) ในตารางของ Spreadsheet โดยแต่ละแถวจะถูกแบ่งเขตข้อมูล (Field) หรือคอลัมน์ (Column) ในตาราง ด้วยเครื่องหมายจุลภาค (,) และ

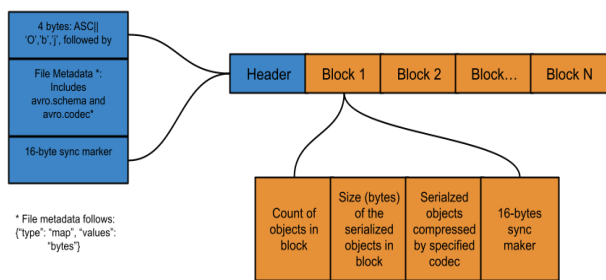
จะปิดท้ายข้อมูลในแถวนั้นด้วยอักขระ ขึ้นบรรทัดใหม่ (CRLF) ข้อมูลในแต่ละคอลัมน์อาจมีเครื่องหมายอัญประกาศ (") กันหน้าและกันหลังส่วนข้อมูลของคอลัมน์นั้น โดยเฉพาะกรณีที่ข้อมูลในคอลัมน์มีช่องว่างหรือ Space คั่นระหว่างตัวอักษร เมื่อมีบล็อคของอัญประกาศจึงทำให้เกิดความชัดเจนในการระบุข้อมูลในคอลัมน์ ตัวอย่าง โครงสร้าง ของไฟล์แบบ CSV แสดงในภาพที่ 3.1

	number_id	date	contact_date	length	row_id	colour_id	BM	BMI
1	12345	1-1-2023	1-8-2023	300000	0001	0001	25.5	
2	12346	1-1-2023	1-8-2023	400000	0001	0001	25.5	
3	12347	1-1-2023	1-8-2023	350000	0001	0001	25.5	
4	12348	1-1-2023	1-8-2023	306000	0001	0001	25.5	
5	12349	1-1-2023	1-8-2023	320000	0001	0001	25.5	
6	12350	1-1-2023	1-8-2023	440000	0001	0001	25.5	
7	12351	1-1-2023	1-8-2023	390000	0001	0001	25.5	
8	12352	1-1-2023	1-8-2023	415000	0001	0001	25.5	
9	12353	1-1-2023	1-8-2023	305500	0001	0001	25.5	
10	12354	1-1-2023	1-8-2023	405000	0001	0001	25.5	
11	12355	1-1-2023	1-8-2023	300000	0001	0001	25.5	
12	12356	1-1-2023	1-8-2023	400000	0001	0001	25.5	
13	12357	1-1-2023	1-8-2023	367000	0001	0001	25.5	
14	12358	1-1-2023	1-8-2023	356000	0001	0001	25.5	
15	12359	1-1-2023	1-8-2023	350000	0001	0001	25.5	
16	12360	1-1-2023	1-8-2023	380000	0001	0001	25.5	
17	12361	1-1-2023	1-8-2023	332000	0001	0001	25.5	
18	12362	1-1-2023	1-8-2023	460000	0001	0001	25.5	
19	12363	1-1-2023	1-8-2023	413000	0001	0001	25.5	
20								

ภาพที่ 3.1 โครงสร้างไฟล์ข้อมูลแบบ CSV

รูปแบบไฟล์ AVRO

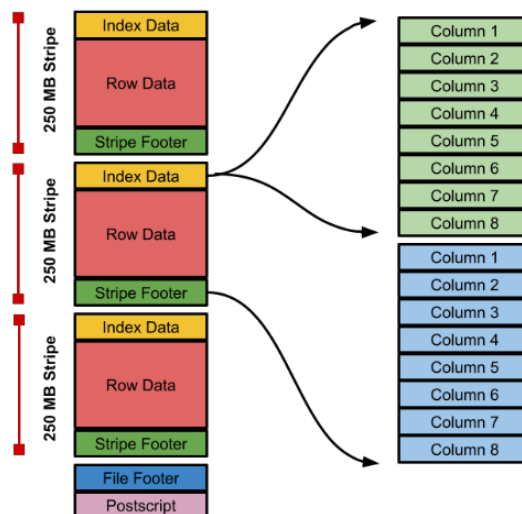
Vohra ได้คิดรูปแบบไฟล์ใหม่ โดยแยกส่วนการจัดเก็บเนื้อหาข้อมูล (Content) และส่วนคำอธิบายข้อมูล [4] (Schema) เรียกว่า AVRO โดยแยกการจัดเก็บข้อมูลเป็น 2 ส่วนอย่างชัดเจน โดยจัดเก็บข้อมูลอยู่ในรูปแบบไบนารี ซึ่งประหยัดเนื้อที่มากกว่าไฟล์แบบข้อความ และมีโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลแบบเรียงตามแถวเป็นหลัก (Row-based Data Structure) โดยใช้การเรียงลำดับข้อมูลไปที่ละบล็อกตามลำดับ [5] AVRO เหมาะสำหรับการจัดเก็บข้อมูลที่ซับซ้อน (Nested Data) โดยใช้ระบบการจัดลำดับข้อมูลตามโครงสร้างข้อมูล ซึ่งส่วนของคำอธิบายข้อมูลใช้ไฟล์ข้อมูลแบบ JSON ในการจัดเก็บทำให้สามารถเข้าใจความหมายของข้อมูลได้ง่ายและยังสนับสนุนการแปลงชนิดข้อมูลระหว่างระบบฐานข้อมูลต้นทางกับระบบฐานข้อมูลปลายทาง ในการนำเข้าข้อมูล (Data Ingestion) มาจัดเก็บในแพลตฟอร์มบิกดาต้าได้ง่าย ตัวอย่างโครงสร้างไฟล์ข้อมูลแบบ AVRO แสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างไฟล์ข้อมูลแบบ AVRO

รูปแบบไฟล์ ORC

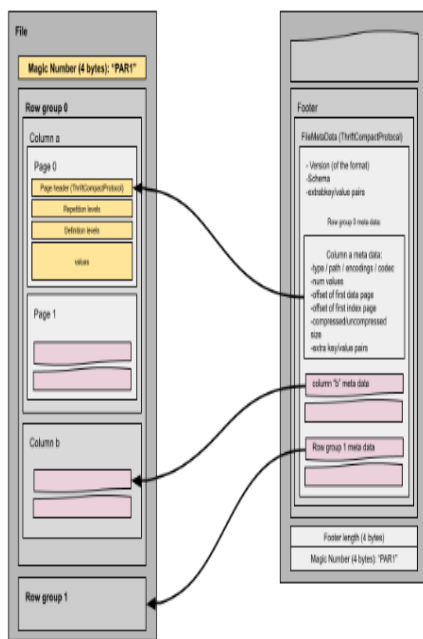
Optimized Row Columnar (ORC) เป็นรูปแบบไฟล์ ที่มีโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลแบบเรียงตามคอลัมน์เป็นหลัก (Column-based Data Structure) เพื่อเน้นประสิทธิภาพในการประมวลผลคำสั่งเรียกดูข้อมูลแบบ SQL และสามารถรองรับการบีบอัดข้อมูลให้การจัดเก็บข้อมูลมีขนาดเล็กลงได้ [6] ไฟล์ ORC ได้พัฒนาต่อจาก รูปแบบไฟล์ Record Columnar File (RCFile) ซึ่งมีโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลแบบเรียงตามคอลัมน์เช่นกัน โดยไฟล์ RCFile ถูกออกแบบมารองรับการประมวลผลแบบขนานด้วย MapReduce เป็นหลัก โดยการแบ่งข้อมูลออกเป็น ส่วน ๆ เรียกว่า บล็อก (Block) กระจายไปจัดเก็บในหน่วยจัดเก็บข้อมูล (Storage) บนเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายหลายเครื่อง ทำให้สามารถอ่านข้อมูลมาประมวลผลคำสั่งแบบ SQL พร้อม ๆ กันได้ [7] นอกจากส่วนของสไตรฟ์แล้วไฟล์แบบ ORC ยังมีส่วนท้ายของไฟล์ (File Footer) ซึ่งมีคำอธิบายข้อมูล (Metadata) อยู่ภายใน ซึ่งสามารถปรับแก้โครงสร้างข้อมูลที่จัดเก็บไว้ภายหลังโดยไม่กระทบกับข้อมูลที่จัดเก็บไว้เดิมได้ ทำให้ไฟล์ ORC เหมาะกับการเชื่อมโยงข้อมูลที่อาจเปลี่ยนแปลงโครงสร้างข้อมูลได้ภายหลัง และส่วนสุดท้ายเรียกว่า โพสสคริปต์ (Postscript) เป็นส่วนที่ใช้ระบุขนาดของส่วนท้ายข้อมูล ขนาดของคำอธิบายข้อมูล วิธีการบีบอัดข้อมูล ที่สำคัญคือการเชื่อมโยงข้อมูลแต่ละสไตรฟ์และช่วยให้การรวมข้อมูลทั้งหมดเข้าด้วยกันทำได้ง่าย โครงสร้างไฟล์ ORC แสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 โครงสร้างไฟล์ข้อมูลแบบ ORC

รูปแบบไฟล์ปาร์เก้ (Parquet)

รูปแบบไฟล์ปาร์เก้ (Parquet) ได้ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นโดย Cloudera ร่วมกับ Twitter ในปี ค.ศ. 2013 ซึ่งเป็นรูปแบบการจัดเก็บไฟล์บน HDFS ของ Apache Hadoop โดยมีโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลคล้ายกับแบบเรียงตามคอลัมน์เป็นหลัก (Column-Based Data Structure) แต่เป็นโครงสร้างข้อมูลแบบผสม (Hybrid Data Structure) โดยมีการเรียงข้อมูลตามคอลัมน์ติดกัน แต่มีการแยกส่วนเป็นบล็อก ซึ่งแต่ละบล็อกจะเป็นกลุ่มของแถวข้อมูล (Row Group) มีการจัดเก็บข้อมูลเป็นแบบไบนารี ซึ่งประหยัดเนื้อที่ในการจัดเก็บข้อมูลมากกว่าการจัดเก็บแบบข้อความ และสนับสนุนการบีบอัดข้อมูลได้หลายรูปแบบ เช่น Snappy, GZip และ LZ0 เป็นต้น ทำให้ไฟล์ปาร์เก้มีประสิทธิภาพทั้งการจัดเก็บข้อมูลและการเรียกค้นข้อมูล [8] โครงสร้างไฟล์ปาร์เก้ แสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 โครงสร้างไฟล์ข้อมูลแบบปาร์เก้ (Parquet)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ivanov และ Pergolesi [9] ได้ทำการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบผลกระทบจากรูปแบบไฟล์ ที่ใช้การจัดเก็บข้อมูลแบบเรียงตามคอลัมน์เป็นหลัก (Column-Based Data Structure) ระหว่างไฟล์ ORC และไฟล์ปาร์เก้ (Parquet) โดยการทดสอบประสิทธิภาพด้วยการใช้คำสั่ง SQL เรียกดูข้อมูลในระบบฐานข้อมูลขนาดใหญ่ที่จัดเก็บบนแพลตฟอร์มที่พัฒนาจาก Apache Hadoop โดยคำสั่ง SQL ที่ใช้มีการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในบริการ 2 ชนิด ได้แก่ Apache Hive [10] และ Apache Spark [11] ที่อยู่ใน Apache Hadoop โดย Hive เป็นบริการเรียกดูข้อมูลในระบบฐานข้อมูล ที่เน้นการจัดเก็บและประมวลผลแบบขนานบนหน่วยจัดเก็บข้อมูล (Storage) ที่มีขนาดใหญ่กว่าหน่วยความจำ (Memory) มาก โดยจะแปลงคำสั่ง SQL เป็น Map Reduce Job เพื่อแบ่งการประมวลผลเป็นส่วนย่อยเรียกว่าฟังก์ชัน Map และรวมผลลัพธ์ที่ประมวลผลเสร็จแล้วเรียกว่าฟังก์ชัน Reduce สำหรับบริการอีกชนิด เรียกว่า Spark ซึ่งเน้นการใช้หน่วยความจำมาประมวลผลข้อมูลเป็นหลัก ทำให้มีประสิทธิภาพสูงกว่า แต่ก็มีข้อจำกัดที่หน่วยความจำจะมีขนาดไม่มากเท่ากับหน่วยจัดเก็บข้อมูล จึงเหมาะกับการประมวลผลข้อมูล

ไม่ใหญ่มากจนเกินไป โดยผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าไฟล์ ORC จะมีประสิทธิภาพโดยรวมสูงกว่าไฟล์ปาร์เก้ เมื่อใช้การเรียกดูข้อมูลจาก Hive ส่วนไฟล์ปาร์เก้จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าไฟล์ ORC เมื่อใช้การเรียกดูข้อมูลจาก Spark

4. วิธีดำเนินการศึกษา

ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปแบบไฟล์ข้อมูล ทั้งหมด 4 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบไฟล์ Text (CSV.) รูปแบบไฟล์ AVRO รูปแบบไฟล์ ORC และรูปแบบไฟล์ Parquet ซึ่งไฟล์แต่ละรูปแบบที่นำมาทดลองได้มีการเตรียมชุดข้อมูลที่มีขนาดต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ชุดข้อมูลขนาดเล็ก (Small Dataset) ที่มีข้อมูลเกิน 100,000 แถว แต่ไม่เกิน 500,000 แถว ชุดข้อมูลขนาดกลาง (Medium Dataset) ที่มีข้อมูลมากกว่า 600,000 แถว แต่ไม่เกิน 1,000,000 แถว และชุดข้อมูลขนาดใหญ่ (Large Dataset) ที่มีข้อมูลมากกว่า 1,000,000 แถว (ชุดข้อมูลที่นำมาทดลองได้มาจาก เว็บไซต์ <https://www.kaggle.com/datasets/shivamb/netflix-shows>) [12] โดยนำชุดข้อมูลที่เตรียมไว้แต่ละประเภทมาประมวลผลกับระบบฐานข้อมูลของ Apache Hive ซึ่งเป็นบริการที่รองรับการสร้าง (Create) ตารางข้อมูล การสืบค้นข้อมูล (Query) การแก้ไขข้อมูล (Update) และการลบข้อมูล (Delete) ซึ่งจัดเก็บอยู่ในแพลตฟอร์มบิกดาต้า (Big Data Platform)

4.1 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในงานวิจัย

การติดตั้งซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการพัฒนาแพลตฟอร์มบิกดาต้า สำหรับเป็นเครื่องมือในการวิจัย ซึ่งเป็นบริการพื้นฐานของฮาร์ดดิสก์ (Hadoop foundation services) ทั้งนี้ซอฟต์แวร์ Cloudera ที่นำมาใช้นี้ เป็นซอฟต์แวร์ที่พัฒนามาจากฮาร์ดดิสก์ และได้รับการยอมรับในระดับโลกในการใช้พัฒนาเป็นแพลตฟอร์มบิกดาต้า ซึ่งมีทั้งแบบที่มีลิขสิทธิ์และไม่มีลิขสิทธิ์ให้เลือกใช้ ดังนั้น ในการทดลองนี้ คณะผู้วิจัยจึงเลือกใช้ซอฟต์แวร์ Cloudera แบบ Open source ที่ไม่มีลิขสิทธิ์ เพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้เท่านั้น รายละเอียดการติดตั้งซอฟต์แวร์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

นี้ คณะผู้วิจัยใช้ Structured Query Language (SQL) ซึ่งนำมาใช้งานบน Hadoop User Experience (Hue) ซึ่งเป็นเครื่องมือตัวหนึ่งที่จะช่วยในการนำเข้าข้อมูลของ Cloudera Data Platform (CDP) และใช้เป็นเครื่องมือในการเตรียมข้อมูลในการทดลองและหาผลการทดลองในงานวิจัยนี้ (Query) รายละเอียดการติดตั้งซอฟต์แวร์บนเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย แสดงในภาพที่ 4.1

ลำดับ	เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย	ระบบปฏิบัติการ	บริการพื้นฐาน
1	Master Node	CentOS 7.9	- Cloudera Manager - HDFS NameNode - Hue - Hive Metastore - Hive Server 2 - YARN Resource Manager
2	Data Node 1	CentOS 7.9	- HDFS DataNode - YARN Node Manager - ZooKeeper
3	Data Node 2	CentOS 7.9	- HDFS DataNode - YARN Node Manager - ZooKeeper
4	Data Node 3	CentOS 7.9	- HDFS DataNode - YARN Node Manager - ZooKeeper

ภาพที่ 4.1 ซอฟต์แวร์บนเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย

4.2 ผลการทดลอง

4.2.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพรูปแบบไฟล์ในการสร้างตารางข้อมูลใหม่ การทดลองที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ในการสร้างตารางข้อมูลใหม่ (Create a New Table) ของไฟล์ทั้ง 4 รูปแบบ ซึ่งในแต่ละแบบมีขนาดต่างกัน 3 ระดับ เพื่อหาว่าไฟล์รูปแบบใดเหมาะสมกับการสร้างตารางข้อมูลใหม่มากที่สุด (ใช้เวลาในการสร้างตารางใหม่น้อยที่สุด) โดยการประมวลผลนี้ จะใช้ Apache Hive ในการสร้างตารางข้อมูลขึ้นมาใหม่ด้วยภาษา SQL ได้แก่

```
CREATE TABLE <table_name> (
    <type1> <column1>;
    <type2> <column2>;
    ...
) STORED AS <file_format>;
```

ในส่วนของการรูปแบบไฟล์ที่จัดเก็บจะแยกแยะด้วย STORED AS <file_format> ได้แก่ คำสั่ง STORED AS

TEXTFILE สำหรับไฟล์แบบข้อความที่ใช้ CSV ไฟล์ในการจัดเก็บ คำสั่ง STORED AS AVRO สำหรับไฟล์ AVRO คำสั่ง

STORED AS ORC สำหรับไฟล์ ORC และคำสั่ง STORED AS PARQUET สำหรับไฟล์ปาร์เก้ โดยมีผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.2

No.	TEXT			AVRO			ORC			PARQUET		
	S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M	L
1	21.49	25.85	46.50	19.69	21.16	43.36	20.88	30.91	45.20	28.26	27.63	93.00
2	19.21	25.68	46.78	18.82	20.40	45.61	20.16	31.11	46.86	27.36	27.79	94.00
3	19.39	25.53	47.34	18.97	20.63	44.55	22.51	30.96	45.56	27.18	27.81	93.00
4	19.22	25.69	47.65	18.90	20.87	44.81	20.77	30.96	45.20	27.22	27.54	94.00
5	20.03	25.89	46.78	19.08	20.70	45.07	20.23	30.92	45.22	27.36	27.65	94.00
6	20.17	25.78	46.78	19.79	20.63	44.30	21.24	31.13	45.30	27.55	27.70	93.00
7	19.87	25.53	46.80	18.85	21.12	44.35	21.25	30.93	46.32	28.16	27.79	94.00
8	19.21	25.85	46.78	18.98	21.15	43.81	20.83	30.98	46.70	28.19	27.63	93.00
9	20.11	25.57	47.30	19.12	20.92	45.32	22.45	31.11	46.63	27.90	27.56	93.00
10	20.12	25.68	47.25	18.90	20.70	45.18	22.34	31.10	46.69	27.90	27.77	93.00
Min	19.21	25.53	46.50	18.82	20.40	43.36	20.16	30.91	45.20	27.18	27.54	93.00
Max	21.49	25.89	47.65	19.79	21.16	45.61	22.51	31.13	46.86	28.26	27.81	94.00
Ave	19.88	25.71	47.00	19.11	20.83	44.64	21.27	31.01	45.97	27.71	27.69	93.40

ภาพที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

รูปแบบไฟล์ในการสร้างตารางข้อมูลใหม่

4.2.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพรูปแบบไฟล์ในการอ่านข้อมูลทั้งตาราง การทดลองที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ในการอ่านข้อมูลที่จัดเก็บในตารางทั้งหมด (Select All Data) ของไฟล์ทั้ง 4 รูปแบบ ซึ่งแต่ละแบบมีขนาดต่างกัน 3 ระดับ เพื่อหาว่าไฟล์รูปแบบไหนเหมาะสมกับการอ่านข้อมูลทั้งหมดที่จัดเก็บในตาราง (อ่านทุกแถวและทุกคอลัมน์) มากที่สุด (ใช้เวลาในการอ่านข้อมูลน้อยที่สุด) โดยการประมวลผลนี้ จะใช้ Apache Hive ในการอ่านข้อมูลด้วยภาษา SQL ได้แก่

```
SELECT *
FROM <table_name>;
```

ในส่วนของการประมวลผลนี้ จะใช้เครื่องมือ Hive Query ผ่านบริการ Apache Hue ซึ่งเป็นเครื่องมือสนับสนุนการบริหารจัดการข้อมูลขนาดใหญ่บนแพลตฟอร์มบิ๊กดาต้า สำหรับคำสั่งที่ทดสอบข้างต้นนั้น

จะคล้ายกันสำหรับทุกชุดข้อมูลที่ได้รับการทดสอบ ยกเว้น ชื่อของตารางข้อมูล (Data Table) ที่ถูกเรียกมาประมวลผล โดยมีผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.3

No.	TEXT			AVRO			ORC			PARQUET		
	S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M	L
1	00.22	00.25	00.21	00.19	00.21	00.18	00.21	00.31	00.31	00.18	00.17	00.18
2	00.20	00.22	00.22	00.14	00.16	00.20	00.22	00.23	00.24	00.15	00.20	00.21
3	00.18	00.18	00.22	00.16	00.20	00.20	00.23	00.28	00.21	00.20	00.21	00.20
4	00.22	00.24	00.21	00.15	00.21	00.19	00.23	00.30	00.30	00.16	00.18	00.21
5	00.20	00.20	00.21	00.16	00.17	00.20	00.24	00.29	00.28	00.17	00.18	00.21
6	00.19	00.18	00.22	00.14	00.17	00.20	00.22	00.29	00.27	00.15	00.19	00.23
7	00.19	00.19	00.23	00.19	00.18	00.19	00.21	00.25	00.27	00.17	00.20	00.19
8	00.20	00.18	00.23	00.19	00.17	00.20	00.24	00.28	00.28	00.16	00.19	00.20
9	00.21	00.18	00.23	00.15	00.16	00.19	00.23	00.28	00.29	00.16	00.18	00.20
10	00.19	00.19	00.22	00.15	00.16	00.20	00.24	00.27	00.30	00.17	00.20	00.21
Min	00.18	00.18	00.21	00.14	00.16	00.18	00.21	00.23	00.21	00.15	00.17	00.18
Max	00.22	00.25	00.23	00.19	00.21	00.20	00.24	00.31	00.31	00.20	00.21	00.23
Ave	00.20	00.20	00.22	00.16	00.18	00.20	00.23	00.28	00.28	00.17	00.19	00.20

ภาพที่ 4.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ รูปแบบไฟล์ในการอ่านข้อมูลทั้งตาราง

4.2.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพรูปแบบไฟล์ในการนับจำนวนแถวในตาราง การทดลองที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ในการนับจำนวนแถวข้อมูลที่จัดเก็บในตารางทั้งหมด (Count the Number of Rows) ซึ่งเป็นการคำนวณเชิงสถิติพื้นฐานอย่างหนึ่ง โดยนำไฟล์ทั้ง 4 รูปแบบ มาทดสอบในแพลตฟอร์ม ซึ่งแต่ละแบบมีขนาดต่างกัน 3 ระดับ เพื่อหาว่าไฟล์รูปแบบไหนเหมาะสมกับการนับจำนวนแถวข้อมูลในตารางมากที่สุด (ใช้เวลาในการอ่านข้อมูลน้อยที่สุด) โดยการประมวลผลนี้จะใช้ Apache Hive ในการอ่านข้อมูลด้วยภาษา SQL ได้แก่

```
SELECT COUNT(*)
```

```
FROM <table_name>;
```

ในส่วนของการทดสอบนี้จะต่างจากคำสั่ง SELECT * FROM <table_name> ที่ใช้ในการทดลองก่อนหน้านี้ในข้อ 4.2 เนื่องจาก คำสั่ง count(*) จะให้ผลลัพธ์เป็น

จำนวนเต็มของแถวในตารางข้อมูล แทนที่จะเป็นการแสดงผลข้อมูลทั้งหมด โดยมีผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.4

No.	TEXT			AVRO			ORC			PARQUET		
	S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M	L
1	00.26	00.35	30.98	00.29	0.330	40.99	00.29	00.26	24.70	00.31	00.27	34.40
2	00.33	00.30	31.70	00.29	0.360	37.40	00.27	00.28	26.26	00.32	00.31	36.93
3	00.38	00.33	30.89	00.28	0.370	37.32	00.26	00.26	24.98	00.29	00.32	35.90
4	00.35	00.34	30.95	00.29	0.342	38.12	00.28	00.27	24.88	00.30	00.29	35.46
5	00.37	00.34	31.12	00.29	0.340	38.02	00.28	00.28	24.98	00.30	00.30	35.42
6	00.36	00.30	31.16	00.28	0.336	38.78	00.29	00.26	25.13	00.29	00.30	35.47
7	00.27	00.31	31.24	00.29	0.338	37.65	00.27	00.27	24.78	00.31	00.27	35.71
8	00.27	00.32	31.11	00.30	0.339	38.26	00.27	00.27	24.77	00.31	00.28	35.63
9	00.28	00.31	31.19	00.31	0.342	38.12	00.28	00.26	25.08	00.29	00.28	35.42
10	00.27	00.30	31.15	00.31	0.338	38.66	00.27	00.27	24.94	00.31	00.27	35.66
Min	00.26	00.30	30.89	00.28	0.333	37.32	00.26	00.26	24.70	00.29	00.27	34.40
Max	00.38	00.35	31.70	00.31	0.37	40.99	00.29	00.28	26.26	00.32	00.32	36.93
Ave	00.31	00.32	31.15	00.29	0.34	38.33	00.28	00.27	25.05	00.30	00.29	35.60

ภาพที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ รูปแบบไฟล์ในการนับจำนวนแถวในตาราง

4.2.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพรูปแบบไฟล์ในการเรียงลำดับข้อมูลในตาราง การทดลองที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ในการเรียงลำดับข้อมูลที่จัดเก็บในตารางทั้งหมด (Sort the Data) ซึ่งเป็นการคำนวณเชิงสถิติที่ใช้การประมวลผลสูงกว่าการนับจำนวนแถวในตาราง โดยนำไฟล์ทั้ง 4 รูปแบบ มาทดสอบในแพลตฟอร์ม ซึ่งแต่ละแบบมีขนาดต่างกัน 3 ระดับ เพื่อหาว่าไฟล์รูปแบบไหน เหมาะสมกับการเรียงลำดับข้อมูลในตารางมากที่สุด (ใช้เวลาในการอ่านข้อมูลน้อยที่สุด) โดยการประมวลผลนี้จะใช้ Apache Hive ในการอ่านข้อมูลด้วยภาษา SQL ได้แก่

```
SELECT <column 1>, <column 2>, ...,
```

```
<column N>
```

```
FROM <table_name>
```

```
ORDER BY <column_name>;
```

ในส่วนของการทดสอบนี้ จะใช้เวลาในการประมวลผล

ข้อมูลมากที่สุดเมื่อเทียบกับการทำงานประเภทอื่นที่ผ่านมาทั้งหมด เนื่องจากเป็นชุดคำสั่งที่มีความซับซ้อนในการประมวลผลมากกว่าการใช้ชุดคำสั่งหรือการทำงานประเภทอื่นก่อนหน้านี้ โดยมีผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.5

No.	TEXT			AVRO			ORC			PARQUET		
	S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M	L
1	00.32	00.43	02.55	00.31	00.53	02.55	00.31	00.43	02.35	00.29	00.37	02.24
2	00.31	00.42	02.56	00.30	00.53	02.58	00.30	00.43	02.33	00.30	00.40	02.27
3	00.32	00.43	02.61	00.31	00.48	02.59	00.29	00.43	02.41	00.29	00.40	02.25
4	00.32	00.44	02.57	00.31	00.52	02.56	00.29	00.43	02.38	00.29	00.39	02.25
5	00.31	00.45	02.57	00.30	00.52	02.56	00.30	00.44	02.37	00.29	00.39	02.25
6	00.34	00.44	02.55	00.33	00.53	02.55	00.30	00.44	02.37	00.30	00.38	02.26
7	00.32	00.43	02.60	00.32	00.49	02.57	00.29	00.43	02.36	00.29	00.40	02.25
8	00.31	00.43	02.60	00.33	00.50	02.57	00.31	00.43	02.40	00.30	00.39	02.24
9	00.31	00.42	02.60	00.32	00.49	02.58	00.30	00.43	02.39	00.29	00.37	02.24
10	00.33	00.44	02.61	00.33	00.50	02.59	00.31	00.44	02.37	00.29	00.37	02.25
Min	00.31	00.42	02.55	00.30	00.48	02.55	00.29	00.43	02.33	00.29	00.37	02.24
Max	00.34	00.45	02.61	00.33	00.53	02.59	00.31	00.44	02.41	00.30	00.40	02.27
Ave	00.32	00.43	02.58	00.32	00.51	02.57	00.30	00.43	02.37	00.29	00.39	02.25

ภาพที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ
รูปแบบไฟล์ในการเรียงลำดับข้อมูล
ในตาราง

4.2.5 สรุปผลการทดลอง

ในการสร้างตารางข้อมูลขึ้นมาใหม่ด้วยภาษา SQL ผลการทดลองสรุปได้ว่ารูปแบบไฟล์ชนิด AVRO มีค่าเฉลี่ยของเวลาที่เร็วที่สุดจากการทดลองสร้างข้อมูลทั้ง 3 ขนาด เล็ก, กลาง, ใหญ่

ในการอ่านตารางข้อมูลด้วยภาษา SQL ผลการทดลองสรุปได้ว่ารูปแบบไฟล์ชนิด AVRO มีค่าเฉลี่ยของเวลาที่เร็วที่สุดจากการทดลองอ่านข้อมูลทั้ง 3 ขนาด เล็ก, กลาง, ใหญ่

No.	Detail	TEXT			AVRO			ORC			PARQUET		
		S	M	L	S	M	L	S	M	L	S	M	L
1	CREATE TABLE												
AVRO	Min	19.21	25.53	46.50	18.82	20.40	43.36	20.16	30.91	45.20	27.18	27.54	93.00
	Max	21.49	25.89	47.65	19.79	21.16	45.61	22.51	31.13	46.86	28.26	27.81	94.00
	Ave	19.88	25.71	47.00	19.11	20.83	44.64	21.27	31.01	45.97	27.71	27.69	93.40
2	SELECT *												
AVRO	Min	00.18	00.18	00.21	00.14	00.16	00.18	00.21	00.23	00.21	00.15	00.17	00.18
	Max	00.22	00.25	00.23	00.19	00.21	00.20	00.24	00.31	00.31	00.20	00.21	00.23
	Ave	00.20	00.20	00.22	00.16	00.18	00.20	00.23	00.28	00.28	00.17	00.19	00.20
3	SELECT COUNT(*)												
ORC	Min	00.26	00.30	30.89	00.28	00.33	37.32	00.26	00.26	24.70	00.29	00.27	34.40
	Max	00.38	00.35	31.70	00.31	00.37	40.99	00.29	00.28	26.26	00.32	00.32	36.93
	Ave	00.31	00.32	31.15	00.29	00.34	38.33	00.28	00.27	25.05	00.30	00.29	35.60
4	ORDER BY												
PARQUET	Min	00.31	00.42	02.55	00.30	00.48	02.55	00.29	00.43	02.33	00.29	00.37	02.24
	Max	00.34	00.45	02.61	00.33	00.53	02.59	00.31	00.44	02.41	00.30	00.40	02.27
	Ave	00.32	00.43	02.58	00.32	00.51	02.57	00.30	00.43	02.37	00.29	00.39	02.25

ภาพที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ
รูปแบบไฟล์ข้อมูลต่าง ๆ ในตาราง

ในการนับจำนวนแถวในตารางข้อมูลด้วยภาษา SQL ผลการทดลองสรุปได้ว่ารูปแบบไฟล์ชนิด ORC มีค่าเฉลี่ยของเวลาที่เร็วที่สุดจากการทดลองในการนับจำนวนแถวในตารางข้อมูลทั้ง 3 ขนาด เล็ก, กลาง, ใหญ่

ในการเรียงลำดับข้อมูลในตารางด้วยภาษา SQL ผลการทดลองสรุปได้ว่ารูปแบบไฟล์ชนิด PARQUET มีค่าเฉลี่ยของเวลาที่เร็วที่สุดจากการทดลองในการเรียงลำดับข้อมูลในตารางทั้ง 3 ขนาด เล็ก, กลาง, ใหญ่ ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.6

4.3 ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในงานวิจัย

ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย เครื่องคอมพิวเตอร์ Workstation ประสิทธิภาพสูง จำนวน 1 เครื่อง เพื่อใช้เป็น Master Node สำหรับเป็นส่วนติดต่อกับผู้ใช้และกำหนดงานไปประมวลผลบน Data Node และใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เสมือน (Virtual Machine: VM) สำหรับ Data Node จำนวน 3 เครื่อง สำหรับจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลแบบขนาน (Parallel computing)

แสดงในภาพที่ 4.7

ลำดับ	เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย	CPU	Memory	Disk
1	Master Node	8 cores	32 GB	1 TB
2	Data Node 1	8 cores	16 GB	1 TB
3	Data Node 2	8 cores	16 GB	1 TB
4	Data Node 3	8 cores	16 GB	1 TB

ภาพที่ 4.7 คุณลักษณะทางเทคนิคของ
เครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายสำหรับ
แพลตฟอร์มบิ๊กดาต้า

5. ผลการศึกษา

จากผลการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำงานกับไฟล์รูปแบบต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในแพลตฟอร์มบิ๊กดาต้า ที่มีการจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลแบบกระจาย (Distributed Data Storing and Computing) สามารถแบ่งปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการประมวลผลข้อมูลในแพลตฟอร์มดังกล่าว ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ปัจจัยที่มีผลกระทบจากโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูล และปัจจัยที่มีผลกระทบจากขนาดของข้อมูลที่จัดเก็บ

5.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบจากโครงสร้างในการจัดเก็บข้อมูล

จากผลการทดลองประมวลผลข้อมูลกับการทำงานที่ต่างกันข้างต้น บนแพลตฟอร์มบิ๊กดาต้า จะเห็นได้ว่าโครงสร้างข้อมูลแต่ละแบบมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ขึ้นกับการทำงานที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลในขณะนั้น เช่น หากเป็นการสร้างตารางข้อมูลใหม่หรือการแทรกข้อมูลแถวใหม่เข้าไปในไฟล์ข้อมูลเดิม โครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลแบบเรียงตามแถวเป็นหลัก (Row-based Data Structure) เช่น ไฟล์แบบข้อความ (CSV หรือ JSON) และไฟล์แบบ AVRO จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลแบบเรียงตามคอลัมน์เป็นหลัก (Column-based Data Structure) เช่น ไฟล์ ORC และไฟล์ปาร์เก้ เนื่องจากโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลแบบเรียงตามแถวเป็นหลักจะนำข้อมูลแถวใหม่ไปต่อท้ายข้อมูลแถวสุดท้ายในตารางเดิมเท่านั้น ในทาง

ตรงกันข้ามถ้าเป็นข้อมูลแบบเรียงตามคอลัมน์เป็นหลัก จะทำได้ยากกว่าในกรณีนี้ เพราะต้องนำข้อมูลในแต่ละคอลัมน์ของแถวใหม่ไปแทรกในส่วนท้ายของแต่ละคอลัมน์นั้น ๆ นอกจากนี้การแสดงผลข้อมูลทั้งหมดในตารางซึ่งเป็นการอ่านข้อมูลทุกคอลัมน์ในแต่ละแถวตามลำดับ โครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลแบบเรียงตามแถวเป็นหลัก ซึ่งในที่นี้ได้แก่ไฟล์ AVRO และไฟล์ข้อความ จะเหมาะสมกว่าไฟล์ ORC และไฟล์ปาร์เก้ ที่มีโครงสร้างข้อมูลแบบเรียงตามคอลัมน์เป็นหลักเช่นกัน ในทางตรงกันข้ามการประมวลผลข้อมูลที่ไม่ได้อ่านหรือเขียนข้อมูลทุกแถวแบบตามลำดับ ไฟล์ ORC และไฟล์ปาร์เก้ ซึ่งเป็นโครงสร้างข้อมูลแบบเรียงตามคอลัมน์เป็นหลัก จะมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าไฟล์แบบข้อความและไฟล์ AVRO ซึ่งเป็นโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลแบบเรียงตามแถวเป็นหลัก โดยเฉพาะการคำนวณทางคณิตศาสตร์หรือค่าสถิติพื้นฐาน เช่น การนับจำนวน (Count) การหาผลรวม (Sum) การหาค่าสูงสุด (Max) การหาค่าต่ำสุด (Min) และ การหาค่าเฉลี่ย (Average) ของข้อมูลเฉพาะบางคอลัมน์ ยิ่งกว่านั้นถ้าเป็นการประมวลผลข้อมูลที่ซับซ้อนกว่าการคำนวณค่าสถิติพื้นฐาน เพื่อหาผลลัพธ์ตามที่ต้องการ เช่น การเรียงลำดับข้อมูล (Sort) ตามค่าที่กำหนด จะยิ่งเห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพการประมวลผลข้อมูล ว่าโครงสร้างไฟล์แบบเรียงตามคอลัมน์นั้นเหมาะสมกับการทำงานประเภทนี้มากกว่าโครงสร้างไฟล์แบบเรียงตามแถวมากยิ่งขึ้น

5.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบจากขนาดของข้อมูลที่จัดเก็บ

นอกจากประเภทของโครงสร้างไฟล์ข้อมูลที่มีการเรียงลำดับต่างกันแล้ว ขนาดของข้อมูลที่จัดเก็บบนแพลตฟอร์มบิ๊กดาต้าก็มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานกับข้อมูลเช่นกัน จากผลการทดลองนี้ เราจะเห็นว่าการสร้างตารางจากไฟล์ข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ (Large data) จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของไฟล์ปาร์เก้สูงกว่าไฟล์ข้อมูลรูปแบบอื่น เนื่องจากไฟล์ปาร์เก้จะเสียเวลาในการแปลงข้อมูลที่จัดเก็บจากข้อความ (Text) ให้เป็นข้อมูลแบบไบนารี (Binary) ซึ่งมี

ข้อดีที่ใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บน้อยกว่าแบบข้อความมาก แต่ผลกระทบของไฟล์ขนาดใหญ่จะทำให้เห็นข้อเสียของไฟล์ปาร์กในการสร้างไฟล์ใหม่ได้อย่างชัดเจน นอกจากผลกระทบในการสร้างไฟล์ใหม่หรือการเขียนข้อมูลลงบนไฟล์แล้ว ขนาดของไฟล์ขนาดใหญ่ยังมีผลกระทบกับไฟล์ที่มีโครงสร้างข้อมูลแบบเรียงตามคอลัมน์เป็นหลักเหมือนกันจากผลการนับจำนวนแถวในไฟล์ขนาดเล็กและไฟล์ขนาดกลางไฟล์ปาร์กได้ผลต่างจากไฟล์ ORC เล็กน้อย แต่เมื่อไฟล์มีขนาดใหญ่ขึ้นไฟล์ ORC จะมีประสิทธิภาพดีที่สุดกับการคำนวณด้านสถิติพื้นฐานเนื่องจากไฟล์ ORC มีฟังก์ชันในการคำนวณค่าสถิติเหล่านั้นไว้อยู่แล้ว ทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลน้อยกว่าไฟล์ชนิดอื่น อย่างไรก็ตามเมื่อเป็นการประมวลผลที่ไม่เกี่ยวกับการคำนวณค่าสถิติพื้นฐาน แต่เป็นการประมวลผลข้อมูลที่ซับซ้อนเช่นการเรียงลำดับข้อมูลทั้งหมดในไฟล์ขนาดใหญ่ไฟล์ปาร์กกลับมีประสิทธิภาพดีกว่าไฟล์ ORC ที่มีโครงสร้างข้อมูลแบบเรียงตามคอลัมน์เป็นหลักเหมือนกัน เนื่องจากการประมวลผลแบบนี้ไม่สามารถนำค่าทางสถิติพื้นฐานที่มีมาใช้ได้โดยตรง แต่ต้องใช้ในการประมวลผลข้อมูลทั้งหมดมาแสดงผลลัพธ์ ซึ่งโครงสร้างไฟล์ปาร์กทำได้ดีกว่าเนื่องจากไฟล์ปาร์กใช้การจัดเก็บแบบผสมทั้งแบบเรียงตามคอลัมน์และเรียงตามแถว นอกจากนี้การจัดเก็บแบบไบนารียังช่วยให้การเคลื่อนย้ายข้อมูลหรือการอ่านข้อมูลมาประมวลผลมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

6. สรุปผลและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของรูปแบบไฟล์ข้อมูล เพื่อวิเคราะห์หารูปแบบไฟล์ที่เหมาะสมกับข้อมูลในการทำงานประเภทต่าง ๆ โดยเฉพาะข้อมูลขนาดใหญ่ ที่มีผลกระทบสูงต่อประสิทธิภาพในการประมวลผลข้อมูลบนแพลตฟอร์มบิ๊กดาต้า (Big Data Platforms) ในการทดลองนี้ได้นำรูปแบบไฟล์ข้อมูลที่นิยมใช้บนแพลตฟอร์มบิ๊กดาต้ามากที่สุดในปัจจุบัน โดยสามารถแบ่งรูปแบบไฟล์ข้อมูลได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มไฟล์ที่มีโครงสร้างการจัดเก็บแบบเรียงตามแถวเป็นหลัก (Row-Based Data Structure) ซึ่งคณะผู้วิจัยได้นำไฟล์ข้อความ (Text) และไฟล์ AVRO มาใช้ในการทดลอง และกลุ่ม

ไฟล์ข้อมูลที่มีโครงสร้างการจัดเก็บแบบเรียงตามคอลัมน์เป็นหลัก (Column-Based Data Structure) โดยเรานำไฟล์ ORC และไฟล์ปาร์ก มาใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับไฟล์กลุ่มแรก นอกจากนี้ในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ คณะผู้วิจัยได้ทดสอบการทำงานกับข้อมูลที่หลากหลาย เช่น การสร้างตารางข้อมูลใหม่ การอ่านข้อมูลทั้งหมดในตารางการนับจำนวนแถวข้อมูลในตาราง ซึ่งเป็นเป็นการคำนวณสถิติพื้นฐาน และการเรียงลำดับข้อมูลที่มีการประมวลผลซับซ้อน โดยการทดสอบจะนำไฟล์ข้อมูลที่มีขนาดต่างกัน 3 ระดับ มาใช้ประเมินผล เพื่อพิจารณาปัจจัยจากขนาดของไฟล์ข้อมูลว่ามีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานแต่ละประเภทหรือไม่ จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการทำงานที่เกี่ยวข้องกับการอ่านหรือเขียนข้อมูลทั้งหมดในตาราง แบบตามลำดับ ไฟล์ข้อมูลที่มีโครงสร้างการจัดเก็บแบบเรียงตามแถวเป็นหลัก จะมีประสิทธิภาพดีกว่าไฟล์ข้อมูลที่มีโครงสร้างการจัดเก็บแบบเรียงตามคอลัมน์เป็นหลัก ส่วนการทำงานที่ใช้การคำนวณเชิงสถิติ หรือการประมวลผลข้อมูลที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ไฟล์ข้อมูลที่มีโครงสร้างการจัดเก็บแบบเรียงตามคอลัมน์เป็นหลัก จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าไฟล์ข้อมูลที่มีโครงสร้างการจัดเก็บแบบเรียงตามแถวเป็นหลัก นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่า ขนาดของข้อมูลที่ใหญ่ขึ้นส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานกับข้อมูลด้วย โดยเฉพาะการสร้างตารางใหม่ไฟล์ปาร์กจะมีประสิทธิภาพต่ำที่สุดและมีความแตกต่างจากไฟล์ประเภทอื่นอย่างมีนัยสำคัญ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากคณะผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีจากหลาย ๆ ฝ่ายโดยเฉพาะอาจารย์ที่ปรึกษาคือ ผศ.ดร.วรภัทร ไพรไกรง ในการแนะนำ ตรวจสอบแก้ไข ให้ข้อเสนอแนะ ติดตามความก้าวหน้าในการดำเนินการวิจัย คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ คณะกรรมการและเจ้าหน้าที่กองทุนพัฒนาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าทุกท่านที่กรุณาช่วย

พิจารณากลับกรองโครงการวิจัยและช่วยประสานงานต่าง ๆ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณกองทุนพัฒนาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ที่สนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการวิจัย ประจำปี 2565

ขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญที่สละเวลาในการตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัย เรื่องการวิจัยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพื้นที่จัดเก็บในแพลตฟอร์มบิ๊กดาต้า ตรวจทานความถูกต้องของภาษา และพิจารณาความเชิงตรงเนื้อหาของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังได้รับการช่วยเหลืออีกจำนวนมากที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างยิ่งจึงกราบขอบพระคุณและขอบคุณไว้โอกาสนี้

8. บรรณานุกรม

- [1] Cutting, D., & Cafarella, M. (2007). Apache hadoop., 203-214.
- [2] Dean, J., & Ghemawat, S. (2008). MapReduce: simplified data processing on large clusters. Communications of the ACM, 51(1), 107-113.
- [3] Shafranovich, Y. (2005). Rfc 4180: Common format and mime type for comma-separated values (csv) files., 562-604.
- [4] Pezoa, F., Reutter, J. L., Suarez, F., Ugarte, M., & Vrgoč, D. (2016, April). Foundations of JSON schema. In Proceedings of the 25th international conference on World Wide Web (pp. 263-273).
- [5] Vohra, D. (2016). Apache avro. Practical Hadoop Ecosystem: A Definitive Guide to Hadoop-Related Frameworks and Tools, 303-323.
- [6] Apache, O. R. C. (2018). Apache ORC: High-Performance Columnar Storage for Hadoop., 67-108.
- [7] He, Y., Lee, R., Huai, Y., Shao, Z., Jain, N., Zhang, X., & Xu, Z. (2011). RCFile: A fast and space-efficient data placement structure in MapReduce-based warehouse systems. In 2011 IEEE 27th International Conference on Data Engineering (pp. 1199-1208). IEEE.
- [8] Vohra, D., & Vohra, D. (2016). Apache parquet. Practical Hadoop Ecosystem: A Definitive Guide to Hadoop-Related Frameworks and Tools, 325-335.
- [9] Ivanov, T., & Pergolesi, M. (2020). The impact of columnar file formats on SQL-on-hadoop engine performance: A study on ORC and Parquet. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 32(5), e5523.

- [10] Bansal, H., Chauhan, S., & Mehrotra, S. (2016). Apache Hive Cookbook. Packt Publishing Ltd.
- [11] Salloum, S., Dautov, R., Chen, X., Peng, P. X., & Huang, J. Z. (2016). Big data analytics on Apache Spark. International Journal of Data Science and Analytics, 1, 145-164.
- [12] Anonymous.: Dataset web services. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/shivamb/netflix-shows>. February 5, 2024

การวิเคราะห์การไหลเวียนของอากาศและฝุ่นละอองขนาดเล็กผ่านแผงเกล็ดบังแดดภายใน ช่องว่างอากาศด้วยแบบจำลอง CFD

Analysis of Airflow and Particulate Matter through Louvers within the Air Cavity with the CFD Model

วินัย มั่นคตธรรม¹, รัฐศักดิ์ พรหมมาศ^{2*}

Winai Mankhatitham¹, Ratthasak Prommas^{2*}

¹วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ นครปฐม
73170 ประเทศไทย

¹Rattanakosin College for Sustainable Energy and Environment (RCSEE), Rajamangala University of
Technology Rattanakosin, Nakhon Pathom 73170, Thailand

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ นครปฐม 73170 ประเทศไทย

²Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Nakhon Pathom
73170, Thailand

*Corresponding Author. E-mail: ratthasak.pro@rmutr.ac.th

(Received: July 30, 2024, Revised: October 3, 2024, Accepted: October 17, 2024)

บทคัดย่อ: การออกแบบผนังเปลือกอาคารด้วยการใช้แผงเกล็ดบังแดดที่สามารถป้องกันแสงแดดได้ดีและสามารถกัก
กรองฝุ่นละอองขนาดเล็กได้ด้วยนั้นเป็นแนวคิดที่จะพัฒนาระบบผนังเปลือกอาคารให้มีสมรรถนะที่สูงขึ้นกว่าผนังทั่ว ๆ ไป
ซึ่งจะต้องออกแบบระบบไหลเวียนของอากาศ และสร้างสภาพแวดล้อมภายในช่องว่างอากาศให้มีการตกค้างของ
ฝุ่นละอองมากที่สุด การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการไหลเวียนของอากาศและกักกรองฝุ่นละออง
ขนาดเล็กผ่านแผงเกล็ดบังแดดภายในช่องว่างอากาศด้วยโปรแกรมการเคลื่อนที่ของอากาศพลศาสตร์
Computational Fluid Dynamics (CFD) โดยการขั้นตอนการวิจัยจะศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ประกอบด้วยขนาด
ของช่องว่างอากาศ ตำแหน่งช่องเปิดทางเข้าและทางออกของกระแสลม รูปร่างของแผงเกล็ดบังแดดและปริมาณฝุ่น
ละอองที่ตกค้างภายในช่องอากาศ ผ่านทางกล่องทดสอบจำนวน 4 กล่อง และประเมินผลด้วยซอฟต์แวร์
SOLIDWORKS 2023 (Flow Simulation) ผลการวิจัยพบว่า ขนาดช่องว่างอากาศที่แคบจะส่งผลให้เกิดแรงดัน
ภายในกล่องทดสอบเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีความเร็วลมเพิ่มขึ้น กระแสลมที่เคลื่อนที่จากช่องเปิดด้านจากด้านล่างขึ้นบนจะ
มีจุดอับลมน้อยกว่าแบบด้านบนลงล่าง ส่งผลให้กล่องทดสอบ (a.2) สามารถกักกรองฝุ่นละอองขนาดเล็กได้มากถึง
24% โดยปราศจากเครื่องกลเข้าช่วย และถ้าต้องการลดความแปรปรวนภายในช่องว่างอากาศควรหลีกเลี่ยงรูปทรงที่
เป็นเหลี่ยมมุม ผลสรุปที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลเบื้องต้นเพื่อนำไปสู่การออกแบบพัฒนาและปรับปรุงระบบผนัง
เปลือกอาคารที่อาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างแผงเกล็ดบังแดดและการควบคุมการไหลเวียนของอากาศบริเวณผนัง
อาคาร เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการกักกรองฝุ่นละอองขนาดเล็กได้ด้วย

คำสำคัญ: การจำลองการเคลื่อนที่ของอากาศ โปรแกรมการเคลื่อนที่ของอากาศพลศาสตร์ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก

Abstract: The building envelope design with louvers that protect it from solar radiation and residual particle matter is an idea for developing a building envelope system with higher performance. It requires designing an air circulation system and creating an environment within the air cavity that minimizes dust residues. Therefore, this research aims to predict the airflow pattern and residual particulate matter through the louvers within the air cavity with the Computational Fluid Dynamics (CFD) program. During the research stage, various parameters were studied, including the size of the air cavity, airflow inlet and outlet openings, the shape of the louvers, and the amount of particle matter remaining in the air cavity. These parameters were measured through four experimental boxes with different specifications to forecast the airflow and particulate matter behavior by applying the SOLIDWORKS 2023 (Flow Simulation) software. The findings indicated that reducing the size of the air cavity leads to higher internal pressure and air velocity. Vertical airflows ascending from the lower to the upper apertures exhibit reduced areas of stagnant air compared to downward airflows. The test box (a.2) can effectively remove up to 24 % of particulate matter without mechanical intervention. The data acquired from this research is preparatory to advancing building envelope technologies for enhanced efficiency in the future.

Keywords: Air Flow Simulation, CFD Modeling, Particulate Matte

1. บทนำ

เปลือกอาคารที่มีประสิทธิภาพสูง นอกจากจะสามารถป้องกันความร้อนจากภายนอกได้อย่างดีแล้ว ควรมีคุณสมบัติที่ช่วยให้ผู้ใช้อาคารเกิดสภาวะความสบายในด้านอื่น ๆ ด้วย อาทิเช่น ด้านอุณหภูมิ ด้านแสงสว่าง ด้านการประหยัดพลังงานรวมถึงการลดฝุ่นละอองภายในอาคารด้วย [1] ในปัจจุบันนี้ปัญหาเรื่องฝุ่นละอองขนาดเล็กเป็นปัญหาที่สำคัญของทุกประเทศ องค์การอนามัยโลก ประเมินการว่ามลพิษทางอากาศเป็นสาเหตุของการเสียชีวิตของประชากรทั่วโลกกว่า 7 ล้านคนต่อปี และยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพด้านอื่น ๆ ของประชาชนเป็นอย่างมาก ซึ่งนอกจากปัญหามลพิษทางอากาศในบรรยากาศแล้ว มลพิษทางอากาศภายในอาคารยังเป็นปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ใหญ่อีกปัญหาหนึ่ง โดยทุกปีจะมีประชากรจำนวน 4.2 ล้านคน เสียชีวิตเนื่องจากการได้รับสัมผัสกับมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงที่ไม่สะอาดในครัวเรือน โดยคิดเป็น 45 เท่าของจำนวนผู้เสียชีวิตประจำปีทั่วโลกจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ [2]

สำหรับวิธีการป้องกันฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่ให้

เข้าสู่อาคารนั้น เป็นเรื่องที่ควบคุมได้ยากมาก เนื่องจากฝุ่นละอองเหล่านั้นจะเคลื่อนที่ไปตามกระแสลม ดังนั้นในการออกแบบระบบเปลือกอาคารให้มีประสิทธิภาพสูง จึงจำเป็นต้องมีการบูรณาการของระบบต่าง ๆ เข้าด้วยกัน ทั้งด้านสถาปัตยกรรมและวิศวกรรมงานระบบอื่น ๆ ในการออกแบบระบบผนังอาคารที่สามารถควบคุมปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กได้นั้น จะต้องใช้การทำนายพฤติกรรมเคลื่อนที่ของกระแสลมที่พัดพาฝุ่นละอองต่าง ๆ เข้ามาทางช่องเปิด การใช้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Computational Fluid Dynamics (CFD) เพื่อวิเคราะห์การไหลของอากาศภายในช่องอากาศ พฤติกรรมและการตกตะกอนของฝุ่นละออง จึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญที่สุด ที่สามารถช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถเข้าใจและตัดสินใจในกระบวนการออกแบบและในการศึกษานี้จะทำการทดสอบด้วยซอฟต์แวร์ SOLIDWORKS 2023 (Flow Simulation)

ขอบเขตในการศึกษานี้มุ่งศึกษาถึงพารามิเตอร์หลักที่มีผลต่อพฤติกรรมของกระแสลมและฝุ่นละอองขนาดเล็กเมื่อผ่านเคลื่อนที่ผ่านแผงเกล็ดบังแดด โดยคำนึงถึงความสัมพันธ์ของขนาดของช่องว่างอากาศ ตำแหน่งช่อง

เปิดทางเข้าและทางออกของกระแสลม รูปร่างของแผงเกล็ดบังแดดและปริมาณฝุ่นละอองที่ตกค้างภายในช่องอากาศโดยโปรแกรมการเคลื่อนที่ของอากาศพลศาสตร์ Computational Fluid Dynamics (CFD) ซึ่งผลการวิจัยจะทำให้ได้ องค์ความรู้ใหม่ที่สามารถนำไปเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบระบบเปลือกอาคารเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่สะสมรูปแบบต่อไปในอนาคต

2. วัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการไหลเวียนของอากาศและกักกรองฝุ่นละอองขนาดเล็กผ่านแผงเกล็ดบังแดดภายในช่องว่างอากาศด้วยโปรแกรมการเคลื่อนที่ของอากาศพลศาสตร์ Computational Fluid Dynamics (CFD)

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อัตราการไหลของอากาศ คือ อัตราส่วนของปริมาตรลมที่ไหลผ่านจุดใดจุดหนึ่งในหนึ่งหน่วยเวลา โดยคำนวณจากการวัดความเร็วเฉลี่ยอากาศจากแหล่งกำเนิดลมที่ต้องการเช่น พัดลม เครื่องเป่าลม (Blower) และเครื่องคอมพิวเตอร์ กับพื้นที่หน้าตัดหรือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่อากาศเคลื่อนที่ผ่าน อัตราการไหลของอากาศในช่องว่างระหว่างผนังกระจก 2 ชั้นที่มีการระบายอากาศพร้อมแผงเกล็ดบังแดดนั้นสามารถคำนวณ โดยแบบจำลองการไหลในแต่ละโหมดแยกได้ โดยใช้กฎกำลังและกฎของมวล การสูญเสียแรงดันทั้งหมดจากการระบายอากาศโดยธรรมชาติภายในช่องว่างอากาศของผนัง 2 ชั้น กับแผงเกล็ดบังแดดนั้น ประกอบด้วย การสูญเสียแรงดันขาเข้า การสูญเสียแรงดันขาออก และแรงดันความต้านทานไปตามแนวช่องว่างอากาศ ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta P_t = \Delta P_{in} + \Delta P_l + \Delta P_{out} \quad (1)$$

เมื่อ ΔP_t คือการสูญเสียความต้านทานของช่องอากาศระหว่างผนัง 2 ชั้น

ΔP_{in} คือการสูญเสียแรงดันขาเข้า

ΔP_l คือแรงดันความต้านทานไปตามแนวช่องว่างอากาศ

คือการสูญเสียแรงดันขาออก

ΔP_{out} ถ้าอากาศมีการไหลขึ้นไปตาม

ช่องว่างของผนัง 2 ชั้น

ตามกฎของ Bernoulli สมการที่เกิดขึ้นระหว่างช่องทางแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออก มีดังนี้

$$P_{in} + \frac{\rho_{in} v_{in}^2}{2} + (\rho_o - \rho_{ca,mean})gH = P_{out} + \frac{\rho_{out} v_{out}^2}{2} + \Delta P_t \quad (2)$$

เมื่อ P_{in}, P_{out} คือความสัมพันธ์ของแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออก

ρ_{in} คือความหนาแน่นของอากาศช่องแรงดันขาเข้า

ρ_{out} คือความหนาแน่นของอากาศช่องแรงดันขาออก

ρ_o คือความหนาแน่นของอากาศช่องแรงดันภายนอก

$\rho_{ca,mean}$ คือความหนาแน่นของอากาศช่องแรงดันเฉลี่ย

ดังนั้นความเร็วลมของช่องแรงดันขาเข้าจึงสามารถกำหนดได้โดย

$$v_{in} = \frac{\sqrt{2\Delta P_t - (\rho_o - \rho_{out})gH}}{\rho_o} \quad (3)$$

มวลของอัตราการไหลของอากาศภายในช่องว่างระหว่างผนัง 2 ชั้น สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$m_{ca} = \rho_o v_{in} A_{in} \quad (4)$$

เมื่อ m_{ca} คือมวลของการไหลของอากาศเข้าไปในช่องว่างระหว่างผนัง 2 ชั้นทางช่องทางเข้า

A_{in} คือการตัดพื้นที่แนวขวางทางช่องทางเข้า อัตราการส่วนความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลง

$$\left(\frac{U}{U_{ref}} \right) b - \left(\frac{U}{U_{ref}} \right) a \quad (5)$$

$$\frac{\left(\frac{U}{U_{ref}} \right) a}{\left(\frac{U}{U_{ref}} \right) a} \times 100$$

เมื่อ U คืออัตราความเร็วของอากาศ, m/s

ตามกฎอนุรักษ์มวล สำหรับระบบเปิดใด ๆ สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$\sum m_{in} - \sum m_{out} = \Delta m_{cv} \quad (6)$$

และอัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในปริมาตรควบคุม ย่อยเท่ากันกับอัตราสุทธิของการไหลเข้าปริมาตรควบคุมของมวล

$$\frac{dM_{cv}}{dt} = m_{in} - m_{out} \quad (7)$$

ในปัจจุบันนี้แนวคิดในการศึกษาเรื่องการเคลื่อนที่ของฝุ่นละอองขนาดเล็กเมื่อผ่านแผงเกล็ดบังแดดนั้น จากผลงานการวิจัยในอดีต สามารถศึกษาได้จากแนวคิดการออกแบบผนัง 2 ชั้นบริเวณเปลือกอาคารของ Katarina Kosutova et al. [3] ศึกษาการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำที่พัดผ่านแผงบานเกล็ด โดยการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบในอุโมงค์ลมและการใช้วิธีจำลองการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำด้วยระบบ CFD โดยการกำหนดตำแหน่งช่องเปิด 4 รูปแบบ พบว่า การไหลผ่านของกระแสน้ำในรูปแบบตำแหน่งบน-บน จะมีปริมาณลมไหลผ่านสูงสุดแต่จะมีการแลกเปลี่ยนอากาศภายในน้อยสุด ส่วนตำแหน่งบน-ล่างจะมีปริมาณการไหลผ่านของกระแสน้ำต่ำสุด ในส่วนของลักษณะของบานเกล็ดที่มีครีขนาดใหญ่มากกว่าจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของกระแสน้ำมากกว่าแบบขนาดเล็ก นอกจากนี้ การเว้นช่องว่างที่ผนังให้มีระยะห่างหลาย ๆ ช่องก็จะส่งผลถึงรูปแบบการไหลของอากาศและความเร็วลมที่ปะทะอาคารจะเปลี่ยนแปลงไปตามองศาของลมที่พัดเข้ามา Soha Matour et al. [4] ขนาดความกว้างและยาวของช่องว่างอากาศระหว่างผนังก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะส่งผลถึงความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงไป เพราะช่องว่างระหว่างกระจก จะมีผลกับความเร็วลมที่เกิดขึ้นภายใน การใช้โปรแกรม CFD จะสามารถช่วยประเมินรูปแบบของการเคลื่อนที่ของอากาศ ทำให้สามารถคาดการณ์ผลที่จะเกิดได้อย่างแม่นยำ Javad Ahmadi et al.[5] และ P Arabi et al.[6]

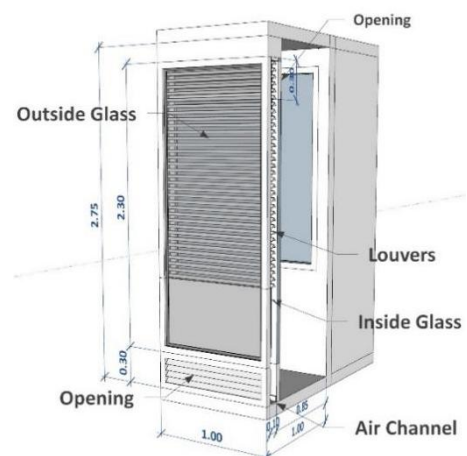
ในส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับฝุ่นละอองขนาดเล็กนั้น จะมีความสัมพันธ์กับเรื่องคุณภาพอากาศภายในอาคาร ซึ่งจะส่งผลถึงสภาวะความสบายและสภาพแวดล้อมที่ดี

ต่อสุขภาพของผู้ใช้อาคาร [7] มีงานวิจัยของ S.Holmberg and Q.Chen [8] ได้นำระบบการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) มาใช้ทดสอบการเคลื่อนที่ของอากาศและการควบคุมฝุ่นละอองขนาดเล็กภายในห้องเรียน โดยแบ่งพื้นที่ออกเป็น 4 โซน ผลการวิจัยพบว่า การตกตะกอนของฝุ่นละอองจะแปรผันไปตามระยะทางและตำแหน่งของช่องทางลมออก สูงสุดไม่เกิน $3\mu m$ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ปกติ ไม่มีผลกับผู้ใช้อาคาร Nguyen Lu Phuong and Kazuhide Ito. [9] ได้ศึกษาถึงและเฝ้าสังเกตพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของอากาศและการกระจายตัวของอนุภาคภายในห้อง ด้วยวิธีการคณิตศาสตร์และเปรียบเทียบกับผลการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) โดยมีการทดลอง 2 แบบคือแบบมีแผงกั้นภายในและแบบไม่มีแผงกั้นภายใน การทดลองพบว่าแบบมีแผงกั้นภายในจะสามารถเพิ่มพื้นที่กักเก็บอนุภาคขนาดเล็กและสามารถลดการเล็ดลอดของอนุภาคได้

4. วิธีดำเนินการศึกษา

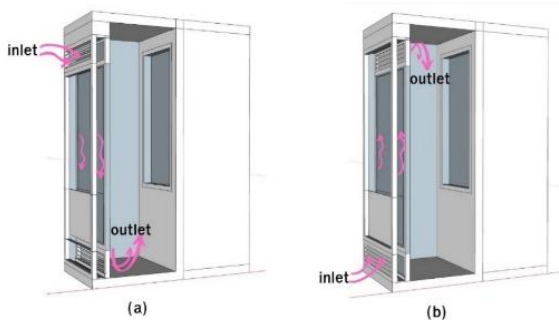
4.1 กล้องทดสอบ

จากภาพที่ 1 แสดงแนวคิดกล้องทดสอบในการศึกษาครั้งนี้ โดยกำหนดรายละเอียดกล้องทดสอบดังต่อไปนี้ กระจกใสชั้นนอก 9 mm. กระจกใสชั้นใน 9 mm. ช่องว่างอากาศขนาด 0.10 - 0.20 m. ช่องทางลมเข้า-ช่องทางลมออก และแผงเกร็ดบังแดดรูปทรง Λ (Inverted "V")

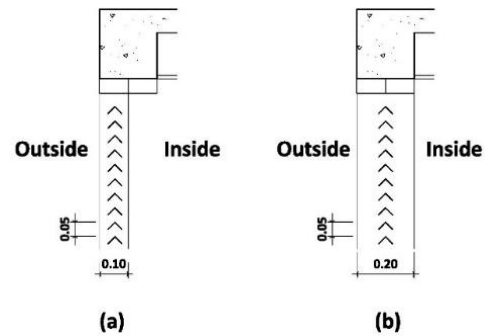


ภาพที่ 1 กล้องทดสอบ

รายละเอียดของกล่องทดสอบนี้เป็นการจำลองมาจากขนาดและระยะของอาคารเรียนมาตรฐาน ความสูงของห้อง ประมาณ 3.00 m. โดยทำการติดตั้งแผงเกล็ดบังแดดและช่องอากาศบริเวณระเบียงทางเดินของอาคาร ประมาณ 1.00 m. การกำหนดทิศทางช่องเปิดกำหนดการทดสอบ 2 รูปแบบ คือ (a) ภายนอกช่องทางลมเข้าด้านบน ภายในช่องทางลมออกด้านล่าง (b) ภายนอกช่องทางลมเข้าด้านล่าง ภายในช่องทางลมออกด้านบน (ดูภาพที่ 2) ตามหลักการไหลเวียนของอากาศจะอาศัยความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของช่องทางลมเข้าและทางลมออก คล้ายลักษณะของ Solar Chimneys [10] ซึ่งมีโพรงช่องว่างและมีช่องเปิดด้านบนและด้านล่าง โดยสังเกตการเคลื่อนที่ของอากาศทั้ง 2 ลักษณะทั้งจากด้านบนลงด้านล่าง และจากด้านล่างขึ้นด้านบน โดยจะไม่นำปัจจัยจากอิทธิพลของรังสีดวงอาทิตย์มาเป็นส่วนในการพิจารณา ส่วนขนาดของช่องเปิดทั้งทางด้านบนและด้านล่าง ขนาด 0.18 m^2 (10%) [11] การกำหนดช่องว่างอากาศของผนังกระจกชั้นนอกและชั้นใน จะเปรียบเทียบที่ระยะความกว้างช่องอากาศ 0.10 m. และ 0.20 m. (ดังภาพที่ 3)



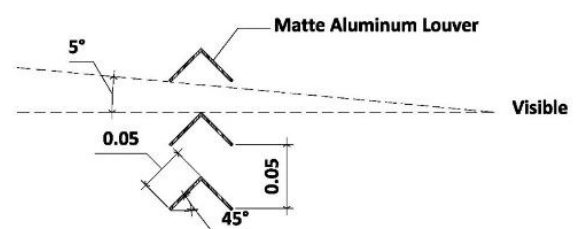
ภาพที่ 2 รูปแบบช่องทางลมเข้าของกล่องทดสอบ :
(a) ช่องทางลมเข้าด้านบน (b) ช่องทางลมเข้าด้านล่าง



ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบความแตกต่างของช่องว่างอากาศแบบ (a) 0.10 m. และแบบ (b) 0.20 m.

4.2 รายละเอียดของแผงเกล็ดบังแดด

ผนังที่ทำการทดสอบนั้น อยู่บริเวณทิศใต้ จึงเลือกใช้แผงเกล็ดบังแดดแนวนอน รูปทรง Λ (Inverted "V") ขนาด 0.5 m. (ขนาดมาตรฐานตามท้องตลาด) จำนวน 39 ชิ้น [12] แต่ละชิ้นวางห่างกัน 0.05 m. เพื่อให้เกิดช่องว่าง สำหรับการมองเห็นภายนอก ที่ระยะ 5° แผงครีบบังแดดแต่ละชิ้น มีมุมเอียง 45° และมีพื้นผิวแบบด้านที่สามารถช่วยให้เกิดการยึดเกาะของฝุ่นละอองที่ขนาดเล็กที่ผิวและมุมแหลมได้ดีกว่าแบบเรียบและแบบโค้ง (ดังภาพที่ 4) แผงกันแดดทั้งหมดติดตั้งภายในช่องว่างอากาศ โดยให้ห่างจากพื้นอาคาร ประมาณ 0.30 m. เพื่อสำหรับการซ่อมบำรุง



ภาพที่ 4 ภาพตัดขยายแผงเกล็ดบังแดด รูปทรง Λ (Inverted "V")

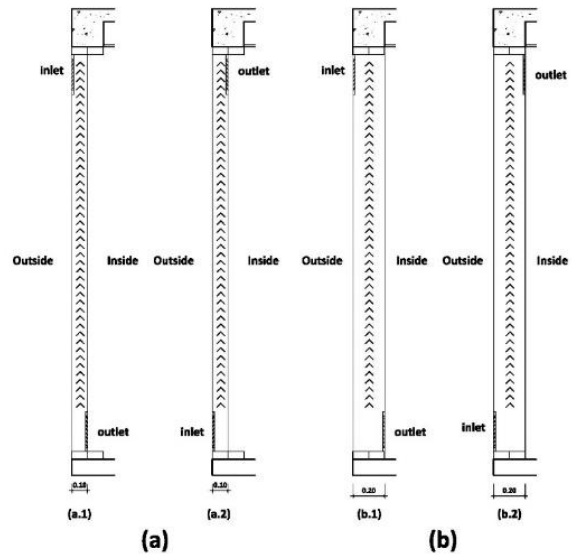
4.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

ในการจำลองกล่องทดสอบนี้ ใช้หลักการจากบทความของ Y.Ji [13], Melgaard [14], Kosutova [3], Jankovic [15] ตัวแปรที่สำคัญในการศึกษานี้จะประกอบด้วย 1) ตัวแปรต้น ได้แก่ 1.1) แผงเกล็ดบังแดดรูปทรง Λ (Inverted "V") กว้าง 0.05 m. 1.2) ความเร็วลม 2.0 m/s. [16] 1.3) ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็ก

จำนวน 100 หน่วย 2) ตัวแปรตาม ได้แก่ 2.1) ขนาดความกว้างของช่องว่างอากาศ 0.10 m. และ 0.20 m. 2.2) ตำแหน่งช่องเปิดด้านบน-ด้านล่าง

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลสภาพอากาศ TMY ของกรุงเทพมหานคร ปี 2023 ที่ตั้งอยู่บนละติจูด 5 - 12 เหนือ ลองจิจูด 96 - 106 ตะวันออกซึ่งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมาก อุณหภูมิเฉลี่ยต่อปีสูงถึง 34.7°C โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยต่อเดือนที่ 38.5°C ทิศทางลมที่พัดพาคือทิศใต้และทิศตะวันตกเฉียงใต้ ความเร็วลมเฉลี่ยต่อปีสูงถึง 2.0 m/s แสงแดดเฉลี่ยต่อปีอยู่ที่เพียง 500 W/m^2 . [17]

การประเมินผลจะใช้การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อวิเคราะห์ผลและตรวจสอบความถูกต้องผ่านโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของอากาศพลศาสตร์ Computational Fluid Dynamics (CFD) ด้วยซอฟต์แวร์ SOLIDWORKS (2023 Flow Simulation) [18], [19] ซึ่งความสามารถของโปรแกรมสามารถวิเคราะห์ได้ 2 วิธีคือ 1) การวิเคราะห์แบบภายใน (Internal) จะใช้วิเคราะห์กับของไหลในรูปทรงที่ปิดสนิท มีทางเข้า-ออกที่แน่นอน 2) การวิเคราะห์แบบภายนอก (External) จะใช้วิเคราะห์กับวัตถุที่ถูกห่อล้อมด้วยของไหล ไม่สามารถระบุการไหลเข้าและไหลออกได้ ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงใช้การวิเคราะห์แบบภายใน (Internal) ซึ่งกล่องทดสอบจะถูกกำหนดให้มีทางเข้า-ออกชัดเจน ของไหลภายในจะประกอบด้วยอากาศและฝุ่นละอองขนาดเล็ก การทดสอบด้วย CFD จะแบ่งกลุ่มทดสอบออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ประกอบด้วย a) แบบช่องว่างอากาศ 0.10 m. a.1) ทางลมเข้าด้านบน a.2) ทางลมเข้าด้านล่าง b) แบบช่องว่างอากาศ 0.20 m. b.1) ทางลมเข้าด้านบน. b.2) ทางลมเข้าด้านล่าง ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ภาพตัดของกล่องทดสอบทั้ง 4 กล่อง

5. ผลการศึกษา

5.1 พฤติกรรมการไหล

การไหลของอากาศได้รับอิทธิพลจากแรงขับเคลื่อนซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งแรงเฉื่อยหรือแรงลอยตัว การใช้ส่วนประกอบทางกลที่สำคัญ รวมทั้งแรงลมจากพัดลมและแรงลมตามธรรมชาติ มีศักยภาพในการสร้างแรงเฉื่อยให้เกิดขึ้น Reynolds จำแนกลักษณะของการไหลออกเป็นสามประเภท 1) ปั่นป่วน (Turbulent) 2) ไม่แน่นอน (Transition) และ 3) ราบเรียบ (Laminar) ความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นตัวการหลักในการลอยตัวในช่องอากาศเนื่องจากทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของอากาศซึ่งส่งผลให้เกิดการลอยตัวในที่สุด คุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่ควรพิจารณาในสถานการณ์ที่ไม่มีอุณหภูมิความร้อนคืออัตราส่วนกว้างยาวของช่องอากาศ (ความสูง/ความกว้าง) ซึ่งแยกความแตกต่างระหว่างช่องอากาศแคบและกว้าง ในช่องอากาศแคบ ๆ ชั้นขอบเขตจะรวมกันเพื่อสร้างโปรไฟล์ความเร็วที่พัฒนาเต็มที่ ในทางตรงกันข้ามในช่องอากาศขนาดใหญ่ ชั้นขอบเขตจะไม่เกิดปฏิกิริยาใด ๆ ดังนั้นช่องอากาศที่แคบและกว้างจึงแตกต่างกันในแง่ของการถ่ายเทความร้อนและการกระจายตัวของกระแสลม

5.2 ผลกระทบของขนาดความกว้างของช่องว่างอากาศ

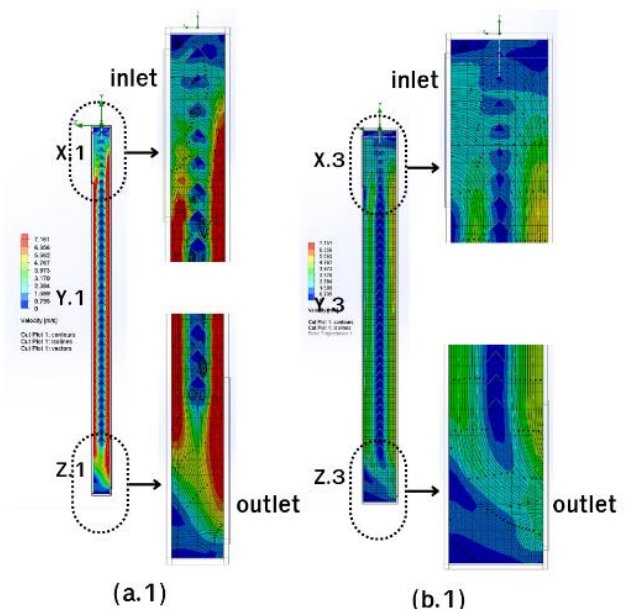
จากการทดลอง ได้กำหนดช่องอากาศไว้ 2 ขนาด คือ

ขนาดความกว้าง 0.10 m. และ 0.20 m. (เพิ่มขนาดความกว้างขึ้น 100%) ตามภาพที่ 6 กรณีที่ 1 (a.1) และ (b.1) ที่มีลักษณะการเข้า - ออกของช่องเปิดช่อง inlet ด้านบน ช่อง outlet ด้านล่าง กำหนดให้ตำแหน่งช่องทางลมเข้า x.1 และ x.3 มีความเร็วลมเข้าที่ 2.00 m/s ความแปรปรวนของกระแสลมเมื่อผ่านช่องเปิดของตำแหน่ง x.1 มีค่าสูงกว่า กระแสลมที่ไหลลงเรียบผนังกระຈจะมีความเร็วที่สูงขึ้นระดับโซนสีแดง (6.35 m/s - 7.15 m/s) ในขณะตำแหน่ง x.3 ความเร็วลมจะสูงขึ้นเล็กน้อยระดับโซนเหลือง (3.97 m/s - 4.76 m/s) เปรียบเทียบสเกลสีในภาพที่ 8) ค่า U/U_{ref} ที่ตำแหน่ง $x.1 > x.3 = 0.5$ เท่า ส่วนบริเวณแผงเกล็ดบังแดดจะเป็นจุดอับลม และเกิดการหมุนวนของกระแสลมบริเวณใต้แผงกันแดดทุกตัว เมื่อพิจารณาตำแหน่ง y.1 และ y.3 บริเวณกึ่งกลางช่องทางอากาศพบว่าความเร็วลมมีความต่อเนื่องมาจากตำแหน่ง x.1 และ x.3 และสุดท้ายพิจารณาตำแหน่ง z.1 และ z.3 ซึ่งเป็นช่องทางลมออก ความเร็วลมจะมีรูปแบบเหมือนกับตำแหน่ง y.1 และ y.3

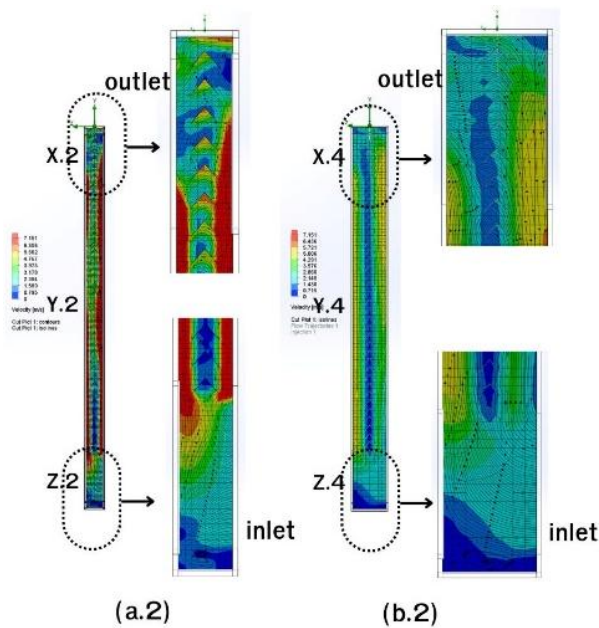
จากนั้นเมื่อพิจารณา กรณีที่ 2 (a.2) และ (b.2) ตามภาพที่ 7 ที่มีลักษณะการเข้า-ออกของช่องเปิดช่อง inlet ด้านล่าง ช่อง outlet ด้านบน จะพบว่ากระแสลมที่เคลื่อนที่ภายในช่องอากาศจะมีลักษณะคล้ายกับกรณีที่ 1 คือบริเวณตำแหน่ง ช่องทางลมเข้า z.2 และ z.4 แบบ (a.2) จะมีรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสลมคล้ายกับแบบ (a.1) กระแสลมจะเริ่มแปรปรวนเมื่อไหลผ่านแผงเกล็ดบังแดดแต่จะน้อยกว่า เกิดจุดอับลมน้อยกว่าและจะเพิ่มความเร็วสูงขึ้นจนถึงระดับโซนสีแดง (6.35 m/s - 7.15 m/s) (เปรียบเทียบสเกลสีในภาพที่ 8) จนถึงตำแหน่ง x.2 ที่เป็นช่องทางลมออก ส่วนแบบ (b.2) รูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสลมคล้ายกับแบบ (b.1) เช่นกัน ตามภาพที่ 6

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าขนาดความกว้างช่องอากาศที่แตกต่างกันส่งผลถึงความเร็วลมภายในช่องอากาศอย่างมีนัยสำคัญ การลดขนาดความกว้างของช่องอากาศ 1 เท่าตัว จาก 0.20 m เหลือ 0.10 m. จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วลม (บริเวณกึ่งกลางช่องทางอากาศ ริมผนังกระຈทั้งซ้ายและขวา) มากถึง 0.5 เท่า ความเร็วลมที่สูงขึ้นในช่องทางอากาศนี้น่าจะเป็นผลมาจากขนาดของช่องทางอากาศที่มีขนาดแคบลง กระแสลมที่ไหลผ่านเกิด

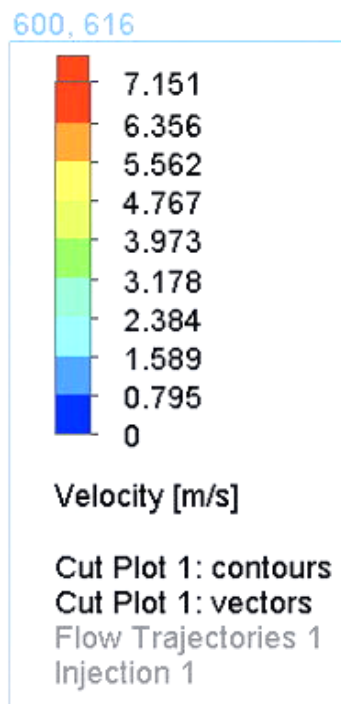
การปะทะกับแผงเกล็ดบังแดด ทำให้เกิดการเกิดการหมุนวนของกระแสลมภายในช่องว่างอากาศที่แคบเป็นการทำให้เกิดปฏิกิริยาเร่งความเร็วเกิดขึ้น (สังเกตจากรูปสรในการเคลื่อนที่ของกระแสลม ตามภาพที่ 9) และเมื่อกระแสลมไหลผ่านมาถึงบริเวณตำแหน่งช่องทางลมออก ความเร็วลมจะลดลงมาใกล้เคียงกับช่องทางลมเข้า โดยขนาดของช่องว่างอากาศจะไม่มีผลต่อความเร็วลมบริเวณช่องทางลมออก [20], [21] ช่องว่างอากาศที่แคบจะส่งผลให้ความเร็วลมภายในเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าช่องว่างอากาศที่กว้าง ถ้าต้องการให้ความเร็วลมภายในช่องว่างอากาศไหลแบบราบเรียบ แนะนำควรเพิ่มขนาดของช่องว่างอากาศให้กว้างขึ้น ถ้าต้องการให้ความเร็วลมภายในช่องว่างอากาศเคลื่อนที่เร็วขึ้น แนะนำควรลดขนาดของช่องว่างอากาศให้แคบลง ซึ่งวิธีการเพิ่ม-ลดขนาดช่องว่างอากาศจึงเป็นกลยุทธ์ที่ใช้ควบคุมความเร็วลมได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 6 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในกล่องทดสอบ (a.1) และ (b.1) ขยายบริเวณ x.1กับx.3 และ z.1กับ z3



ภาพที่ 7 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในกล่องทดสอบ (a.2) และ (b.2) ขยายบริเวณ x.2 กับ x.4 และ z.2 กับ z.4



ภาพที่ 8 แสดงค่าความเร็วลมตามสเกลสี (Velocity, m/s) ภายในกล่องทดสอบ ด้วยซอฟต์แวร์ SOLIDWORKS 2023 (Flow Simulation)

5.3 ผลกระทบของตำแหน่งช่องเปิด

การกำหนดตำแหน่งของช่องเปิด จะมีผลกับรูปแบบการเคลื่อนที่ของกระแสลมภายในช่องว่างอากาศและจุดอับลม เมื่อกระแสลมพัดผ่านเข้าช่องเปิด จะเคลื่อนที่ไปตามช่องว่างอากาศไปสู่ทางออก สามารถคำนวณได้ตามสมการ (1) และ (2) สำหรับในการทดลองนี้ได้ทดสอบและเปรียบเทียบระหว่างแบบที่ 1 ช่องเปิดลมเข้าด้านบน ช่องเปิดลมออกด้านล่าง (a.1) และ (b.1) แบบที่ 2 ช่องเปิดลมเข้าด้านบน ช่องเปิดลมออกด้านล่าง (a.2) และ (b.2) ส่วนขนาดของช่องเปิดทั้งทางด้านบนและด้านล่างขนาด 0.18 m^2 (10%) จากตารางที่ 1 พบว่าเมื่อกำหนดให้ความเร็วลมเข้าที่ 2.00 m/s กล่องทดสอบ (a.1) และ (b.1) ที่มีช่องเปิดลมเข้าด้านบน จะมีค่าความเร็วลมที่ช่องเปิดทางออกด้านล่างสูงกว่ากล่องทดสอบที่มีช่องเปิดลมเข้าด้านล่าง ช่องเปิดลมออกด้านบนเล็กน้อย (a.2) และ (b.2) ประมาณไม่เกิน 3.22% เท่านั้น ซึ่งไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการระบายอากาศ [21]

อีกประการหนึ่งที่มีความสำคัญคือจุดอับลมภายในช่องว่างอากาศ การติดตั้งแผงเกล็ดบังแดดภายในช่องว่างอากาศ รวมถึงบริเวณมุมของกล่องทดสอบจะเป็นจุดอับลม กระแสลมที่เคลื่อนตัวจากล่างขึ้นบน ที่มีความเร็วเฉลี่ยประมาณ 5 m/s และมีช่องว่างอากาศที่ 0.10 m . (a.2) จะมีจุดอับลมน้อยกว่าแบบอื่น ๆ ตามภาพที่ 6 และ 7 และสามารถเทียบความเร็วลมตามสเกลสี ตามภาพที่ 8

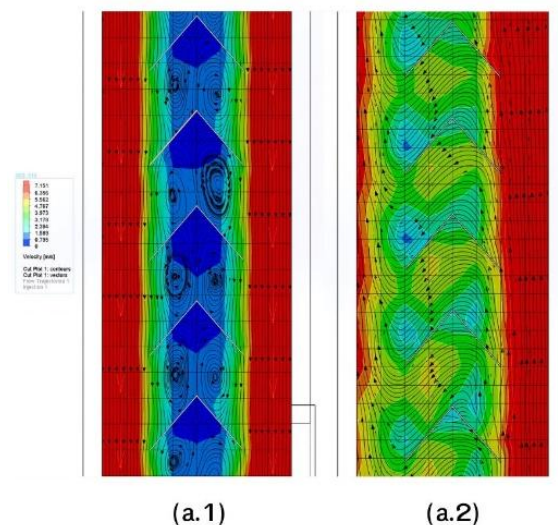
ตารางที่ 1 อัตราความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นภายในช่องว่างอากาศ

กล่องทดสอบ	ช่องลมเข้า (m/s)	ช่องลมออก (m/s)	ความเร็วที่เพิ่มขึ้น(เท่า)
(a.1)	2.00	6.45	3.22
(a.2)	2.00	5.28	2.64
(b.1)	2.00	3.89	1.95
(b.2)	2.00	3.86	1.93

5.4 ผลกระทบของแผงเกล็ดบังแดดที่มีผลต่อการไหลของอากาศ

ปัจจัยที่ส่งผลถึงการไหลของอากาศ ภายในช่องว่างอากาศนั้น สามารถหาได้จากการคำนวณ ตามสมการที่ (4) และ (5) หรือจากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ การติดตั้งแผงเกล็ดบังแดดที่มีรูปทรง Λ (Inverted “V”) ถือว่าเป็นอุปสรรคสำคัญที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของกระแสลมและยังเป็นจุดอับลมด้วย ซึ่งพื้นที่อับลมขนาดเล็กนี้จะเกิดการหมุนวนของอากาศที่เคลื่อนที่ระหว่างแผงเกล็ดบังแดดแต่ละชั้น [22] ส่วนพื้นที่ด้านข้างแผงเกล็ดบังแดดอากาศจะสามารถไหลเวียนไปตามแนวนิ่ง เพื่อไปยังตำแหน่งช่องทางออก แต่มีจุดสังเกตพบว่าบริเวณแผงเกล็ดบังแดดของ (a.1) จะมีความแปรปรวนของกระแสลมมากกว่ากล่องทดสอบทั้ง 3 แบบที่เหลือ ซึ่งเป็นผลมาจากความสัมพันธ์ของความกว้างของช่องอากาศและความเร็วลมที่สูงกว่า ตามภาพที่ 9 ส่วนกรณี (a.2) จะเห็นได้ว่าจุดอับลมนั้นมีปริมาณลดลงเพราะกระแสลมไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบนในความเร็วที่เหมาะสมจะสามารถลดจุดอับลมที่เกิดขึ้นได้

ข้อสรุปเรื่องรูปทรงของแผงเกล็ดบังแดดจะมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของกระแสลมภายในช่องอากาศเป็นอย่างมาก รูปทรงที่เป็นเรขาคณิตที่มีความโค้งมนจะสร้างพื้นที่ที่มีจุดอับลมน้อยกว่ารูปทรงที่เป็นเหลี่ยม รวมถึงการวางตำแหน่งภายในช่องว่างอากาศและมุมของแผงเกล็ดบังแดดเป็นประเด็นที่จะต้องนำมาประกอบการพิจารณาทั้งสิ้น [13], [23]



ภาพที่ 9 ขยายพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในช่องว่างอากาศขนาดความกว้าง 0.10 m. แบบ (a.1) และ (a.2)

5.5 การกักเก็บฝุ่นละอองขนาดเล็กที่ตกค้างในช่องว่างอากาศ

ความเร็วลมที่เคลื่อนที่ภายในช่องว่างอากาศจะส่งผลกระทบอย่างมากต่อประสิทธิภาพการรวบรวมฝุ่นละอองขนาดเล็ก จากผลการศึกษาเกี่ยวกับความเร็วลมภายในช่องว่างอากาศเพื่อการควบคุมอุณหภูมิด้วยผนัง DSF พบว่าความเร็วลมภายในช่องว่างอากาศที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 0.20 - 0.39 m/s ภายใต้สภาวะแวดล้อมปกติ [23] การทำนายผลการกักเก็บปริมาณฝุ่นละอองที่ตกค้างภายในช่องว่างอากาศ โดยใช้คุณสมบัติ Particle Studies ของซอฟต์แวร์ SOLIDWORKS) 2023 Flow Simulation (ตามหลักการของ Rahman & Kabir [24] กำหนดค่า Number of Particle is 100 unit, Particles Properties : size 0.0001m, Pre-Defined : Gravel based soil, Mass Flow Rate : 1kg/s, Initial Particle Velocity : 2 m/s, Temperature 34°C

จากตารางที่ 2 แสดงค่าปริมาณของฝุ่นละอองขนาดเล็กที่ตรวจวัดได้บริเวณพื้นผิวทางลมออกของกล่องทดสอบทั้ง 4 แบบ พบว่าบริเวณพื้นผิวทางลมออกของกล่องทดสอบ (a.2) มีปริมาณของฝุ่นละอองขนาดเล็กในปริมาณ 76% จาก 100% แสดงว่ากล่องทดสอบ (a.2) สามารถกักกรองปริมาณของฝุ่นละอองขนาดเล็กให้ตกค้างในช่องว่างอากาศได้มากถึง 24% ซึ่งสามารถ

คาดการณ์ได้ว่าเกิดจากความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญของขนาดช่องว่างอากาศที่มีขนาดแคบ ส่งผลให้เกิดความเร็วลมที่มีความเร็วสูงเคลื่อนที่ในแนวดิ่งตามแนวผนังกระจก การเกิดจุดอับลมมีจำนวนน้อย ทำให้ฝุ่นละอองขนาดเล็กกระจายตัวตกหล่นภายในช่องอากาศมากกว่าแบบอื่น ๆ [25]

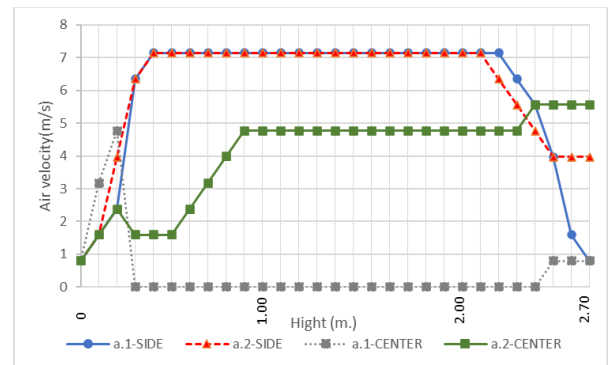
ตารางที่ 2 จำนวนฝุ่นละอองขนาดเล็กที่บริเวณช่องทางลมออก

กล่องทดสอบ	จำนวนอนุภาคทางช่องลมเข้า (%)	จำนวนอนุภาคทางช่องลมออก (%)	จำนวนอนุภาคที่ตกค้างในช่องอากาศ (%)
(a.1)	100	80	20
(a.2)	100	76	24
(b.1)	100	85	15
(b.2)	100	83	17

5.6 อิทธิพลของแผงเกล็ดบังแดดที่มีต่อการเคลื่อนที่ของกระแสลมภายในกล่องทดสอบ

เมื่อทำการวิเคราะห์ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอากาศภายในช่องว่างอากาศ ที่มีความกว้าง 0.10 m. ในตำแหน่งใกล้เคียงกับผนังกระจกและกึ่งกลางแผงเกล็ดบังแดด เปรียบเทียบกันระหว่าง a.1 และ a.2 ตามภาพที่ 10 พบว่าบริเวณริมผนังกระจก (a.1-side และ a.2-side) ความเร็วของกระแสลมจะถูกบีบเค้นให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น ซึ่งทั้งแบบ a.1 และ a.2 มีความเร็วลมที่ใกล้เคียงกัน จะแตกต่างกันตรงบริเวณทางเข้า-ออก ที่แบบ a.1-side จะมีความเร็วลมที่ลดลงมากกว่าแบบ a.2-side แต่เมื่อพิจารณาตำแหน่งกึ่งกลางแผงเกล็ดบังแดด (a.1-center และ a.2-center) จะพบว่าแบบ a.2-center จะมีประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของกระแสลมดีกว่าแบบ a.1-center อย่างมาก เพราะมีกระแสลมที่เคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นด้านบน กระแสลมจะไหลผ่านแผงเกล็ดบังแดดแต่ละชั้นได้อย่างง่าย ซึ่งแผงเกล็ดบังแดดในช่องว่างของกระจกนี้เป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อความเร็วลม

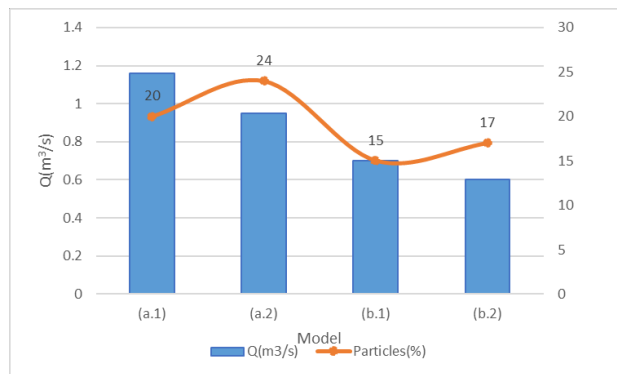
ภายในกล่องทดสอบอย่างมาก การติดตั้งแผงเกล็ดแบบไม่เกิดจุดอับลม สามารถช่วยแก้ปัญหาความเร็วลมภายในช่องอากาศได้ ตามหลักทฤษฎีการระบายอากาศแบบ Cross Ventilation [3], [26], [27]



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบความเร็วของกระแสลมภายในช่องว่างอากาศ a.1 และ a.2 ที่บริเวณริมผนังและกึ่งกลางผนัง จำนวน 4 ตำแหน่ง

5.7 อัตราการระบายอากาศกับขนาดความกว้างของช่องว่างอากาศและตำแหน่งลมเข้า-ออก

จากภาพที่ 11 การประเมินการกักเก็บปริมาณฝุ่นละอองที่ตกค้างภายในช่องว่างอากาศ พบว่าการเปิดช่องเปิดด้านล่างขึ้นบน ในขนาดความกว้างของช่องว่างอากาศ 0.10 m. (a.2) จะเป็นรูปแบบที่ช่วยกักเก็บฝุ่นละอองขนาดเล็กได้มากถึง 24% โดยวัดจากปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กบริเวณพื้นที่ทางลมออก โดยปราศจากเครื่องกลช่วย ส่วนอัตราการระบายอากาศ (Q) ภายในกล่องทดสอบ (a.1) จะมีค่ามากที่สุด ประมาณ 1.16 m³/s ในขณะที่กล่องทดสอบ (b.2) จะมีค่าน้อยสุดประมาณ 0.69 m³/s ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของช่องเปิดที่ต่างกัน รวมถึงช่องเปิดที่อยู่ด้านบนจะให้แรงดันขับเคลื่อนการไหลได้ดีกว่าช่องเปิดทางเข้าที่อยู่ด้านล่าง [26], [28] สามารถสังเกตได้จากกล่องทดสอบทั้ง (a.2) และ (b.2) จะมีอัตราการระบายอากาศที่ต่ำกว่า (a.1) และ (b.1)



ภาพที่ 11 อัตราการระบายอากาศ (Q) และการตกค้างของอนุภาคในห้องทดสอบทั้ง 4 กล้อง

6. สรุปและอภิปรายผล

การศึกษาโดยวิธีการทำนายการไหลเวียนของอากาศและฝุ่นละอองขนาดเล็กผ่านแผงเกล็ดบังแดดภายในช่องว่างอากาศ โดยผ่านโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของอากาศพลศาสตร์ Computational Fluid Dynamics (CFD) ด้วยซอฟต์แวร์ SOLIDWORKS 2023 (Flow Simulation) นั้น มีจุดมุ่งหมายที่สำคัญเพื่อที่จะเสนอแนวคิดในการปรับปรุงระบบผนังอาคารที่สามารถป้องกันความร้อนจากดวงอาทิตย์และกักกรองฝุ่นละอองขนาดเล็กได้ในเบื้องต้นได้ โดยศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อกระบวนการออกแบบได้แก่ ความเร็วลม การกำหนดตำแหน่งช่องเปิด ความกว้างของช่องว่างอากาศ ซึ่งผลการศึกษาค้นพบประเด็นสำคัญดังนี้

- ขนาดความกว้างช่องอากาศที่แตกต่างกันส่งผลถึงความเร็วลมที่เกิดขึ้นภายในช่องอากาศอย่างมีนัยสำคัญ ช่องว่างอากาศที่มีขนาดแคบและยาวจะช่วยสร้างแรงดันอากาศให้เพิ่มขึ้น ส่วนช่องว่างอากาศที่มีขนาดกว้างจะช่วยให้การไหลของกระแสลมเป็นไปอย่างราบเรียบไม่มีการหมุนวนของอากาศ

- ตำแหน่งทางเข้า-ทางออก แบบบนลงล่างจะก่อให้เกิดจุดอับลมภายในช่องว่างอากาศมากกว่าแบบล่างขึ้นบน ประมาณ 20% โดยเฉพาะบริเวณตามมุมของกล่องทดสอบ ผนังที่มีลักษณะทรงโค้งมนจะช่วยให้กระแสลมไหลผ่านได้ดีขึ้นและสามารถลดจุดอับลมให้น้อยลงได้

- รูปทรงของแผงเกล็ดบังแดดจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของกระแสลมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะรูปทรงเรขาคณิตที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม จะก่อให้เกิดการแปรปรวนของ

กระแสลม ในกรณีศึกษาแผงเกล็ดบังแดดที่มีรูปทรง Λ (Inverted “V”) นั้นเป็นรูปทรงที่ให้ประสิทธิภาพการบังแดดที่ดี แต่จะมีปัญหาเกี่ยวกับการระบายอากาศเนื่องจากมีมุมแหลมจะก่อให้เกิดจุดอับลมและมีกระแสลมแปรปรวนบริเวณใต้แผงเกล็ดบังแดดทุกชิ้น ซึ่งถ้าแรงลมภายในช่องว่างอากาศไม่มีความเร็วมากพอ ก็จะทำให้ไม่เกิดการเหนี่ยวนำอากาศจากภายนอกเข้ามา การแก้ไขอาจจะต้องพิจารณาถึงการใช้เครื่องกลเข้ามาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว

ข้อค้นพบจากการศึกษาทั้งหมดนี้เป็นการประเมินด้วยโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของอากาศพลศาสตร์ Computational Fluid Dynamics (CFD) ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ทดสอบนี้เป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อการออกแบบทางสถาปัตยกรรมและวิศวกรรม สามารถนำไปใช้ในการวิจัยและพัฒนากระบวนการออกแบบผนังเปลือกอาคารให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นต่อไปในอนาคต

7. ข้อจำกัดงานวิจัย

ซอฟต์แวร์ SOLIDWORKS 2023 (Flow Simulation) เป็นซอฟต์แวร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ในการสร้างและทดสอบชิ้นงานในส่วนของการเคลื่อนที่ของกระแสลมและฝุ่นละออง แต่มีข้อจำกัดบางประการในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ที่ไม่อิสระและรายงานสรุปผลบางหัวข้อระบุรายละเอียดไม่ครบถ้วน ทำให้ต้องจัดบันทึกระหว่างการทดสอบตลอดเวลา

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่เอื้อเพื่อในการอนุญาตให้ใช้ซอฟต์แวร์ SOLIDWORKS) 2023 Flow Simulation (จนทำให้การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

9.บรรณานุกรม

- [1] A. Juaidi, F. AlFaris, F. Saeed, E. Salmeron-Manzano, and F. Manzano-Agugliaro, “Urban design to achieving the sustainable energy of residential neighbourhoods in arid climate,” *J. Clean. Prod.*, vol. 228, pp. 135–152, (2019).
- [2] M. Dhimal et al., “Impact of air pollution on global burden of disease in 2019,” *Processes*, vol. 9, no. 10, pp. 1–9, (2021).
- [3] K. Kosutova, T. van Hooff, C. Vanderwel, B. Blocken, and J. Hensen, “Cross-ventilation in a generic isolated building

- equipped with louvers: Wind-tunnel experiments and CFD simulations,” *Build. Environ.*, vol. 154, no. March, pp. 263–280, (2019).
- [4] S. Matour, V. Garcia-Hansen, S. Omrani, S. Hassanli, and R. Drogemuller, “Wind-driven ventilation of Double Skin Façades with vertical openings: Effects of opening configurations,” *Build. Environ.*, vol. 196, no. December 2020, p. 107804, (2021).
- [5] J. Ahmadi, M. Mahdavejad, O. K. Larsen, C. Zhang, A. Zarkesh, and S. Asadi, “Evaluating the different boundary conditions to simulate airflow and heat transfer in Double-Skin Facade,” *Build. Simul.*, vol. 15, no. 5, pp. 799–815, (2022).
- [6] P. Arabi, M. R. Hamidpour, M. Yaghoubi, and F. Arabi, “Computational analysis of blind performance on natural ventilated double skin façade in winter,” *Energy*, vol. 268, p. 126719, (2023).
- [7] X. Cao, J. Liu, N. Jiang, and Q. Chen, “Particle image velocimetry measurement of indoor airflow field: A review of the technologies and applications,” *Energy Build.*, vol. 69, pp. 367–380, (2014).
- [8] S. Holmberg and Q. Chen, “Air flow and particle control with different ventilation systems in a classroom,” *Indoor Air*, vol. 13, no. 2, pp. 200–204, (2003).
- [9] nguyen lu Phuong and K. Ito, “Experimental and numerical study of airflow pattern and dispersion in a vertical ventilation dust,” *Build. Environ.*, vol. 59, pp. 466–481, (2013).
- [10] Y. Tao, X. Fang, M. Y. L. Chew, L. Zhang, J. Tu, and L. Shi, “Predicting airflow in naturally ventilated double-skin facades: theoretical analysis and modelling,” *Renew. Energy*, vol. 179, pp. 1940–1954, (2021).
- [11] D. D. Kim, “Computational fluid dynamics assessment for the thermal performance of double-skin façades in office buildings under hot climatic condition,” *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, vol. 42, no. 1, pp. 45–61, (2021).
- [12] V. Kitio, F. M. Butera, R. Adhikari, and N. Aste, *SUSTAINABLE BUILDING Principles and Applications for Eastern Africa*. (2014).
- [13] Y. Ji, M. J. Cook, V. Hanby, D. G. Infield, D. L. Loveday, and L. Mei, “CFD modelling of naturally ventilated double-skin facades with venetian blinds,” *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 1, no. 3, pp. 185–196, (2008).
- [14] S. P. Melgaard, I. T. Nikolaisson, C. Zhang, H. Johra, and O. K. Larsen, “Double-skin façade simulation with computational fluid dynamics: A review of simulation trends, validation methods and research gaps,” *Build. Simul.*, vol. 16, no. 12, pp. 2307–2331, (2023).
- [15] A. Jankovic and F. Goia, “Impact of double skin facade constructional features on heat transfer and fluid dynamic behaviour,” *Build. Environ.*, vol. 196, no. November 2020, p. 107796, (2021).
- [16] P. Cheewinsirawat, C. Duangyiwa, M. Sukitpaneemit, and M. E. J. Stettler, “Influence of Land Use and Meteorological Factors on PM2.5 and PM10 Concentrations in Bangkok, Thailand,” *Sustain.*, vol. 14, no. 9, (2022).
- [17] V. President, A. Renewable, E. Development, and P. Foundation, “THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF PARABOLIC TROUGH 300 kW POWER PLANT FOR SOFT-LAND , MEDIUM INSOLATION AND A2-S5 A2-S5 SolarPaces2006,” *Energy*, no. May, pp. 1–19, (2020).
- [18] S. Ljung, “CFD simulation of particle matter inside an automotive car and the purification efficiency of cabin air purifier,” (2019).
- [19] M. Rodríguez-Martín, P. Rodríguez-Gonzálvez, A. S. Patrocinio, and J. R. S. Martín, “Short simulation activity to improve the competences in the Fluid-mechanical Engineering classroom using Solidworks Flow Simulation,” *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, pp. 72–79, (2019).
- [20] E. Mignot, W. Cai, and N. Riviere, “Analysis of the transitions between flow patterns in open-channel lateral cavities with increasing aspect ratio,” *Environ. Fluid Mech.*, vol. 19, no. 1, pp. 231–253, (2019).
- [21] M. Rahiminejad and D. Khovalyg, “Review on ventilation rates in the ventilated air-spaces behind common wall assemblies with external cladding,” *Build. Environ.*, vol. 190, p. 107538, (2021).
- [22] J. Zheng, Q. Tao, and Y. Chen, “Airborne infection risk of inter-unit dispersion through semi-shaded openings: A case study of a multi-storey building with external louvers,” *Build. Environ.*, vol. 225, no. June, p. 109586, (2022).
- [23] Y. Ye, P. Xu, J. Mao, and Y. Ji, “Experimental study on the effectiveness of internal shading devices,” *Energy Build.*, vol. 111, pp. 154–163, (2016).
- [24] R. R. Rahman and A. Kabir, “Spatiotemporal analysis and forecasting of air quality in the greater Dhaka region and assessment of a novel particulate matter filtration unit,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 195, no. 7, (2023).
- [25] H. C. Burridge *et al.*, “The ventilation of buildings and other mitigating measures for COVID-19: A focus on wintertime,” *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 477, no. 2247, pp. 1–62, (2021).
- [26] N. Nasrollahi and P. Ghobadi, “Field measurement and numerical investigation of natural cross-ventilation in high-rise buildings; Thermal comfort analysis,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 211, no. March, p. 118500, (2022).
- [27] X. Fu, V. C. Tai, L. K. Moey, N. F. Abd Rahman, K. A. Ahmad, and D. Baglee, “Opening configurations and natural cross ventilation performance in a double-loaded multi-level

apartment building: A CFD analysis,” *Build. Environ.*, vol. 254, no. March, p. 111404, (2024).

- [28] Naksanee W. Prommas R*. An Experimental Investigation on the Efficiency of Snail Entry in Vortex Tube Fed Low Inlet Air Pressure to Reduce Temperature of Low-Pressure Air. *International Journal of Heat and Technology*.36(4) pp.1223-1232)IF=1.01) (2018).

การทำนายระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับ
แบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ ด้วยการวิเคราะห์แบบถดถอย
Prediction of deflection of composite plate with two opposite edges
clamped and other two edges free using regression analysis

กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข*, ปิยะพันธ์ ธรรมปัญญา

พงษ์นุกร ไทยะ

Kullasup Phongsrisuk*, Piyapan Thammapanya

Pongnukorn Thaiya

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 50300 ประเทศไทย
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Lanna 50300, Thailand

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

(Received: April 28, 2025, Revised: May 19, 2025, Accepted: June 4, 2025)

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ ภายใต้ภาระแบบกระจายสม่ำเสมอ โดยใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยไม่เชิงเส้นเพื่อทำนายระยะการแอ่น โดยพิจารณาพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ อัตราส่วนทางเรขาคณิต และรูปแบบการเรียงตัวของเส้นใย แบบจำลองการวิเคราะห์แบบถดถอยถูกพัฒนาจากข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ในช่วงอัตราส่วนทางเรขาคณิต 1:1 ถึง 5:1 และรูปแบบการเรียงตัวของเส้นใยแบบ $[0]_4$, $[0/90]_s$, $[90/0]_s$ และ $[90]_4$ จากผลการวิจัยพบว่า แบบจำลองการวิเคราะห์แบบถดถอยไม่เชิงเส้นสามารถทำนายระยะการแอ่นได้อย่างแม่นยำโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมากกว่า 0.95 และสามารถอธิบายความสัมพันธ์เชิงซ้อนของพารามิเตอร์ได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ สมการที่มีจำนวนพารามิเตอร์น้อย เช่น สมการกำลังหรือสมการเลขชี้กำลัง มีความเหมาะสมมากกว่าสำหรับการใช้งานจริง เนื่องจากลดความเสี่ยงจากการโอเวอร์ฟิต และสะดวกต่อการตีความทางวิศวกรรม งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์แบบถดถอยไม่เชิงเส้นเป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพในการออกแบบโครงสร้างคอมโพสิตที่ต้องการควบคุมการเสียรูปอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การวิเคราะห์แบบถดถอย แผ่นวัสดุคอมโพสิต ระยะการแอ่น ไฟไนต์เอลิเมนต์

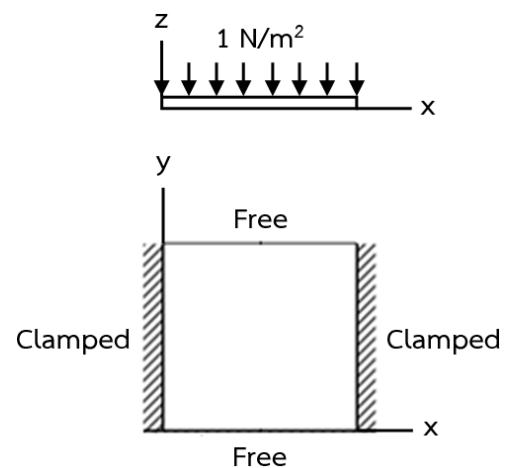
Abstract: This research aimed to analyze the deflection of composite plates with two opposite edges clamped and the other two edges free under uniformly distributed load. Nonlinear regression analysis was employed to predict the deflection by considering essential parameters, namely the geometric ratio and fiber orientation patterns. The regression analysis model was developed based

on data obtained from finite element software simulations within a geometric ratio range of 1:1 to 5:1 and fiber orientation patterns of $[0]_4$, $[0/90]_s$, $[90/0]_s$, and $[90]_4$. The results indicated that the nonlinear regression analysis model could accurately predict the deflection, achieving a coefficient of determination greater than 0.95, and was able to capture the complex relationships among the parameters effectively. Moreover, equations with fewer parameters, such as the power and exponential equations, were more suitable for practical applications, as they reduced the risk of overfitting and were convenient for engineering interpretation. This research demonstrated the nonlinear regression analysis model as a powerful tool for designing composite structures that require precise deformation control.

Keywords: Regression analysis, Composite plate, Deflection, Finite Element

1. บทนำ

แผ่นวัสดุคอมโพสิตถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโครงสร้าง อากาศยาน และยานยนต์ เนื่องจากมีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูง[1] การวิเคราะห์พฤติกรรมของแผ่นวัสดุคอมโพสิตภายใต้สภาวะต่าง ๆ เป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้าง[2] ระยะเวลาอันเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการออกแบบแผ่นวัสดุคอมโพสิตให้มีความแข็งแรงและทนทานต่อการเสียรูป การวิเคราะห์ระยะการแอ่นช่วยให้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งานของแผ่นวัสดุคอมโพสิตได้ โดยการเลือกวัสดุและการออกแบบที่เหมาะสมเพื่อให้แผ่นวัสดุคอมโพสิตสามารถรับภาระได้อย่างมีประสิทธิภาพ การควบคุมการเสียรูปของแผ่นวัสดุคอมโพสิตเป็นสิ่งสำคัญในการรักษาความปลอดภัยของโครงสร้างและอุปกรณ์ที่ใช้แผ่นวัสดุคอมโพสิต นอกจากนี้การออกแบบแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีประสิทธิภาพยังช่วยลดต้นทุนการผลิตและการบำรุงรักษา เนื่องจากสามารถลดการเสียรูปและการเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้



ภาพที่ 1 แผ่นคอมโพสิตที่มีการรองรับแบบ CFCF

อย่างไรก็ตาม การคำนวณระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ (CFCF) ภายใต้ภาระแบบกระจายสม่ำเสมอ (ภาพที่ 1) มีความซับซ้อนสูง จึงจำเป็นต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เช่น ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) แต่ระยะการแอ่นที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะไม่อยู่ในรูปของสมการ ทำให้ในทางปฏิบัติที่มีการนำแผ่นวัสดุคอมโพสิตมาใช้ที่อัตราส่วนทางเรขาคณิต (Aspect ratio) ต่าง ๆ ต้องหาระยะการแอ่นจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใหม่ [3] การวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression analysis) เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างตัวแปรตาม (Dependent variable) และตัวแปรอิสระ (Independent variable) เพื่อทำนายผลลัพธ์ของตัวแปรตามจากค่าของตัวแปรอิสระในสถานการณ์ต่าง ๆ ทำให้ทราบอิทธิพลของตัว

แปรอิสระต่าง ๆ ที่มีต่อตัวแปรตาม และเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้อย่างชัดเจน[4] การวิเคราะห์แบบถดถอยจึงเป็นวิธีการที่น่าสนใจและมีประโยชน์อย่างมากในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและการทำนายผลลัพธ์ในสถานการณ์ต่าง ๆ

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยในการทำนายระยะการแอ่นซึ่งเป็นตัวแปรตาม จากค่าของอัตราส่วนทางเรขาคณิตซึ่งเป็นตัวแปรอิสระของแผ่นวัสดุไอโซทรอปิก (Isotropic plate) ที่มีขอบสามด้านรองรับแบบปล่อยอิสระและขอบอีกหนึ่งด้านรองรับแบบยึดแน่น (CFFF) ขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบปล่อยอิสระและขอบอีกสองด้านรองรับแบบยึดแน่นและแบบอย่างง่าย (CFSF) ขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบปล่อยอิสระและขอบอีกสองด้านรองรับแบบอย่างง่าย (SFSF)[5] รวมถึงแผ่นคอนกรีตที่มีขอบสี่ด้านรองรับแบบอย่างง่าย (SSSS)[6] และแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสี่ด้านรองรับแบบยึดแน่น (CCCC)[3] และขอบสามด้านรองรับแบบยึดแน่นและขอบอีกหนึ่งด้านรองรับแบบปล่อยอิสระ (CCCF)[7] อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยในการทำนายระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อวิเคราะห์ระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ ภายใต้ภาระแบบกระจายสม่ำเสมอ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.2 เพื่อพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์แบบถดถอยที่สามารถทำนายระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตจากอัตราส่วนทางเรขาคณิต

2.3 เพื่อลดเวลาและขั้นตอนในการวิเคราะห์โครงสร้างแผ่นวัสดุคอมโพสิต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนทางเรขาคณิต โดยไม่จำเป็นต้องทำการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ใหม่ทุกครั้ง

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

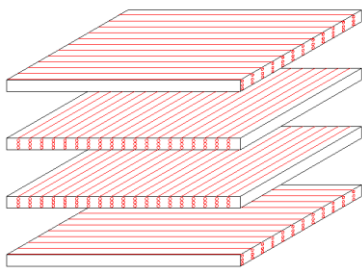
3.1 ทฤษฎีลามิเนชันแบบคลาสสิก (Classical lamination theory: CLT)

แผ่นวัสดุคอมโพสิตเป็นโครงสร้างที่ได้จากการประสานชั้นลามิเนตา (Lamina) หลายชั้น ซึ่งมีการจัดเรียงเส้นใยในทิศทางที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลที่เหมาะสมกับการใช้งาน สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงกลของแผ่นวัสดุคอมโพสิตในเบื้องต้น มักประยุกต์ใช้ทฤษฎีแผ่นบางแบบคลาสสิก (Classical plate theory: CPT) ซึ่งตั้งอยู่บนข้อสมมติฐานว่าความหนาของแผ่นมีขนาดน้อยเมื่อเทียบกับความยาวด้านสั้นของแผ่น และละเลยผลกระทบของการเสียรูปเนื่องจากความเค้นเฉือน (No shear distortion) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-strain relation) ในวัสดุคอมโพสิตมีความซับซ้อนกว่าวัสดุไอโซทรอปิก (Isotropic material) เนื่องจากสมบัติวัสดุมีลักษณะเป็นแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ทฤษฎีแผ่นบางแบบคลาสสิกที่ประยุกต์กับวัสดุคอมโพสิตจึงนำไปสู่การพัฒนาทฤษฎีลามิเนชันแบบคลาสสิก ซึ่งสามารถใช้ในการเขียนสมการควบคุม (Governing differential equation) สำหรับแผ่นวัสดุคอมโพสิตแบบสมมาตรที่มีการจัดเรียงเส้นใยในแนว 0° หรือ 90° (ภาพที่ 2) และรับภาระแบบกระจายกระทำตั้งฉากกับแผ่น ได้เป็น[1]

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q \quad (1)$$

โดย w คือ ระยะการแอ่นของแผ่นที่ตำแหน่ง (x, y) , q คือ ภาระต่อพื้นที่หน้าตัดกระทำตั้งฉากกับแผ่น และ D_{ij} คือ องค์ประกอบของเมทริกซ์ความแข็งเกร็งดัด (Bending stiffness) ของแผ่นวัสดุคอมโพสิต ลักษณะการรองรับที่ขอบของแผ่นวัสดุคอมโพสิตมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อรูปแบบและขนาดของการแอ่นที่เกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้พิจารณาแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ ซึ่งลักษณะการรองรับดังกล่าวเป็นการรองรับที่มีความซับซ้อนมากกว่าการรองรับแบบทั่วไป ทำให้ไม่สามารถแก้สมการควบคุม (สมการ 1) เพื่อหา

ค่าระยะการแอ่น (w) ได้ด้วยระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical method) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อประมาณค่าคำตอบ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อคำนวณค่าระยะการแอ่น ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์สามารถนำมาสร้างชุดข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนารูปแบบการวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงข้อมูล (Data-driven regression model) เพื่อทำนายพฤติกรรมการณ์การแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตในลักษณะการรองรับดังกล่าว



ภาพที่ 2 ตัวอย่างการเรียงตัวของเส้นใยแบบ [0/90]_s

3.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ถือเป็นเทคนิคการคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในวงการวิศวกรรม เนื่องจากสามารถให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำสำหรับปัญหาซับซ้อนที่ยากจะแก้ด้วยระเบียบวิธีวิเคราะห์ ระเบียบวิธีนี้มีประสิทธิภาพเป็นพิเศษในการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างที่มีรูปทรงไม่เป็นมาตรฐานหรือมีความซับซ้อนทางเรขาคณิต กระบวนการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญต่อไปนี้[8]

1) การแบ่งส่วนโครงสร้าง

เริ่มจากการแบ่งวัตถุหรือโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อย ๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ ซึ่งอาจมีรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐาน เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม (สำหรับปัญหา 2 มิติ) หรือทรงสี่หน้า ทรงหกหน้า (สำหรับปัญหา 3 มิติ) การแบ่งส่วนนี้ทำให้สามารถประมาณค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2) การสร้างสมการเอลิเมนต์

แต่ละเอลิเมนต์จะถูกกำหนดสมการเฉพาะที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ เช่น ความเค้น ความเครียด และการกระจัด โดยอาศัย

หลักการทางกลศาสตร์และสมการเชิงอนุพันธ์

3) การรวมระบบสมการ

สมการของเอลิเมนต์แต่ละชิ้นจะถูกรวมเข้าด้วยกันเพื่อสร้างระบบสมการขนาดใหญ่ที่แสดงพฤติกรรมของโครงสร้างทั้งหมด

4) การแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์

ระบบสมการที่ได้จะถูกแก้ด้วยอัลกอริธึมเชิงตัวเลขที่เหมาะสม ซึ่งให้ผลลัพธ์เป็นค่าการกระจัดหรือปริมาณอื่น ๆ ที่จุดต่อ (Nodes) ต่าง ๆ

5) การประมวลผลหลังการคำนวณ

ข้อมูลผลลัพธ์จะถูกนำมาวิเคราะห์และแสดงผลในรูปแบบที่เข้าใจง่าย เช่น แผนภาพการกระจายความเค้น ภาพเคลื่อนไหวแสดงการเปลี่ยนรูป หรือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ

3.3 ระเบียบวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย

การวิเคราะห์แบบถดถอย เป็นวิธีการทางสถิติที่สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ เพื่อทำนายผลลัพธ์ของตัวแปรตามจากค่าของตัวแปรอิสระ โดยการวิเคราะห์แบบถดถอยสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท เช่น การวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) และการวิเคราะห์แบบถดถอยไม่เชิงเส้น (Non-linear regression) ในการวิเคราะห์ระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตภายใต้ภาระแบบกระจายสม่ำเสมอมีความซับซ้อน เนื่องจากระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อัตราส่วนทางเรขาคณิต รูปแบบการเรียงตัวของเส้นใย (Ply orientation) และคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุย่อยในแต่ละชั้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้กับระยะการแอ่นมักมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น [9] ดังนั้น การสร้างแบบจำลองถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression model) จึงมีความเหมาะสมในการทำนายระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ โดยทั่วไปแบบจำลองสามารถเขียนได้ในรูปแบบ [10 - 12]

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n; \beta) + \varepsilon \quad (2)$$

โดย y คือ ระยะการแอ่น (m) $x_1, x_2, \dots, x_n$ คือ อัตราส่วนทางเรขาคณิต, $f(\cdot)$ คือ ฟังก์ชันไม่เชิงเส้นที่แทนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม, β คือ เวกเตอร์พารามิเตอร์ และ ε คือ ค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม ในการประมาณพารามิเตอร์มักใช้ระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear least squares method) โดยเลือกฟังก์ชันที่แทนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม เช่น สมการพหุนามลำดับที่ 2 หรือ 3 ส่วนการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองถดถอยไม่เชิงเส้นที่ใช้ทำนายค่าระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตเพื่อยืนยันว่าแบบจำลองถดถอยไม่เชิงเส้นมีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้งานในทางปฏิบัติได้ จะใช้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination : R^2) ในการวัดความสามารถของแบบจำลองถดถอยไม่เชิงเส้นในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล และใช้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error: $RMSE$) เพื่อวัดขนาดของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างค่าที่แบบจำลองถดถอยไม่เชิงเส้นทำนายได้กับค่าที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ ดังสมการ (3) และ (4)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (4)$$

โดย y_i คือ ระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (m), $\hat{y}_i$ คือ ระยะการแอ่นที่ได้จากแบบจำลองถดถอยไม่เชิงเส้น (m), $\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (m) และ n คือ จำนวนข้อมูล ถ้า R^2 มีค่ามากแสดงว่าตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กันมากหรือตัวแปรอิสระสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้มาก ถ้า R^2 มีค่าน้อยแสดงว่าตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กันน้อยหรือตัวแปรอิสระสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัว

แปรตามได้น้อย โดย R^2 จะไม่มีหน่วย และมีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 สำหรับค่า $RMSE$ หากมีค่าต่ำ แสดงว่าระยะการแอ่นที่ได้จากแบบจำลองถดถอยไม่เชิงเส้นมีความใกล้เคียงกับระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ ซึ่งหมายความว่าแบบจำลองถดถอยไม่เชิงเส้นมีประสิทธิภาพในการทำนายระยะการแอ่นได้ดี

4. วิธีดำเนินการศึกษา

ในการทำนายระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ ภายใต้ภาระแบบกระจายสม่ำเสมอ สามารถแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

- 1) การสร้างชุดข้อมูล
- 2) การออกแบบแบบจำลองถดถอยไม่เชิงเส้น
- 3) การประเมินผลแบบจำลองถดถอยไม่เชิงเส้น

4.1 การสร้างชุดข้อมูล

ทำการสร้างชุดข้อมูลระยะการแอ่นในแต่ละอัตราส่วนทางเรขาคณิตของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ ภายใต้ภาระแบบกระจายสม่ำเสมอ 1 N/m^2 โดยการจำลองในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ ที่มีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

- อัตราส่วนทางเรขาคณิต (ความกว้างด้าน x ต่อความกว้างด้าน y) ตั้งแต่ 1:1 ถึง 5:1 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.1
- เส้นใยมีการเรียงตัวแบบ $[0]_4$, $[0/90]_s$, $[90/0]_s$ และ $[90]_4$ โดยแต่ละชั้นมีความหนา 0.0025 m
- กำหนดค่าคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นวัสดุคอมโพสิตเป็น $E_1 = 150 \text{ GPa}$, $E_2 = E_3 = 7 \text{ GPa}$, $G_{12} = G_{13} = 3.5 \text{ GPa}$, $G_{23} = 1.4 \text{ GPa}$ และ $\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = 0.3$
- คำนวณระยะการแอ่นที่ตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นวัสดุคอมโพสิต

4.2 การออกแบบแบบจำลองถดถอยไม่เชิงเส้น

แบบจำลองถดถอยไม่เชิงเส้นที่ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบด้วย การถดถอยแบบพหุนามดีกรี n (n^{th}

Degree polynomial regression) การถดถอยแบบสมการกำลัง (Power regression) และการถดถอยแบบสมการเลขชี้กำลัง (Exponential regression)

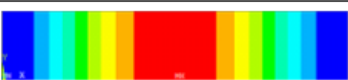
4.3 การประเมินผลแบบจำลองถดถอยไม่เชิงเส้น

แบบจำลองถดถอยไม่เชิงเส้นจะถูกประเมินโดยใช้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ระหว่างค่าระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์กับค่าระยะการแอ่นที่ได้จากแบบจำลองถดถอยไม่เชิงเส้น

5. ผลการศึกษา

5.1 จากการจำลองแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ ภายใต้การกระจายสมำเสมอ ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ พบว่าระยะการแอ่นสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณกลางแผ่นและลดลงไปยังขอบที่ถูกรองรับแบบยึดแน่น (ตารางที่ 1) โดยไม่ขึ้นกับอัตราส่วนทางเรขาคณิต และการเรียงตัวของเส้นใย

ตารางที่ 1 ระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิต

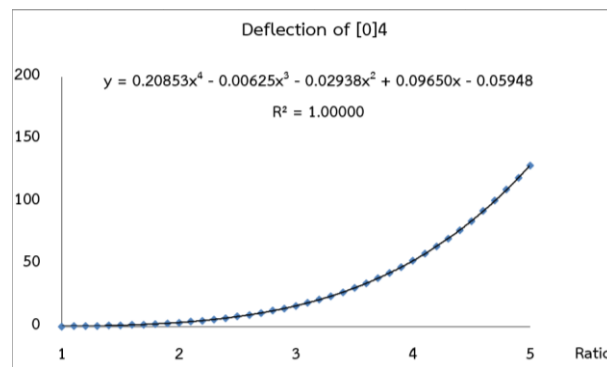
เส้นใย	อัตราส่วน	
	1:1	5:1
[0] ₄	 0.211 μm	 129.240 μm
[0/90] _s	 0.243 μm	 147.220 μm
[90/0] _s	 1.250 μm	 782.540 μm
[90] ₄	 4.434 μm	 2787.300 μm

5.2 จากการทำนายระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ ภายใต้การกระจายสมำเสมอ ด้วยการถดถอยแบบพหุนามดีกรี 4 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 1.00000 (ภาพที่ 3 -6) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองมีค่าน้อยกว่า 0.02 (ตารางที่ 2) แสดงว่าแบบจำลองถดถอยแบบพหุนามดีกรี 4 สามารถทำนายระยะการ

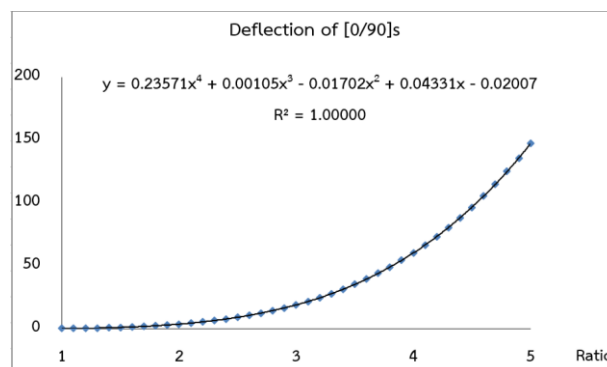
แอ่นได้อย่างแม่นยำเกือบสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม การใช้การถดถอยแบบพหุนามดีกรี 4 ซึ่งมีพารามิเตอร์ 5 ตัว ได้แก่ a_0, a_1, a_2, a_3 และ a_4 ในสมการ $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4$ ทำให้สมการสามารถโค้งงอและลากผ่านทุกจุดข้อมูลได้ แม้ว่าจะไม่มีความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างข้อมูล ทำให้เกิดปัญหาโอเวอร์ฟิตติ้ง (Overfitting) ได้ง่าย โดยเฉพาะเมื่อใช้ในการทำนายระยะการแอ่นนอกช่วงข้อมูล (Extrapolation) ซึ่งอาจเกิดการแกว่งของค่าที่ไม่เป็นเหตุเป็นผล [12 – 14]

ตารางที่ 2 RMSE ของการถดถอยแบบพหุนามดีกรี 4

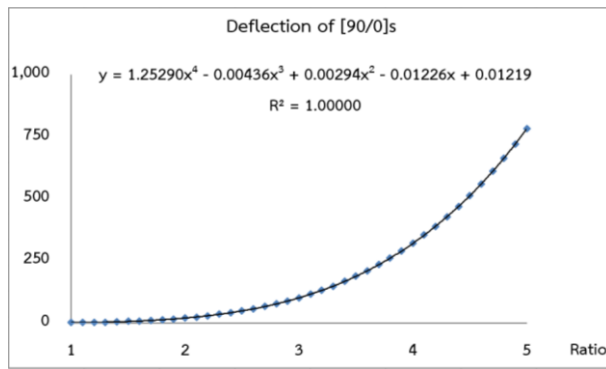
เส้นใย	RMSE
[0] ₄	0.00128
[0/90] _s	0.00100
[90/0] _s	0.00180
[90] ₄	0.01771



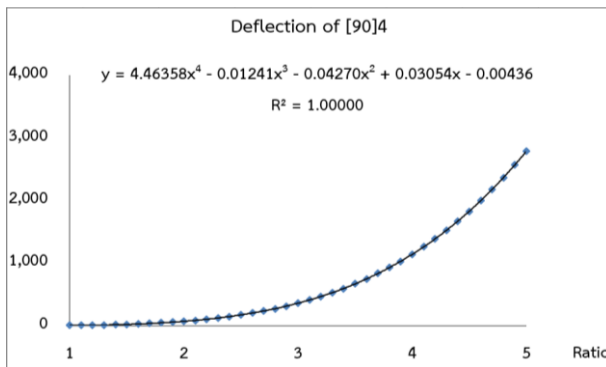
ภาพที่ 3 การถดถอยแบบพหุนามดีกรี 4 ของ [0]₄



ภาพที่ 4 การถดถอยแบบพหุนามดีกรี 4 ของ [0/90]_s



ภาพที่ 5 การถดถอยแบบพหุนามดีกรี 4 ของ $[90/0]_s$



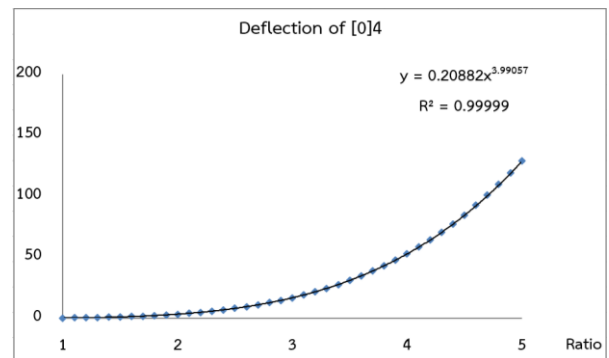
ภาพที่ 6 การถดถอยแบบพหุนามดีกรี 4 ของ $[90]_4$

5.3 จากการทำนายระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่น และอีกสองด้านปล่อยอิสระ ภายใต้ภาระแบบกระจายสม่ำเสมอ ด้วยการถดถอยแบบสมการกำลัง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ระหว่าง 0.99999 - 1.00000 (ภาพที่ 7 - 10) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองมีค่าน้อยกว่า 0.40 (ตารางที่ 3) ซึ่งหมายความว่า การทำนายระยะการแอ่นมีความแม่นยำสูงและมีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก และการที่การถดถอยแบบสมการกำลังซึ่งมีพารามิเตอร์ 2 ตัว ได้แก่ a และ b ในสมการ $y = ax^b$ ทำให้เส้นสมการถูกควบคุมโดยความโค้งงอที่เหมาะสม จึงไม่มีการโอเวอร์ฟิตติง และไม่เกิดการแกว่งของค่าภายนอกช่วงข้อมูลอย่างที่เกิดขึ้นในการถดถอยแบบพหุนามดีกรี 4 โดย a ทำหน้าที่เป็นสัมประสิทธิ์เชิงสเกล ถ้า a มีค่ามาก แสดงว่าแผ่นวัสดุคอมโพสิตมีแนวโน้มที่จะแอ่นตัวได้มากภายใต้ภาระเดียวกัน ส่วน b เป็นเลขชี้กำลังที่แสดงลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนทางเรขาคณิตและระยะการแอ่น หาก $b > 1$ แสดงว่าเมื่อ

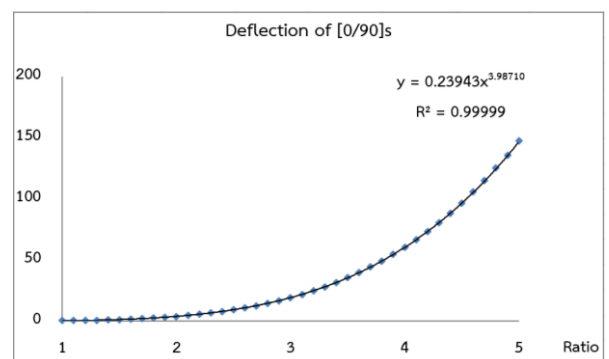
อัตราส่วนทางเรขาคณิตเพิ่มขึ้น ระยะการแอ่นจะเพิ่มขึ้นในอัตราเร่ง อย่างไรก็ตาม หาก $0 < b < 1$ แสดงว่าระยะการแอ่นเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลงเมื่ออัตราส่วนทางเรขาคณิตเพิ่มขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงพฤติกรรมที่เสถียรมากกว่า

ตารางที่ 3 RMSE ของการถดถอยแบบสมการกำลัง

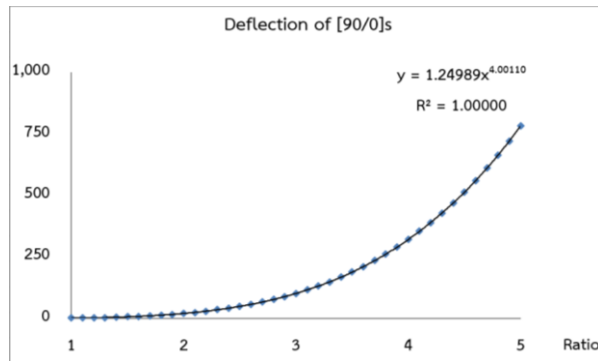
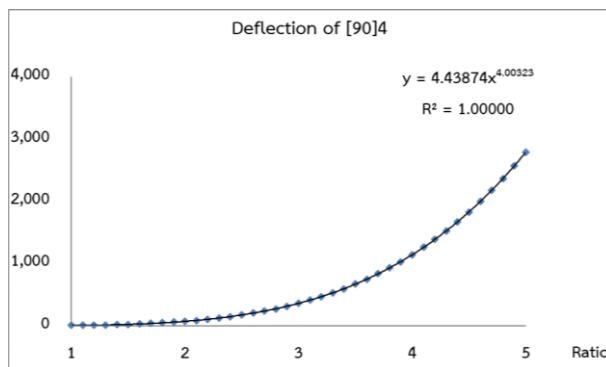
เส้นใย	RMSE
$[0]_4$	0.20067
$[0/90]_s$	0.19195
$[90/0]_s$	0.00840
$[90]_4$	0.39185



ภาพที่ 7 การถดถอยแบบสมการกำลังของ $[0]_4$



ภาพที่ 8 การถดถอยแบบสมการกำลังของ $[0/90]_s$

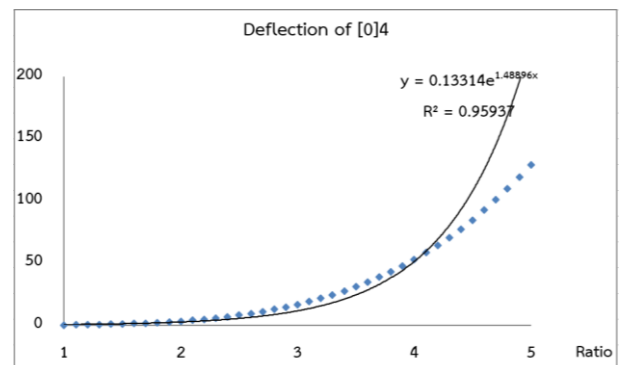
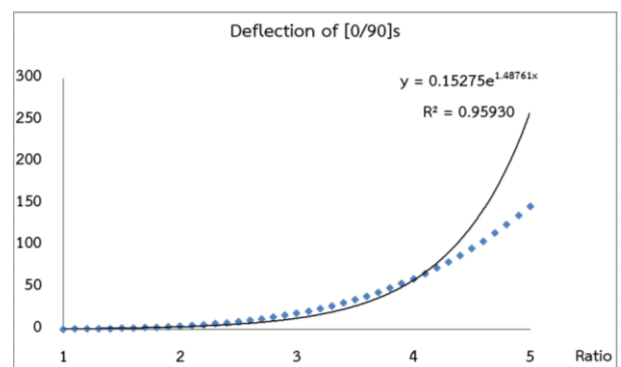
ภาพที่ 9 การถดถอยแบบสมการกำลังของ $[90/0]_s$ ภาพที่ 10 การถดถอยแบบสมการกำลังของ $[90]_4$

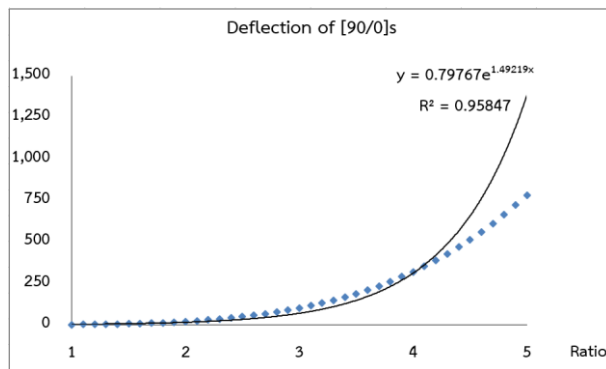
5.4 จากการทำนายระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ ภายใต้ภาระแบบกระจายสม่ำเสมอ ด้วยการถดถอยแบบสมการเลขชี้กำลัง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ระหว่าง 0.95839 – 0.95937 (ภาพที่ 11 – 14) และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองมีค่าน้อยกว่า 530 (ตารางที่ 4) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำนายระยะการแอ่นมีความแม่นยำในระดับหนึ่ง แม้ว่าความคลาดเคลื่อนจะมากกว่าการถดถอยแบบสมการกำลังอย่างมีนัยสำคัญ และการที่การถดถอยแบบสมการเลขชี้กำลังซึ่งมีพารามิเตอร์ 2 ตัว ได้แก่ a และ b ในสมการ $y = ae^{bx}$ การควบคุมความโค้งของสมการเลขชี้กำลังจะถูกควบคุมโดยพารามิเตอร์ที่กำหนดให้เส้นมีลักษณะการโค้งแบบธรรมชาติ ซึ่งไม่ทำให้เกิดปัญหาโอเวอร์ฟิตติ้งโดย a แสดงถึงระดับของการแอ่นเริ่มต้นเมื่ออัตราส่วนทางเรขาคณิตเป็นศูนย์ หรือพฤติกรรมโดยรวมของแผ่นภายใต้ภาระคงที่ ขณะที่ b เป็นค่าที่ควบคุมอัตราการเปลี่ยนแปลงของระยะการแอ่นตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนทางเรขาคณิต หาก $b > 0$ แสดงว่า

แผ่นวัสดุมีแนวโน้มแอ่นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราส่วนทางเรขาคณิตเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน หาก $b < 0$ ระยะการแอ่นจะลดลงเมื่ออัตราส่วนทางเรขาคณิตเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจสะท้อนลักษณะพิเศษของโครงสร้างหรือพฤติกรรมที่เสถียรขึ้นเมื่อมีการเสริมแรง

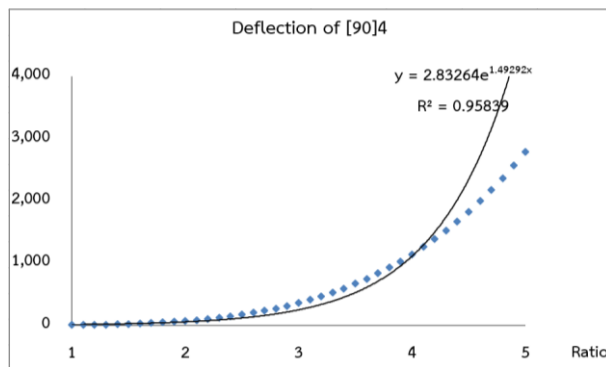
ตารางที่ 4 RMSE ของการถดถอยแบบสมการเลขชี้กำลัง

เส้นใย	RMSE
$[0]_4$	24.00195
$[0/90]_s$	27.37331
$[90/0]_s$	147.25940
$[90]_4$	525.27618

ภาพที่ 11 การถดถอยแบบสมการเลขชี้กำลังของ $[0]_4$ ภาพที่ 12 การถดถอยแบบสมการเลขชี้กำลังของ $[0/90]_s$



ภาพที่ 13 การถดถอยแบบสมการเลขชี้กำลังของ [90/0]_s



ภาพที่ 14 การถดถอยแบบสมการเลขชี้กำลังของ [90]₄

6. สรุปผลและอภิปรายผล

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการถดถอยไม่เชิงเส้นสามารถทำนายระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ ภายใต้ภาระแบบกระจายสม่ำเสมอ ได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากกว่า 0.95 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) มีค่าน้อยกว่า 530 ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยการถดถอยแบบพหุนามดีกรี 4 มีความแม่นยำมากกว่าการถดถอยแบบสมการกำลังและสมการเลขชี้กำลังตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ในการเลือกใช้สมการควรคำนึงถึงจำนวนพารามิเตอร์ที่น้อย เพื่อลดปัญหาการโอเวอร์ฟิตติ้งและทำให้สมการนั้นง่ายต่อการนำไปใช้งานและตีความพารามิเตอร์ทางวิศวกรรมได้ง่าย ดังนั้น การใช้สมการกำลังจึงเหมาะสมกว่าการใช้สมการพหุนามดีกรีสูงและสมการเลขชี้กำลัง เนื่องจากสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาโอเวอร์ฟิตติ้งได้ และยังคงให้ผลการ

ทำนายระยะการแอ่นที่แม่นยำ การวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์แบบถดถอยเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตกับอัตราส่วนทางเรขาคณิต ผลการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างที่ใช้วัสดุคอมโพสิตได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

ตารางที่ 5 สรุปผลการประเมินแบบจำลองถดถอยไม่เชิงเส้น

การประเมินผลแบบจำลอง	พหุนามดีกรี 4	สมการกำลัง	สมการเลขชี้กำลัง
R^2	1.00000	0.99999 - 1.00000	0.95839 - 0.95937
RMSE	< 0.02	< 0.40	< 530
พารามิเตอร์	5	2	2
ปัญหาโอเวอร์ฟิตติ้ง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
การทำนายนอกช่วงข้อมูล	ต่ำ	สูง	ปานกลาง

7. ข้อจำกัดงานวิจัย

แบบจำลองการถดถอยไม่เชิงเส้นที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ อาศัยข้อมูลจากการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ เพื่อสร้างชุดข้อมูลของระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนทางเรขาคณิตตั้งแต่ 1:1 ถึง 5:1 ดังนั้น แบบจำลองที่ได้สามารถนำมาใช้ในการทำนายระยะการแอ่นได้ภายในช่วงอัตราส่วนดังกล่าว นอกจากนี้ การจำลองและการทำนายระยะการแอ่นในงานวิจัยนี้ ดำเนินการภายใต้สมมติฐานของภาระแบบกระจายสม่ำเสมอและเงื่อนไขขอบที่กำหนดไว้เท่านั้น ซึ่งอาจไม่ครอบคลุมสภาพการณ์จริงที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น การรับภาระแบบเป็นจุด การรับภาระแบบกระจายไม่สม่ำเสมอ หรือการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขขอบ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการประยุกต์ใช้แบบจำลองกับสภาพการณ์จริงในอนาคต จึงควรมีการขยายขอบเขตของการศึกษาให้ครอบคลุมรูปแบบภาระและเงื่อนไขขอบที่หลากหลายยิ่งขึ้น

8. บรรณานุกรม

- [1] ไพโรจน์ สิงห์นาคกิจ. (2559). กลศาสตร์ของวัสดุคอมโพสิต. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] ปุณปวีร์ จงรัตน์ศรีกุล, & สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ. (2559). การวิเคราะห์และการออกแบบโครงสร้างแบบรังผึ้งของวัสดุคอมโพสิตไม้ - ซิเมนต์. วิศวกรรมลาดกระบัง, 33(3), 24–31.
- [3] กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข, ณัฐพงษ์ กุลท้วม, & เอกนรินทร์ ระลาธิ. (2559). ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่น – ความเค้นดัด และอัตราส่วนทางเรขาคณิตของแผ่นวัสดุเชิงประกอบเรียงชั้นแบบสมมาตรขอบสี่ ด้านรองรับแบบยึดแน่น. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 9(1), 61–69.
- [4] Dukkipati, R. V. (2010). Numerical method. New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers.
- [5] กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข, อาศิร บุญยะประภัศร, กรกฎ รัชชภูมิ, & ธนบดี รัชพลพันธ์. (2557). การศึกษาการเปลี่ยนพฤติกรรมแผ่นบางเป็นพฤติกรรมคาน. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 21(2), 21–29.
- [6] Singh, V., & Prashanth, M. H. (2023). Deflection surface analysis of thin plate structures using regression technique. In G. C. Marano, A. V. Rahul, J. Antony, G. Unni Kartha, P. E. Kavitha, & M. Preethi (Eds.), Proceedings of SECON'22. SECON 2022. Lecture notes in civil engineering (Vol. 284). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12011-4_18
- [7] ธวัชชัย อุ้นใจม, กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข, อนุชา ตาน้อย, & อนุชิต เกตุทะจักร์. (2561). พฤติกรรมการแอ่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบที่มีการเรียงชั้นแบบครอสพลายที่มีขอบสามด้านรองรับแบบยึดแน่นและอีกหนึ่งด้านปล่อยอิสระ. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 11(2), 53–64.
- [8] กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข. (2556). เอกสารประกอบการสอนวิชาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา.
- [9] Reddy, J. N. (2004). Mechanics of laminated composite plates and shells: Theory and analysis. Boca Raton, FL: CRC Press LLC.
- [10] Seber, G. A. F., & Wild, C. J. (1989). Nonlinear regression. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- [11] Draper, N. R., & Smith, H. (1998). Applied regression analysis (3rd ed.). New York, NY: Wiley.
- [12] Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction (2nd ed.). New York, NY: Springer.
- [13] Burden, R. L., & Faires, J. D. (2015). Numerical analysis (10th ed.). Boston, MA: Brooks/Cole.
- [14] Quarteroni, A., Sacco, R., & Saleri, F. (2007). Numerical mathematics. Berlin, Germany: Springer.
- [15] Atkinson, K. (1989). An introduction to numerical analysis (2nd ed.). New York, NY: Wiley.

การพัฒนาอาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าในจักรวาลนฤมิต
เพื่อเป็นสื่อการเรียนรู้วิศวกรรมป้องกันประเทศด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน
The Development of Headquarters of Chulachomklao Royal Military
Academy Building in Metaverse as a Defense Engineering Courseware via
Virtual Reality Technology

ปรเมศวร์ กุมารบุญ^{1*}, สิริภพ แสงทองคำ²,
ผเดิม หนังสือ³, อาศิส บุญยะประภัศร์⁴, ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ⁵
Poramez Kumarnboon^{1*}, Sirapop Saengthongkam²,
Phaderm Nangsue³, Arsit Boonyaprapasorn⁴, Lunchakorn Wuttisittikuljij⁴

¹หลักสูตรวิศวกรรมและเทคโนโลยีป้องกันประเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
10330 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 254 ประเทศไทย

¹Master of Engineering Program in Defense Engineering and Technology, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University 254 Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand

²นิสิตปริญญาเอก หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 ประเทศไทย

²Doctor of Engineering Program in Electrical Engineering, Faculty of Engineering Chulalongkorn
University 254 Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand

³กองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ถนนสุพรรณศรี ตำบลพรหมณี อำเภอเมือง
จังหวัดนครนายก 26001 ประเทศไทย

³Department of Electrical Engineering, Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy,
Mueang Nakhon Nayok District, Nakhon Nayok 26001, Thailand

⁴กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ถนนสุพรรณศรี ตำบลพรหมณี อำเภอ
เมือง จังหวัดนครนายก 26001 ประเทศไทย

⁴Department of Mechanical Engineering, Academic Division, Chulachomklao Royal Military
Academy, Mueang Nakhon Nayok District, Nakhon Nayok 26001, Thailand

⁵ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน 254
10330 กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

⁵Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Chulalongkorn University 254
Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand

*Corresponding Author. E-mail: poramez@live.com

(Received: February 1, 2025, Revised: April 22, 2025, Accepted: June 11, 2025)

บทคัดย่อ : บทความวิจัยและพัฒนานี้ เป็นการสร้างอาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าใน
จักรวาลนฤมิต โดยได้ออกแบบกรอบการทำงานเพื่อเป็นแนวทางให้วิศวกรได้ศึกษาเป็นต้นแบบการวิจัยพัฒนาการ

สร้างอาคารในจักรวาลนอญมิต และสร้างห้องรับรองสุโขทัยขนาดจริงครบถ้วนทุกมิตด้วยโปรแกรม เบลนเดอร์ มีรายนามผู้บัญชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าทุกท่านบนผนังเสมือนจริงสวยงามทรงคุณค่าทางประวัติศาสตร์ใช้เป็นห้องรับรองต้อนรับผู้มาเยือนออนไลน์ในรูปแบบอวตารจากทั่วทุกมุมโลกแบบถ่ายทอดสด ใช้เป็นห้องสัมมนาในโลกเสมือนจริง นักเรียนนายร้อยสามารถเป็นอวตารเข้ามานั่งเรียนได้พร้อมกันเสมือนอยู่ในห้องเรียน และใช้โปรแกรมยูนิตี สร้างสื่อการเรียนรู่วิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศในจักรวาลนอญมิตเรียนรู้การประกอบชิ้นส่วนอาวุธปืนด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน เพื่อให้การวิจัยพัฒนานี้เป็นสื่อการเรียนวิศวกรรมป้องกันที่ทันสมัยของประเทศและถูกนำไปใช้ต่อยอดสืบไปในอนาคต

คำสำคัญ : อาคารในจักรวาลนอญมิต ประกอบปืนในโลกเสมือน วิศวกรรมป้องกันประเทศ

Abstract : This research and development article focuses on the creation of the Command Building of Chulachomklao Royal Military Academy within the Metaverse. A framework was designed to serve as a guideline for engineers, providing a prototype model for the research and development of building construction in the Virtual reality. A fully detailed virtual replica of the Sukhothai Reception Room was created using Blender, complete with lifelike dimensions and design. The virtual walls beautifully display the names of all former commanders of the academy, adding historical value. The room serves as a virtual reception hall to welcome online visitors from around the world via live avatars. It is also used as a seminar room in the Metaverse, where cadets can join simultaneously as avatars, simulating a real-life classroom environment. Additionally, Unity was used to develop interactive learning media for the subject Defense Engineering in the Metaverse, allowing students to learn about firearm assembly through virtual reality technology. This research and development project aims to serve as a modern educational tool for defense engineering in Thailand, with the potential to be expanded and utilized further in the future.

Keywords : Metaverse building, virtual firearm assembly, Defense engineering

1. บทนำ

การศึกษาวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศด้วยจักรวาลนอญมิต (Metaverse) จำเป็นเรื่องที่สุดในปัจจุบัน ทั้งการออกแบบงานวิศวกรรมป้องกันประเทศที่จะช่วยลดต้นทุน การทำการทดลองทางวิศวกรรมและป้องกันอันตรายต่อร่างกาย ด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน (Virtual reality หรือ VR) อีกทั้งการฝึกอบรมด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (Augmented Reality หรือ AR) ศึกษาพื้นที่เป้าหมาย หรือเรียนรู้ประวัติศาสตร์การรบในอดีต อีกทั้งการซ่อมรบหรือฝึกจู่โจมด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงผสม (Mixed Reality หรือ MR) อาทิ ฝึกอาวุธปืน ฝึกขับเครื่องบินหรือรถถังสามารถฝึกซ้อมได้บ่อยเท่าที่ต้องการแม้แต่ในห้องนอน

ตลอดจนการวางแผนรบและประชุมออนไลน์ระหว่างกองพลผ่านเทคโนโลยีความเป็นจริงขยาย (Extended Reality หรือ XR)

Lav. S and Amanpreet. K. [2] ได้บรรยายถึงงานด้านการทหารกำลังเร่งประยุกต์ใช้เทคโนโลยี AR และ VR อย่างสูงในทุกมิตี เช่น การฝึกอบรม การจำลองสถานการณ์รบ การฝึกใช้อาวุธ การฝึกขับยานพาหนะ การเรียนรู้สภาพแวดล้อมก่อนจู่โจม การรับรู้สถานการณ์ในสนามรบจากเทคโนโลยีฝาแฝดดิจิทัล (Digital twin) และการวางแผนปฏิบัติการภารกิจพิเศษทางทหาร

การวิจัยพัฒนานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างกรอบการทำงาน (Framework) ให้วิศวกรและทหารใช้เป็น

แนวทางในสร้างอาคารในจักรวาลนฤมิต เพื่อปฏิบัติการพิเศษอาคารเป้าหมายที่ไม่มีแบบแปลน จึงจำลองสถานการณ์อาคารเป้าหมายส่งสายลับเข้าไปยิงเลเซอร์วัดระยะพื้นถึงเพดาน และระยะห่างระหว่างเสา จากนั้นใช้ภาพถ่ายดาวเทียม Google Earth ถอดแบบมาสร้างอาคารในโลกเสมือนที่มีขนาดเหมือนจริงในทุกมิติ

โดยเริ่มจากการสร้างอาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (จปร.) ในโลกเสมือน เพื่อให้เป็นหมุดหมายสำคัญในจักรวาลนฤมิต และสร้างห้องรับรองสุโขทัยเป็นแหล่งเรียนรู้ประวัติศาสตร์โรงเรียนนายร้อย จปร. โดยเก็บรายละเอียดภาพถ่าย ชื่อ และปีที่ดำรงตำแหน่งของผู้บัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร. ตั้งแต่อดีตสู่ปัจจุบันให้ดังงามที่สุด และเกิดเป็นคุณค่าทางประวัติศาสตร์

อีกทั้งพัฒนาห้องรับรองสุโขทัย เป็นห้องรับรองในโลกเสมือน โดยสามารถต้อนรับผู้เยี่ยมชมจากทั่วทุกมุมโลกที่เข้ามาในรูปแบบ อวตาร์ (Avatar) สามารถจัดการสัมมนาวิชาการออนไลน์ในโลกเสมือน อาจารย์โรงเรียนนายร้อย จปร. สามารถจัดบรรยายในโลกเสมือน ฉายวิดีโอหรือสไลด์ โดยนักเรียนนายร้อยสามารถแต่งเป็นอวตาร์ของตนเข้ามาเรียนได้ และวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศที่อาจารย์หลายท่านมีสื่อการสอนของตนหรือวิดีโอ สามารถนำมาเก็บไว้ในระบบสื่อการเรียนออนไลน์ (Courseware) หรือสื่อการเรียนดิจิทัลสมัยใหม่ ในโครงการวิจัยพัฒนานี้สร้างการเรียนรู้ขึ้นส่วนปืนสงคราม ในแบบ 3D ซึ่งผู้วิจัยได้รับทราบว่ามีนักเรียนนายร้อย จปร. ในอดีตได้รับอุบัติเหตุที่ดวงตาจากการเรียนประกอบขึ้นส่วนปืนสงคราม อีกทั้งการได้เรียนรู้อาวุธปืนเพียงในคาบเรียน ไม่ได้จับปืนสงครามตลอดเวลาในขณะที่เป็นนักเรียนนายร้อย กว่าที่จะจบการศึกษาอาจทำให้ความทรงจำขึ้นส่วนต่างๆ ของอาวุธปืนสงครามลดลง เทคโนโลยีความจริงเสมือนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้ขึ้นส่วนประกอบอาวุธปืนสงครามได้ทุกที่ทุกเวลา โดยไม่มีอันตราย จะสามารถประเมินผลได้ว่า เทคโนโลยีนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเรียนการสอนได้อย่างไร

สุดท้าย เพื่อให้กองบัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร.

ในจักรวาลนฤมิตของโครงการนี้ เป็นศูนย์กลางการเรียนรู้ด้านวิชาการวิศวกรรมป้องกันประเทศต่อไป

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อสร้างตึกกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าในจักรวาลนฤมิต

2.2 เพื่อสร้างห้องรับรองสุโขทัยเพื่อเรียนรู้ประวัติศาสตร์การทหารอันงดงามในจักรวาลนฤมิตและใช้สัมมนาในโลกเสมือนจริง (Metaverse Auditorium) ต้อนรับผู้เข้าเยี่ยมชมที่เป็นอวตาร์แบบถ่ายทอดสด

2.3 เพื่อสร้างระบบ Courseware สำหรับเนื้อหาวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศ ในโครงการนี้เป็นการประกอบขึ้นส่วนอาวุธปืนความจริงเสมือน เนื่องจากนักเรียนนายร้อยได้จับปืนสงครามเฉพาะเวลาในชั่วโมงศึกษา ไม่สามารถทบทวนจดจำขึ้นส่วนอาวุธปืนสงครามได้ตลอดเวลาจนจบการศึกษา ดังนั้นเทคโนโลยีความจริงเสมือนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้ขึ้นส่วนประกอบอาวุธปืนสงครามได้ทุกที่ทุกเวลา โดยไม่มีอันตราย และสร้างระบบให้อาจารย์ใส่เนื้อหาวิชาการของตน ไว้เป็นแหล่งการเรียนรู้สมัยใหม่ทางไซเบอร์

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทความวิจัยเรื่อง AR and VR in Military Combat: Enhancing Soldier Performance and Safety

Lav. S and Amanpreet [2] การศึกษาวิจัยนี้เพื่อให้เห็นภาพรวมเกี่ยวกับการใช้เทคโนโลยี AR และ VR ในการประยุกต์ใช้ทางการทหาร การฝึกทหาร การรับรู้สถานการณ์และการตัดสินใจสามารถใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยี AR และ VR

การศึกษานี้อธิบายแอปพลิเคชัน AR และ VR ต่างๆ ในทางทหารได้แก่ ซิมูเลเตอร์ เครื่องมือฝึกอบรบ และระบบสนับสนุนการดำเนินงาน และยังกล่าวถึงอุปสรรคที่เกี่ยวข้องกับการนำเทคโนโลยี AR และ VR

มาใช้ในทางทหาร เช่น ข้อจำกัดทางเทคนิค ค่าใช้จ่าย และปัญหาด้านความปลอดภัย ในตอนท้ายการศึกษานี้สรุปด้วยการอภิปรายเกี่ยวกับทิศทางอนาคตของเทคโนโลยี AR และ VR

AR และ VR ถูกใช้ในการศึกษาทหาร เช่น การฝึกอบรม จำลองสถานการณ์ การรับรู้สถานการณ์ และการวางแผนภารกิจ ดังต่อไปนี้เป็นตัวอย่งของวิธีการ

การฝึกอบรม AR และ VR ถูกใช้ให้ทหารได้รับประสบการณ์ฝึกที่สมจริง เช่น จำลองสถานการณ์การต่อสู้ การฝึกใช้อาวุธ และใช้ยานพาหนะ ทำให้ทหารสามารถฝึกได้ปลอดภัย โดยไม่มีความเสี่ยงต่อการเสียชีวิตเหมือนการฝึกภาคสนาม

การจำลอง เทคโนโลยี AR และ VR ถูกใช้ในการจำลองสถานการณ์ที่ทหารอาจพบในสนามรบ รวมถึงการจำลองภูมิประเทศที่แตกต่างกัน สภาพอากาศ และกำลังศัตรู ทำให้ทหารสามารถฝึกการใช้ยุทธวิธีในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่จำลองเหมือนจริง

การรับรู้สถานการณ์ เทคโนโลยี AR สามารถใช้เพื่อให้ทหารได้รับข้อมูลแบบเรียลไทม์ (Real Time) เกี่ยวกับสภาพแวดล้อมในสถานการณ์รบ รวมถึงการให้ข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของพันธมิตรและศัตรู



ภาพที่ 1 Combat training with HMD in virtual reality

การวางแผนภารกิจ เทคโนโลยี AR และ VR ช่วยให้ทหารวางแผนภารกิจร่วมกันได้ รวมถึงการให้ทหารได้รับรายละเอียดของแผนที่และข้อมูลของภูมิประเทศในรูปแบบ 3 มิติ รวมถึงการจำลองสถานการณ์และผลลัพธ์ที่อาจเกิดขึ้นในสถานการณ์ต่าง ๆ



ภาพที่ 2 Simulation of a scenario in the MRE system

การรักษาทหารผ่านศึกป่วยทางจิตด้วยเทคโนโลยี VR

ทหารผ่านศึกมีปัญหาด้านสุขภาพจิตหลายประการ เช่น ภาวะเครียดหลังผ่านเหตุสะเทือนใจหรือ Post-Traumatic Stress Disorder (PTSD) ความวิตกกังวล ภาวะซึมเศร้า ข้อดีของการรักษาด้วย เทคโนโลยี วีอาร์ คือสามารถช่วยให้ทหารผ่านศึกที่เคยประสบกับเหตุการณ์ที่เกิดอันตราย ได้ย้อนกลับไปเหตุการณ์อีกครั้งแต่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่ปลอดภัยและอยู่ในการควบคุม ทหารผ่านศึกอาจจะตกอยู่ในสภาพแวดล้อมเสมือนจริงที่จำลองเหตุการณ์หรือสถานการณ์ที่ทำให้เกิดความเจ็บปวดทางจิตในอดีต โดยการเปิดเผยเรื่องราวที่ถูกทรมาน นักจิตวิทยาสามารถช่วยให้พวกเขาเรียนรู้ทักษะในการจัดการกับการตอบสนองทางอารมณ์ของตนเองได้ ซึ่งสามารถช่วยให้พวกเขาเรียนรู้การมีชีวิตรอด การตอบสนองทางอารมณ์ของตนเองได้ และแก้ปัญหาสุขภาพจิตได้ในที่สุด

การรักษาด้วยวิธีจิตบำบัด (Cognitive Behavioral Therapy หรือ CBT) เป็นการรักษาด้านเทคโนโลยี VR เป็นอีกหนึ่งวิธี โดย CBT ถูกออกแบบให้ช่วยทหารผ่านศึกระบุและเปลี่ยนแปลงจุดกำเนิดความคิดเชิงลบและแบบพฤติกรรมที่สามารถมีผลต่อสุขภาพจิตของพวกเขา ช่วยให้สามารถฝึกทักษะและพฤติกรรมใหม่ได้ จัดการกับความเจ็บปวดเรื้อรังได้ โดยการเข้าสู่สภาพแวดล้อมที่ผ่อนคลายและสงบ สามารถช่วยให้ลดความเจ็บปวดให้ความรู้สึกควบคุมและสงบได้

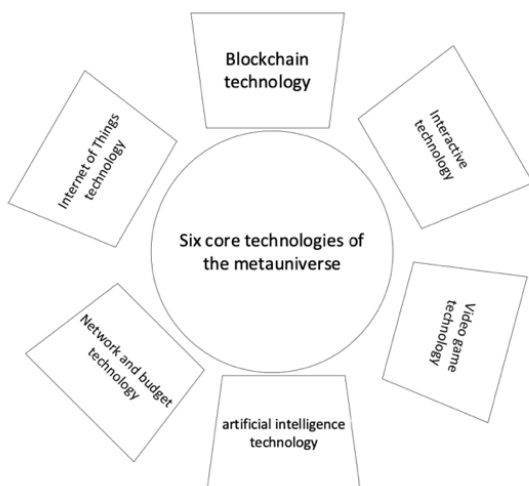
3.2 บทความวิจัยเรื่อง Research on the Application of Metaverse Technology in the US Army

Chenggong et al. [1] ด้วยการพัฒนาอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ เทคโนโลยีความจริงเสมือน บล็อกเชน และเทคโนโลยีอื่น ๆ แต่จกवाल นฤมิตรได้กลายเป็นทิศทางการพัฒนาต่อไปของโลกดิจิทัล บทความวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการแนะนำแนวคิดพื้นฐานและสถาปัตยกรรมทางเทคนิคของจักรวาล นฤมิตร ซึ่งรวมถึงเทคโนโลยีบล็อกเชน การปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ เกมอิเล็กทรอนิกส์ ปัญญาประดิษฐ์ เทคโนโลยีเครือข่าย การประมวลผล และฝาแฝดดิจิทัล

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์แนวโน้มความต้องการของกองทัพสหรัฐ ที่จะประยุกต์ใช้เทคโนโลยีจักรวาลนฤมิตรในอนาคต และมีหน่วยงานใหม่ในกองทัพของสหรัฐเพื่อก่อตั้งไม่กี่ปี กำลังสร้าง "จักรวาลนฤมิตร" ที่มีความเฉพาะเจาะจงสำหรับกองทัพ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการปฏิบัติการของกองทัพ อาทิ

สถาปัตยกรรมเทคโนโลยี Meta Cosmic

The Universe เป็นการผสมผสานของเทคโนโลยีใหม่หลายประเภท ซึ่งเรียกรวมกันว่า "BIGANT"



ภาพที่ 3 Meta cosmic technology architecture

จักรวาลนฤมิตรสร้างระบบนิเวศบนพื้นฐานของเทคโนโลยีบล็อกเชน (Blockchain technology) ในมิติ

ที่สูงขึ้น โดยใช้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ (Human-Computer Interaction Technology) มอบคุณประโยชน์ที่เฟลิดเฟลิดด้วยเทคโนโลยีเกมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Game Technology) ได้เรียนรู้เชิงลึกในหลายสถานการณ์โดยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence Technology) และสร้างโครงสร้างพื้นฐานโดยใช้เทคโนโลยีเครือข่ายและการคำนวณ (Network and Computing Technology) เช่น การเชื่อมต่ออัจฉริยะ (Smart Connection) การเชื่อมต่อเชิงลึก (Deep Connection) การเชื่อมต่อโฮโล-กราฟิก (Holographic Connection) การเชื่อมต่อทุกที่ไร้รอยต่อ (Ubiquitous Connection) และบริการการคำนวณ (Computing as a Service) ทั้งหมดนี้อยู่บนพื้นฐานของฝาแฝดดิจิทัล (Digital Twin) ช่วยสร้างภาพของโลกจริงขึ้นมา และผสมผสานกับโลกเสมือนจริงอย่างใกล้ชิด ทำให้ผู้ใช้สามารถผลิตเนื้อหาเฉพาะตัวหลากหลายได้ พร้อมทั้งสร้างพื้นที่ชีวิตดิจิทัลที่สมจริง

ปฏิสัมพันธ์ด้วย Interactive Technology

ความเป็นจริงขยาย (Extended Reality หรือ XR) หมายถึงการผสมผสานระหว่างความจริงและความเป็นจริงเสมือนผ่านคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างสภาพแวดล้อมเสมือนสำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ เช่น VR, AR, MR และอื่น ๆ

ผู้ใช้สามารถเข้าไปอยู่ในสภาพแวดล้อมด้วยอุปกรณ์ เช่น การสวมแว่น VR และอุปกรณ์ระบบสัมผัสต่าง ๆ ทำให้รู้สึกเหมือนอยู่ในโลกนั้นจริง เน้นการปฏิสัมพันธ์แบบเรียลไทม์ระหว่างผู้ใช้กับโลกเสมือนจริง คล้ายถูกห่อหุ้มตัว (Immersive) ในฉากรอบด้านที่สร้างขึ้นมาจากนั้นจำลองภาพนำมาซ้อนทับบนความโลกรจริงเพื่อให้ได้ประสบการณ์ทางประสาทสัมผัสที่เหนือกว่าความเป็นจริงแบบเรียลไทม์ จึงเรียกว่า Augmented Reality หรือ AR

เทคโนโลยีวิดีโอเกม

เทคโนโลยีเกมอิเล็กทรอนิกส์ที่กล่าวถึงนี้ ไม่ได้ครอบคลุมเพียงการสร้างแบบจำลอง 3 มิติและการเรนเดอร์แบบเรียลไทม์ที่เกี่ยวข้องกับ Game engine เท่านั้น แต่ยังรวมถึงเอนจิน 3 มิติและเทคโนโลยีการ

จำลองที่เกี่ยวข้องกับการทำฝาแฝดดิจิทัลอีกประการส่วนแรกคือเทคโนโลยีหลักในการพัฒนาโลกเสมือนและการปลดปล่อยประสิทธิภาพการผลิตจำนวนมาก ส่วนที่สองคือเครื่องมือสำคัญสำหรับการจำลองและสร้างโลกดิจิทัลจริง ด้วยการทำสำเนาดิจิทัลในโลกเสมือนจะต้องเป็นไปตามกฎของฟิสิกส์ เช่น แรงโน้มถ่วง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสง คลื่นวิทยุ กฎของความดัน และเสียง เกมเป็นสื่อที่ดีที่สุดสำหรับจักรวาลอนมิติ การมีความสมจริงที่ลึกซึ้งยิ่งขึ้นและอิสระในการเล่นที่สูงขึ้นเป็นตัวชี้วัดสำคัญในการเพิ่มความพึงพอใจของผู้ใช้

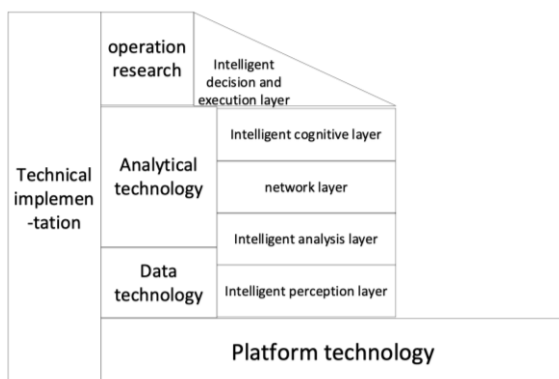
เทคโนโลยี AI

ปัจจุบัน เทคโนโลยี AI สามารถแบ่งเป็นหมวดหมู่สามประเภทตามมิติความสามารถได้ดังนี้

หมวดหมู่แรกคือ อัจฉริยภาพทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมุ่งเน้นให้มีความสามารถในการ “บันทึกและคำนวณ” ของคอมพิวเตอร์และเซิร์ฟเวอร์

หมวดหมู่ที่สองคือ อัจฉริยภาพทางสัญญาณ คือความสามารถของเครื่องในการ “ฟัง พูด และมองเห็น”

หมวดหมู่ที่สามคือ อัจฉริยภาพทางสติปัญญา ซึ่งเป็นความสามารถของเครื่องในการ “เข้าใจและคิด” การแปลเครื่อง และเทคโนโลยีอื่น ๆ



ภาพที่ 4 Artificial intelligence technology framework

ในสายงานของจักรวาลอนมิติ เทคโนโลยี AI อยู่ทุกที่และหนึ่งในทางเลือก คือ การใช้ AI สร้างกราฟิกที่เกี่ยวข้องกับการสร้างโลกเสมือนจริง จากนั้นปรับแต่งด้วยมือ ที่สำคัญส่วนใหญ่จะมีการลดระยะเวลาและการทำงานของแรงงานในการสร้างจักรวาลอนมิติลงมาก และประหยัดค่าใช้จ่ายในการพัฒนาอย่างมาก

เทคโนโลยีเครือข่ายและคอมพิวเตอร์

เครือข่ายและคอมพิวเตอร์เป็นปัญหาทางเทคนิคที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ของจักรวาลอนมิติในปัจจุบันต่อความต้องการพลังการประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่

เครือข่ายพลังการประมวลผลถูกนำเสนอเพื่อตอบสนองต่อแนวโน้มการรวมเครือข่ายพลังการประมวลผล เปลี่ยนจาก “การเชื่อมต่อ” เป็น “การเชื่อมต่อ+การประมวล” เพื่อให้เกิดการจัดการได้ง่าย ควบคุมได้ดี สามารถจัดสรรและกำหนดเวลาอย่างยืดหยุ่น ระหว่างคลาวด์ เครือข่าย Edge และ อุปกรณ์ปลายทางตามความต้องการ อาจหมายถึงการเข้าถึงอินเทอร์เน็ตที่มีความหน่วงเวลา (Latency) ต่ำ แต่ความเร็วสูง และมีขนาดใหญ่ในอนาคต (5G, 6G) ซึ่งสามารถรองรับการเข้าถึงเครือข่ายแบบพร้อมกันของผู้ใช้จำนวนมาก มีประสิทธิภาพ เสถียร และน่าเชื่อถือ เป็นวิธีที่ดีที่สุด

อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things)

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งไม่เพียงทำหน้าที่สะสมข้อมูลและประมวลผล Front-End ของโลกทางกายภาพ แต่ยังบริหารจัดการโลกทางกายภาพไปถึงโลกเสมือนของจักรวาลอนมิติ และให้ข้อมูลที่มาจากฝาแฝดดิจิทัล แบบเรียลไทม์ ที่แม่นยำต่อเนื่อง

ข้อเสนอแนะทางวิชาการ “จักรวาลอนมิติ” ในทางทหาร

Jennifer McArdle และ Caitlin Dohrman ของศูนย์ New American Security Center ได้เผยแพร่บทความบนเว็บไซต์ทหารของสหรัฐ “War Dilemma” เมื่อเดือน มีนาคม 2021 เสนอว่า “จักรวาลอนมิติ” เป็นชุดของโลกเสมือนที่เชื่อมต่อและนำเสนอสมมูลให้กับโลก และทำให้ผู้ใช้มีปฏิสัมพันธ์ผ่านการสื่อสารและการจำลองโลกเสมือนยังมีลักษณะของสถาปัตยกรรมที่เปิดกว้าง มนุษย์ควรจะสามารถสร้างจักรวาลอนมิติของตนเองได้ง่ายเช่นกับที่เคยสร้างหน้าเว็บส่วนบุคคลในยุคก่อน

ทหารสหรัฐได้เริ่มใช้เทคโนโลยีจักรวาลอนมิติเป็นเวลากว่าหลายปีแล้ว ในปี ค.ศ. 1980 ทหารของสหรัฐได้พัฒนาเทคโนโลยี “Simulation Network Technology” หรือ SIMNET และใช้ในการฝึกอบรมและฝึกซ้อมในขนาดใหญ่ เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีจำลองครั้ง

แรกในวงการอุตสาหกรรมการป้องกันประเทศเมื่อ 20 ปีที่ผ่านมา การพัฒนาเทคโนโลยี เช่น “Distributed Interactive Simulation” และโครงสร้างขั้นสูง ได้ทำให้ทหารสามารถจำลองสภาพอากาศและสภาพแวดล้อมในสนามรบได้ดียิ่งขึ้น โดยใช้วิธีการจำลองต่าง ๆ เพื่อการฝึกซ้อม ถึงแม้จะมีความสำเร็จในการฝึกซ้อมด้วยการจำลองในอดีตมากมาย การฝึกซ้อมด้วยการจำลองที่ไม่ซับซ้อนเท่าที่ควร ยังคงไม่มีความสมบูรณ์ เนื่องจากโมเดลการฝึกซ้อมบางรูปแบบยังเป็นรูปแบบที่ง่ายมาก

“จักรวาลนฤมิต” ทางทหารไม่เพียงแต่ใช้ในการฝึกซ้อม แต่ยังมีบทบาทในการศึกษาวิชาทหารอีกด้วย Jennifer McArdle และ Caitlin Dolman กล่าวว่า การศึกษาของทหารกำลังเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรง เมื่อปี ค.ศ. 2018 เป็นยุคของ “ภาวะเศรษฐกิจที่ถดถอย” กลุ่มคณะนายทหารอาวุโสของกองทัพบกวิธีเปลี่ยนแปลงพื้นฐานในการเตรียมความพร้อม การฝึกอบรมและวิธีการฝึกซ้อม และจักรวาลนฤมิตสามารถทำให้การฝึกทหารไม่จำเป็นต้องฝึกเป็นระยะแบบดั้งเดิมกลายเป็น “โอกาสการศึกษาที่สามารถพกพาได้” ไม่จำเป็นต้องรอให้ถึงเวลาฝึกตามกำหนดเวลา แต่เป็นการฝึกเมื่อใดก็ได้ และฝึกบ่อยเท่าที่ตนต้องการ เป็นการสร้างทหารมืออาชีพอย่างแท้จริง



ภาพที่ 5 เทคโนโลยี Meta-space ใช้ในการฝึกซ้อมและจำลองสถานการณ์ทางทหาร Training and Simulation

เทคโนโลยี Meta-space สามารถใช้ในการฝึกซ้อมและจำลองสถานการณ์ เพื่อให้ทหารได้รับประสบการณ์

กับสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นจริงในสภาพแวดล้อมเสมือนจริง สามารถช่วยให้ทหารปรับปรุงทักษะการต่อสู้กลยุทธ์และยุทธวิธีได้ เช่น ทหารสามารถจำลองการต่อสู้ในเมือง การช่วยเหลือในสนามรบ การโจมตีจากกลุ่มก่อการร้าย และสถานการณ์อื่น ๆ ใน Meta-space ได้

เพื่ออำนาจทางการทหาร สหรัฐลงทุนอย่างมากในการฝึกซ้อมทหาร ไม่เพียงแต่ใช้ทรัพยากรมนุษย์ ทรัพยากรการเงิน และวัสดุอย่างมาก แต่การฝึกทำให้ทหารเสียชีวิตมากกว่าในสนามรบทุกปี ดังนั้นการใช้เทคโนโลยีจำลองเสมือนจริงในการฝึกทหาร ถือเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการประหยัดเงิน และลดการบาดเจ็บ สูญเสีย เพื่อสร้างไอเดียใหม่ กลยุทธ์ใหม่ เทคโนโลยีใหม่ ขั้นตอนใหม่ และกฎใหม่

Integrated Training Environment (ITE) คือ ระบบการฝึกอิสระที่รวมกันในห้องดิน ทะเล อากาศ ไฟฟ้า และ “ไซเบอร์สเปซ” ที่กำลังถูกพัฒนาโดยกองทัพบกของสหรัฐอเมริกา สามารถรวมสภาพแวดล้อมการฝึกที่เป็นจริง เสมือนจริง สิ่งก่อสร้างและเกมเข้าด้วยกัน รวมถึง terrain system “โลกเดียว” โดยใช้เครื่องมือเพียง ซอฟต์แวร์จำลองการฝึก เครื่องมือการจัดการการฝึก และอุปกรณ์การฝึกรวมกลุ่มเสมือนจริง

การศึกษาวิชาการทหารในจักรวาลนฤมิต

ทหารสหรัฐสามารถให้การศึกษาสำหรับทหารใหม่ได้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกำลังพลอย่างฉับพลัน เป็นการถ่ายทอดความรู้จากการขาดทหารมืออาชีพไปสู่ทหารใหม่ด้วยการศึกษาผ่านเทคโนโลยีโลกเสมือน ตั้งแต่สหรัฐเผยแพร่เอกสารกลยุทธ์การป้องกันประเทศในปี 2018 ซึ่งเปิดเผยว่าการศึกษาทางทหารของสหรัฐกำลังอยู่ในสถานะ “ชะลอการเติบโต” ผู้บัญชาการร่วมของสหรัฐได้พยายามแก้ไขวิธีการฝึกอบรมและการศึกษาของผู้นำทหารในอนาคตให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งหมด พวกเขาหวังว่าโอกาสในการเข้าถึงการศึกษาทางทหารจะไม่แตกต่างกันและไม่มีการแบ่งแยก และสามารถดำเนินกิจกรรมการศึกษาทางทหารได้ตลอดชีวิตการทำงานตามความต้องการของบุคลากรทหารทุกคน และการศึกษาสามารถเรียนได้ทุกที่ และ “พกพา” ได้

โดยเฉพาะตั้งแต่การระบาดของ COVID-19 เริ่มต้น

สถาบันการศึกษาทหารในสหรัฐได้เริ่มมองหาวิธีการให้โอกาสการศึกษาให้แก่ทหารผ่านการจำลองสนามรบ เกมสงคราม และวิธีการเสมือนจริงอื่น ๆ โดย The National Simulation Center of the United States Army ได้เริ่มใช้เทคโนโลยีเสมือนเพิ่มเติมเพื่อช่วยให้ทหารสร้างฉากต่อสู้เสมือนจริงในหลายพื้นที่

จักรวาลอนมิติทางทหารสามารถนำเอาผลการศึกษาของทหารมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการศึกษาได้ยอดเยี่ยม โดยรวมกับเทคโนโลยีขั้นสูงต่าง ๆ ตลอดจนการนำเข้าข้อมูลบุคคลของทหาร และบันทึกประวัติการต่อสู้ในสนามรบเสมือนจริงมาประเมินผลได้

การซ้อมปฏิบัติการ

เนื่องจากเทคโนโลยีโลกเสมือนจริง สามารถวิเคราะห์ฉากการจำลองที่ซับซ้อนได้ และสามารถนำมาใช้ในการซ้อมปฏิบัติการรบได้ เช่น การซ้อมปฏิบัติการจำลองสนามรบเฉพาะแห่ง โดยกำหนดเงื่อนไขความเสี่ยงและการทำนายสถานการณ์ที่ต่างกันไป เพื่อนำมาวิเคราะห์เทคนิคทางทหาร เทคโนโลยี Metacosmic สามารถรวมและเชื่อมต่อข้อมูลซับซ้อนจำนวนมากได้ และทำการทำนายผลลัพธ์ของทุกขั้นตอนและแนวโน้มในอนาคตได้ในเวลาเดียวกัน เทคโนโลยี Meta-space ยังสามารถใช้ตัวอย่างข้อมูลชิ้นเล็ก ๆ เพื่อประเมินผลลัพธ์จำนวนมากได้ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากในการซ้อมปฏิบัติการรบ

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Meta-space ในการซ้อมปฏิบัติการเป็นการบ้านที่ทหารสามารถนำกลับไปฝึกซ้อมที่บ้านได้ การจำลองสถานการณ์ทางง่ายขึ้นและมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ด้วยการใช้เทคโนโลยีเมตาเวิร์สจำลองการตัดสินใจเชิงยุทธวิธี นอกจากนี้ผู้เข้าร่วมสังเกตการณ์ยังสามารถแลกเปลี่ยนประสบการณ์และหารือกันเพื่อกำหนดเส้นทางที่ดีที่สุด ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานร่วมกันของทีมและให้คุณภาพการตัดสินใจที่ดีที่สุดเกิดขึ้นได้

4. การวิจัยและพัฒนา

4.1 การสำรวจ และถอดแบบอาคารจากภาพถ่าย

สิ่งสำคัญที่สุดในระบบจักรวาลอนมิติ ก็คือการสร้างฉากให้สมจริงมากที่สุด โดยเฉพาะขนาดของอาคาร ห้อง หรือยานพาหนะ เมื่อใส่แว่น VR เข้าไปอยู่ในนั้น

แล้วประสาทสัมผัสจะบอกผู้ใช้ว่าเป็นของจริง

ในอดีต การสร้างฉาก และวัตถุในโลกเสมือน ต้นทุนสูง ต้องว่าจ้างบริษัทผลิตรายการโทรทัศน์ทำการสร้างให้ จึงเป็นอุปสรรคในการนำเทคโนโลยีจักรวาลอนมิติมาใช้ในการศึกษาวิชาวิศวกรรม โครงการวิจัยพัฒนานี้จึงเป็นการสาธิตด้วยการไม่ใช้งบประมาณ และเลือกใช้โปรแกรมที่ไม่มีค่าใช้จ่าย

ดังนั้นการฝึกวิชาทหารและการเรียนวิศวกรรมป้องกันประเทศด้วยจักรวาลอนมิติในปัจจุบัน จึงเป็นเพียงแค่จุดเริ่มต้น และมีโอกาสอีกมากทางการศึกษาวิจัยพัฒนา

โครงการวิจัยพัฒนานี้ เริ่มต้นให้เห็นการสาธิตสร้างอาคารในจักรวาลอนมิติเพื่อปฏิบัติการทางการทหาร เริ่มต้นด้วยการสร้างฉาก โดยเฉพาะการสร้างอาคารให้ได้ก่อน และสถานการณ์จริง ทหารไม่มีแบบแปลนอาคารเป้าหมายของการโจมตี แต่อาจจะทำได้เพียงส่งสายลับเข้าไปสำรวจ โดยไม่สามารถใช้ตัวเล็งเมตรออกมาวัดขนาดอาคารได้ จึงต้องหาข้อมูลรายละเอียดอาคารทางอ้อมให้มากที่สุดเพื่อนำมาสร้างอาคารวางแผนโจมตีสถานที่

ผู้วิจัยเลือกสร้างอาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร. เพราะงดงามตระการตาทรงคุณค่า และสามารถนำไปต่อยอดใช้ประโยชน์อีกมากมายในการพัฒนาเป็นแหล่งศึกษาวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศในจักรวาลอนมิติต่อไปในอนาคต

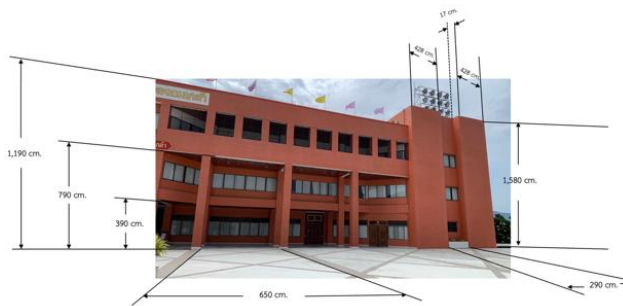
ผู้วิจัยไม่มีแบบแปลนอาคารเช่นเดียวกับสถานการณ์จริง จึงจำลองสถานการณ์เข้าไปเยี่ยมชมอาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร. และนำเลเซอร์วัดระยะอาคารแบบพกพาเข้าไปด้วย



ภาพที่ 6 การสำรวจอาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร. และวัดขนาดด้วยเลเซอร์พกพา

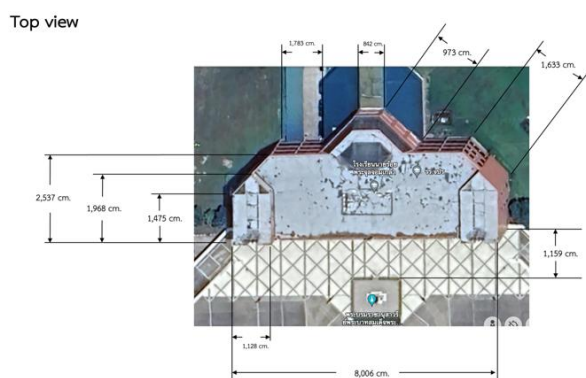
โดยใช้เวลาน้อยที่สุด เก็บภาพรายละเอียด อาคาร
อิฐ ยิงเลเซอร์วัดระยะพื้นถึงเพดาน และระยะห่าง
ระหว่างเสา โดยข้อมูลแรกที่ได้คือ ระยะห่างระหว่างเสา
ส่วนใหญ่มีระยะ 650 ซม. และเพดานสูง 390 ซม.

เมื่อได้ความสูงของเพดาน และระยะห่างระหว่างเสา
ในชั้นที่ 1 ของอาคารเป็นข้อมูลเบื้องต้นแล้ว ประเมินได้
ว่าทั้ง 3 ชั้นมีความสูงระหว่างพื้นและเพดานเท่ากัน
นำมาวิเคราะห์กับภาพถ่ายสามารถถอดระยะความสูง
ทั้งอาคารและหาขนาดต่าง ๆ สรุปผลได้ในภาพที่ 7
ดังนี้



ภาพที่ 7 มุม Oblique projection และถอดขนาด
อาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร.
จากภาพถ่าย

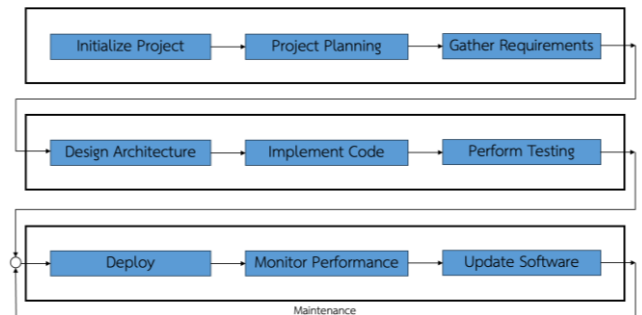
จากนั้นคำนวณหาจำนวนเสาและหาขนาดต่าง ๆ
ของอาคารที่ไม่สามารถใช้เลเซอร์วัดได้ โดยใช้ภาพถ่าย
จากดาวเทียม Google Earth และเครื่องมือวัดใน
แพลตฟอร์ม (Photogrammetry) นำมาถอดแบบได้
รายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 8 มุม Top View เมื่อถอดขนาดอาคาร
กองบัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร.
จากดาวเทียม

4.2 สร้างกรอบการทำงาน

การสร้างกรอบการทำงาน (Framework) ช่วยให้
วิศวกรและนายทหารเห็นกิจกรรมย่อยทั้งหมดในการ
ดำเนินโครงการ และสามารถลดขั้นตอนการทำงานหรือ
เสริมขั้นตอนการทำงานให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นได้ โดยการ
สร้างอาคารในจักรวาลนอญของโครงการนี้เป็นภาพที่ 9

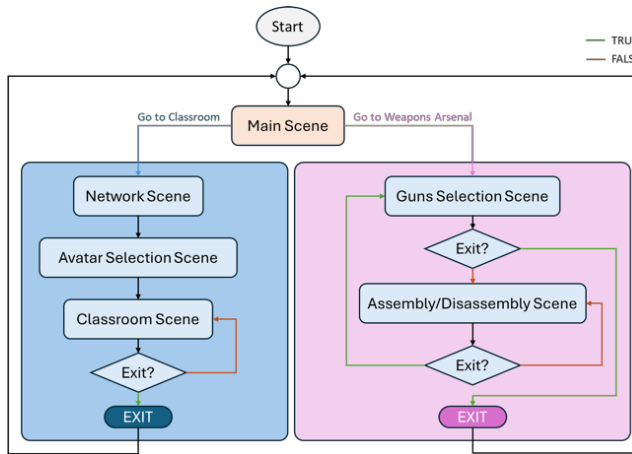


ภาพที่ 9 Framework การสร้างอาคารในจักรวาล
นอญ

การสร้างอาคารในจักรวาลนอญ มีกรอบการทำงาน
ที่สำคัญ คือ การริเริ่มโครงการ การวางแผนโครงการ
การกำหนดความต้องการของระบบ การออกแบบฉาก
หรือสถาปัตยกรรมระบบ การเขียนสคริปต์ของระบบ
การทดสอบระบบ การปรับใช้ (Deploy) การติดตาม
ประสิทธิภาพการทำงาน และการแก้ไขปรับปรุงระบบ
(Update software)

4.3 การวางแผนโครงการและกำหนดความ ต้องการของระบบ

ก่อนที่จะดำเนินการสร้างอาคารในจักรวาลนอญ
จำเป็นต้องวางแผนหรือออกแบบฉากของเกมในขั้นต้น
ด้วย เพื่อจะได้เห็นภาพรวมตอนจบโครงการ ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แผนภาพการสร้างอาคารในจักรวาลนฤมิต

จากภาพที่ 10 แผนภาพการสร้างอาคารในจักรวาลนฤมิต ภาพที่สร้างในโปรแกรม เบลนเดอร์ จะเป็นเพียงวัตถุชุดหนึ่งคล้ายอาคารในโลกความจริง แต่เกมคือสร้างปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และคอมพิวเตอร์ ในการดำเนินกิจกรรมตามวัตถุประสงค์ของโครงการใช้โปรแกรม ยูนิตี้ (Unity) สร้างจักรวาลนฤมิตจากภาพ 3 มิติที่สร้างในโปรแกรม เบลนเดอร์

โดยคำนึงถึงฉากแรกที่เข้ามา (Main scene) ในจักรวาลนฤมิตของโครงการ เป็นอาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร. และระบบมีจุดให้เลือกการเรียนรู้ในห้องถัดไปแบ่งเป็น 2 ฉาก คือ เข้าห้องเรียน (Classroom scene) หรือเข้าห้องเรียนอาวุธปืน (Weapons Assembly/Disassembly scene) โดยมีกิจกรรมย่อยที่ต้องดำเนินงาน ดังนี้

4.3.1 ฉากแรก (Main scene)

- แบบจำลองภูมิประเทศ (Terrain)
- แบบจำลองอาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร. สามมิติ (3D Model)
- อาหาร ของผู้ใช้
- ส่วนต่อประสานผู้ใช้ (User Interface: UI)
- ระบบเคลื่อนย้ายฉาก

4.3.2 ฉากห้องเรียน (Classroom scene)

- แบบจำลองห้องรับรองสุโขทัย (Interior model)
- ภาพถ่ายและรายนาม ผบ.จปร.
- ระบบเครือข่ายผู้เล่นหลายคน (Multiplayer network system)

- ระบบถ่ายทอดสด (Streaming system)
- ส่วนต่อประสานผู้ใช้ (User Interface: UI)
- ระบบเคลื่อนย้ายฉาก

4.3.3 ฉากห้องเรียนอาวุธปืน (Weapons Assembly/Disassembly scene)

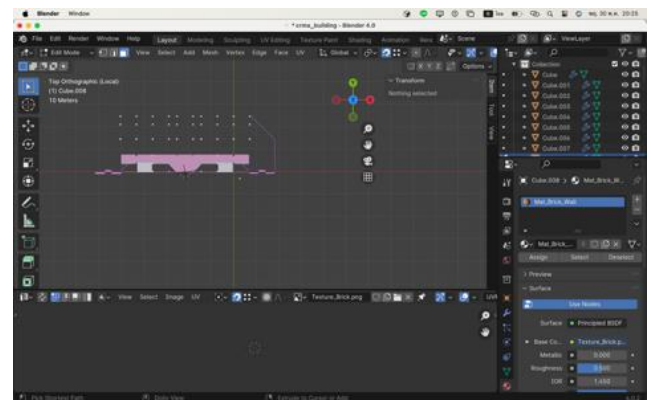
- แบบจำลองสามมิติของอาวุธปืนที่เลือก
- ส่วนต่อประสานผู้ใช้ (User Interface: UI)
- ระบบการประกอบอาวุธปืนสามมิติ
- ระบบเคลื่อนย้ายฉาก

4.4 การสร้างฉากแรก (Main scene) อาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร.

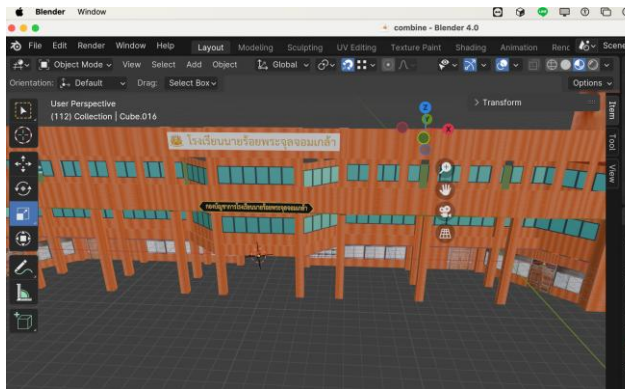
หลังจากการสำรวจได้ผลขนาดต่าง ๆ ของอาคารเท่าที่ทำได้ ประกอบกับการวิเคราะห์ภาพถ่าย สามารถคำนวณถอดแบบได้ ขนาดความสูง ความกว้าง ระยะห่างเสา ความสูงเพดาน และจำนวนเสาของอาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร. ครบทั้งหมดแล้ว นำข้อมูลมาขึ้นรูปต้นแบบอาคารในโปรแกรม เบลนเดอร์ ได้ดังนี้

4.4.1 โครงสร้างอาคาร

ใส่ข้อมูลขนาดโครงสร้างทั้ง 3 มิติของอาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร. ลงในโปรแกรม เบลนเดอร์ ดังนี้



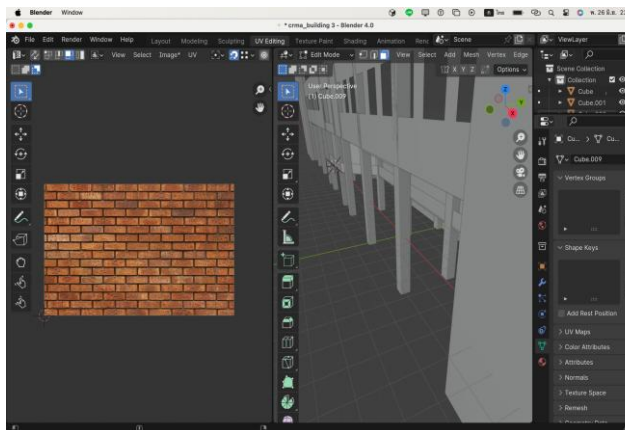
ภาพที่ 11 ภาพด้านบน Top View อาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร.



ภาพที่ 12 ภาพด้านหน้า Front view อาคาร
กองบัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร.

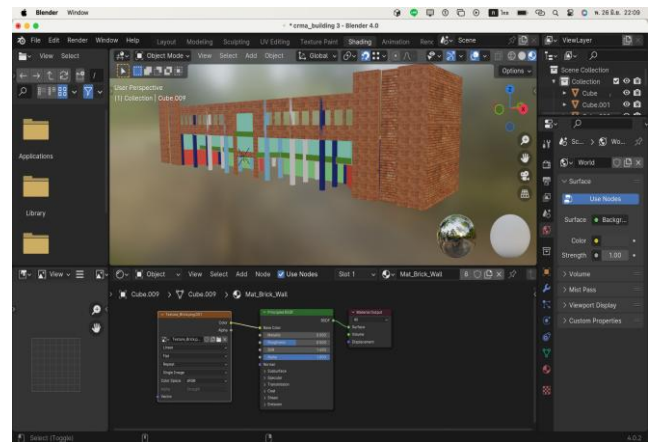
4.4.2 การสร้างพื้นผิวอาคารเสมือนจริง

เลือกฟังก์ชัน UV Editing นำพื้นผิวอาคารที่เลือกมาวางทับบนกระดานตาข่าย 3 มิติ ในกระบวนการจำลองบนระนาบ 2 มิติ เพื่อกำหนดขอบเขตพื้นที่ที่จะทำการปรับปรุงพื้นผิว (Texture) ของอาคาร ดังภาพที่ 13

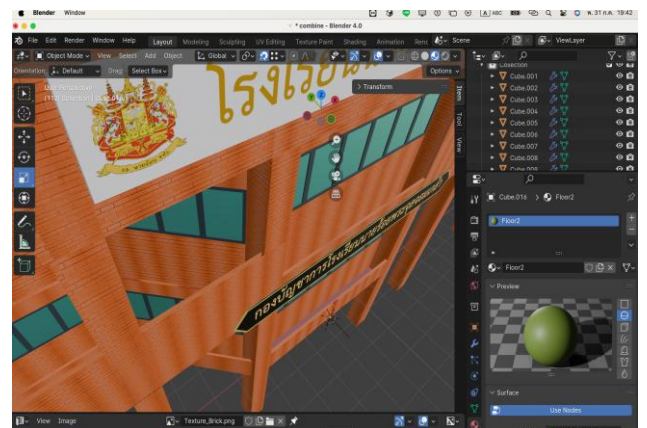


ภาพที่ 13 ใช้ UV Editing กำหนดพื้นผิวอาคาร

เลือก Shading คลิกพื้นที่ที่ต้องการแล้วเลือก Control A หรือ Add texture แล้วเลือกไฟล์ภาพอิฐที่มีสีเหมือนอาคารจริง (Texture_bricks.png) ลากเส้นจากล่องจุด color ไปเชื่อมกับล่อง Principled BSDF ที่จุด Base color ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ใช้ Shading เลือกไฟล์สีอิฐใส่พื้นผิว

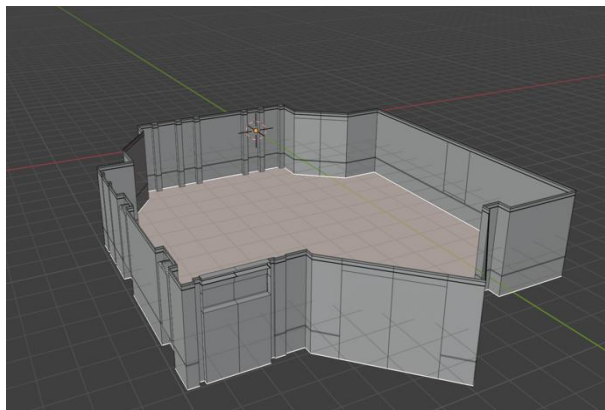


ภาพที่ 15 ใช้ Texture Paint เลือกไฟล์สีอิฐใส่พื้นผิว
อาคาร

4.5 การสร้างห้องรับรองสุโขทัย (Classroom scene)

ห้องรับรองสุโขทัย อยู่บริเวณชั้น 1 อาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร. ใช้เป็นห้องรับรองหรือสัมมนาในจักรวาลนฤมิต (Metaverse Auditorium) และใช้เป็นห้องทำการเรียนการสอนในโลกเสมือน

โดยสามารถวัดขนาดห้องรับรองสุโขทัย ได้บางส่วนและคำนวณขนาดใส่ใน โปรแกรม เบลนเดอร์ ได้ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 การขึ้นโครงสร้างห้องสุโขทัยตามขนาดจริงที่ได้จากการสำรวจ

เมื่อทำการ เลือก Shading คลิกพื้นที่ และเลือกสีให้เหมือนจริงที่สุด นำภาพ ผบ. จปร. แต่ละท่านใส่ผนังในห้องรับรองสุโขทัย ได้ผลดังภาพที่ 17



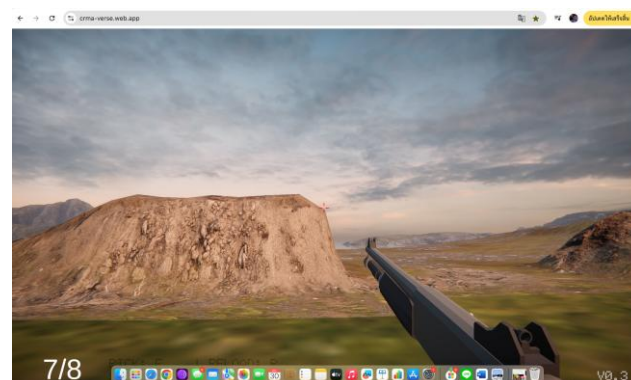
ภาพที่ 17 การใส่รายละเอียดห้องสุโขทัย ภาพและรายชื่อนายบัญชาการจากอดีตถึงปัจจุบัน

ฉากห้องเรียน เป็นฉากที่ผู้ใช้หลายคนสามารถเข้ามาเรียนรู้พร้อมกันได้ โดยมีลักษณะที่ผู้สอนสามารถนำไฟล์วิดีโอการบรรยายมาเก็บไว้ (Upload) หรือลิงก์วิดีโอจากยูทูบ (YouTube) มาเชื่อมต่อ ซึ่งในห้องสุโขทัยในอาคารจริง สามารถเลื่อนจอโปรเจกเตอร์ลงมาจากฝ้าเพดาน ใช้นำเสนอแขกผู้ใหญ่ที่เข้ามาหารือหรือเยี่ยมชม

โรงเรียนนายร้อย จปร. และในการออกแบบในจักรวาลนฤมิตของโครงการนี้ ห้องรับรองสุโขทัยสามารถให้อาจารย์ยืนบรรยายพร้อมกับเปิดสไลด์หรือฉายวิดีโอที่จอในโลกเสมือนได้เช่นกัน ซึ่งผู้ใช้สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ท่านอื่นได้ที่เป็นอาหารเข้ามาพบกันในห้องรับรองสุโขทัย และยังสามารถรับชมสื่อการสอนได้ผ่านการถ่ายทอดสดของผู้สอนภายในฉากห้องเรียน

4.6 การสร้างห้องเรียนอาวุธปืน

ห้องเรียนรู้การประกอบอาวุธปืน (Weapons Assembly/Disassembly scene) เป็นฉากที่ผู้ใช้สามารถเรียนรู้ การถอด และการประกอบยุทธโธปกรณ์ เช่น ปืนยาวจูโจม รุ่น M16 A4 ปืนสั้น M1911 และปืนยิงลูกระเบิด M79 เป็นต้น โดยนำเข้า Asset และใช้โปรแกรม Unity เคลื่อนย้ายฉาก



ภาพที่ 18 ฉากทดลองยิงปืน

โครงการนี้ใช้โปรแกรม ยูนิตี สร้างโปรเจกต์และตั้งค่าให้รองรับ WebGL Unity เป็นระบบที่ใช้สำหรับรันเกมหรือแอปพลิเคชันที่พัฒนาโดย Unity บนเว็บเบราว์เซอร์ โดยใช้เทคโนโลยี WebGL ซึ่งเป็น API ที่ช่วยให้เรนเดอร์กราฟิก 2D และ 3D ได้โดยไม่ต้องติดตั้งปลั๊กอินเพิ่มเติม

โดยการตั้งค่า File > Build Settings แล้วเลือก WebGL แต่งค่าการ Player Settings ปรับกราฟิกขนาดหน้าจอ และกด Build and Run เพื่อทดสอบแล้วส่งไฟล์ไปเก็บยัง เว็บ เซิร์ฟเวอร์ (Web Server) ซึ่ง Link โครงการนี้อยู่ที่ <https://crma-verse.web.app/>

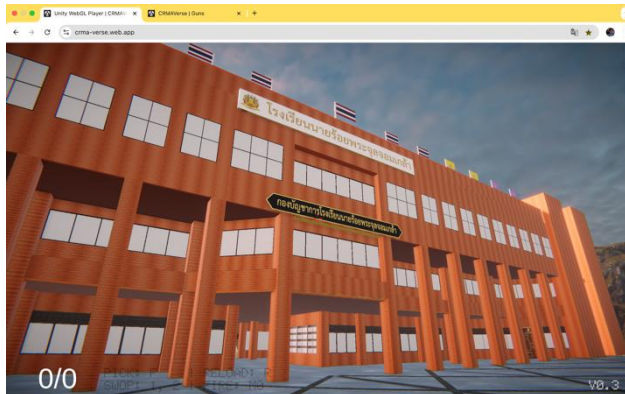
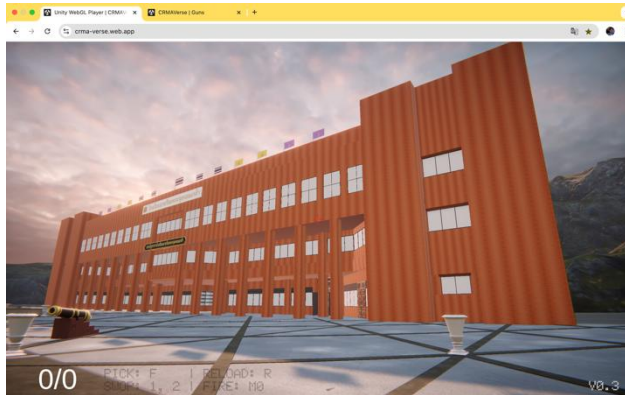
5. ผลการทดลอง

ภาพที่สร้างในโปรแกรม เบเลนเดอร์ นำมาประกอบ

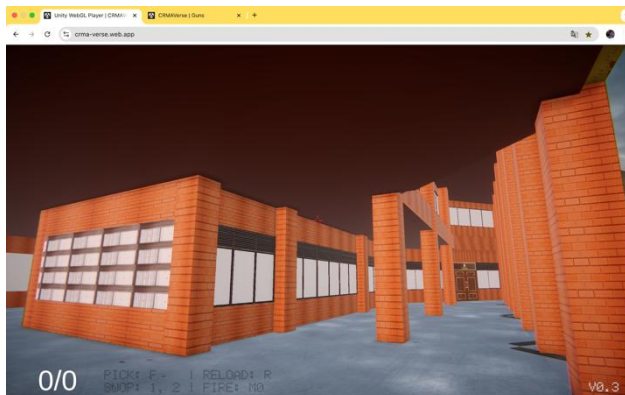
เงื่อนไขต่าง ๆ ด้วยโปรแกรม ยูนิติ เป็นอาคารกองบัญชาการ รร.จปร. ในจักรวาลนฤมิตที่เข้าใช้งานบนเว็บเบราว์เซอร์ที่สมบูรณ์ โดยมีผลการทดลองใช้งานดังนี้

5.1 ฉากแรก

เมื่อเข้า URL มาฉากแรก จะเป็นอาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร. ดังนี้



ภาพที่ 19 อาคารกองบัญชาการ รร.จปร. ด้านหน้าเมื่อเข้ามาในจักรวาลนฤมิตของโครงการ



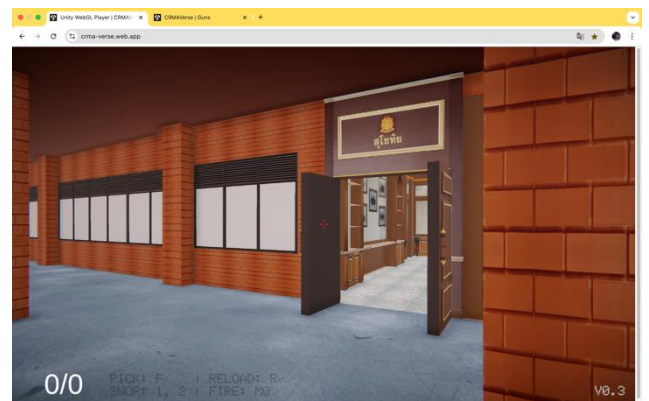
ภาพที่ 20 บริเวณชั้น 1 อาคารกองบัญชาการ รร.จปร. ในจักรวาลนฤมิต

ผู้ใช้งานสามารถเดินสำรวจรอบอาคารได้ จะมองเห็นอาคารในสัดส่วนต่าง ๆ เหมือนจริง และเมื่อเดินไปทางขวาสุดของอาคารในชั้นที่ 1 จะพบห้องรับรองสุโขทัย

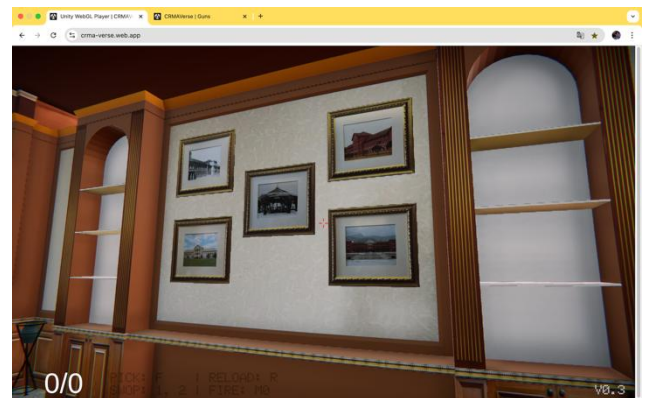
5.2 ฉากที่สอง

ฉากห้องรับรองหรือห้องเรียน โดยใช้ห้องรับรองสุโขทัยเป็นต้นแบบในการสร้าง

เมื่อมาถึงหน้าห้องรับรองสุโขทัยจะพบ ประตูห้องเปิดต้อนรับอยู่ ดังภาพที่ 21 และเมื่อเดินเข้าไปภายในห้องจะพบความงดงามเหมือนห้องจริงทุกประการ ทั้ง โคมไฟ ผนัง ภาพถ่าย โซฟา หรือแม้แต่ปลอกหมอนบนโซฟา



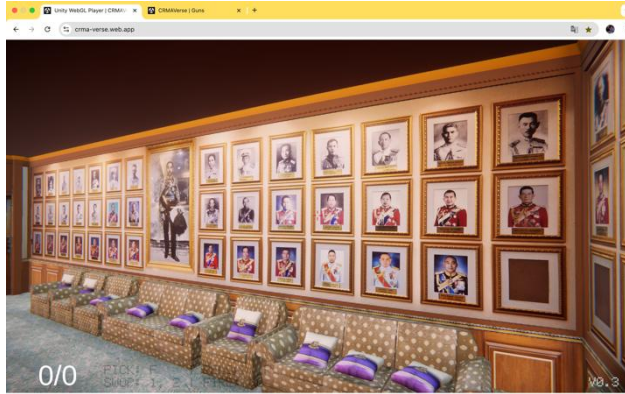
ภาพที่ 21 หน้าห้องรับรองสุโขทัย ชั้นที่ 1 อาคารกองบัญชาการ รร.จปร. ในจักรวาลนฤมิต



ภาพที่ 22 ภาพถ่ายติดผนังในห้องรับรองสุโขทัย

เมื่อเดินไปยังผนังทางด้านขวาของห้องจะพบภาพถ่าย และรายนามของอดีตผู้บัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร. และระบุปีที่ดำรงตำแหน่งนับจากท่านแรกที่ก่อตั้ง จปร. จากอดีตมาจนถึงปัจจุบัน สามารถ

เดินไปอ่านที่ผนังได้อย่างใกล้ชิดในจักรวาลนฤมิต ซึ่งเก็บรายละเอียดอย่างงดงามและทรงคุณค่าทางประวัติศาสตร์

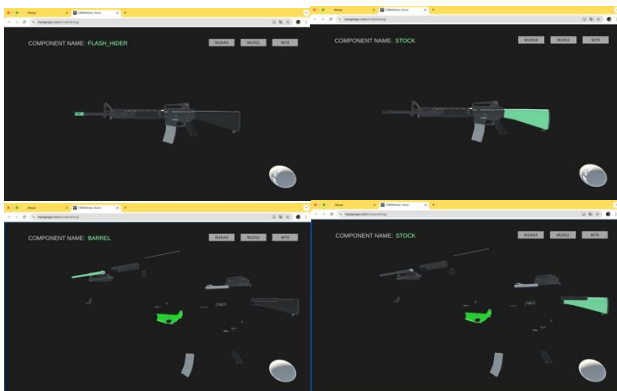


ภาพที่ 23 ภาพถ่ายและรายนามผู้บัญชาการ จปร.

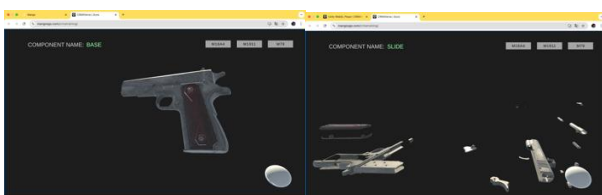
5.3 ฉากที่สาม

ห้องเรียนรู้อาวุธปืน โดยเข้า URL ที่ <https://mangosgo.com/crmatraining/>

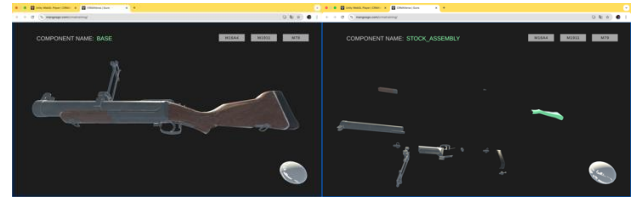
โดยปืนทั้ง 3 ชนิด เมื่อเอาลูกศรไปชี้ จะบอกชื่อชิ้นส่วนปืน และเมื่อกดคลิก จะถอดชิ้นส่วนนั้นออกทีละชิ้น สามารถขยาย ย่อ หมุนดูได้ 360 องศา และสามารถประกอบกลับคืนได้ โดยมีปืนที่ใช้ศึกษา คือ ปืนยาวจู่โจม รุ่น M16A4 ปืนสั้น M1911 และปืนยิงลูกระเบิด M79 มีผลการดำเนินงานดังนี้



ภาพที่ 24 อาวุธปืนยาวจู่โจม รุ่น M16A4



ภาพที่ 25 อาวุธปืนเล็กสั้น รุ่น M1911



ภาพที่ 26 อาวุธปืนยิงลูกระเบิด M79

6. สรุปและอภิปรายผล

การวิจัยพัฒนาโครงการนี้ ใช้อาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร. เป็นต้นแบบในการสาธิตถอดแบบหาขนาดนำมาสร้างอาคารผ่านโปรแกรม เบลนเดอร์ และสร้างฉากโลกเสมือนด้วยโปรแกรม ยูนิตี้ ซึ่งทั้งสองโปรแกรมเป็นโปรแกรมโอเพ่นซอร์สที่ให้ใช้งานฟรีที่ได้รับความนิยมสูงในปัจจุบัน โดยมีข้อสรุปและอภิปรายผลส่วนต่าง ๆ ของโครงการดังนี้

6.1 อาคารกองบัญชาการ รร.จปร.

การสร้างอาคารในจักรวาลนฤมิตเป็นสิ่งสำคัญที่สุดประการหนึ่ง ในสมัยก่อนต้องว่าจ้างการผลิตด้วยราคาสูงมาก โครงการวิจัยพัฒนานี้จึงสาธิตการสร้างอาคารในจักรวาลนฤมิตแม้ไม่มีแบบแปลนอาคาร จึงต้องสำรวจ วัดระยะทางเสา หาขนาดความสูงด้วยมือหรือเลเซอร์ รวมทั้งถอดแบบรายละเอียดอาคาร วัสดุ ขนาดอิฐ จากภาพถ่าย ตลอดจนหาขนาดอื่น ๆ จากภาพถ่ายดาวเทียม Google Earth ด้วยเครื่องมือวัดในแพลตฟอร์ม

ผลการทดลอง ออกมาสวยงามเสมือนจริงในทุกมิติ และสัดส่วนต่าง ๆ ของอาคาร ประตู่ หน้าต่าง เมื่อเทียบกับคนในโลกจริงเดินในบริเวณอาคารกองบัญชาการ รร.จปร. จะมองเห็นในระดับสายตาเดียวกัน

6.2 ห้องรับรองสุโขทัย

ในส่วนห้องรับรองสุโขทัย อยู่ภายในอาคารกองบัญชาการ รร.จปร. บริเวณชั้น 1 ซึ่งห้องนี้มีความสำคัญอย่างยิ่ง ด้วยมีภาพและนามอดีตผู้บัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร. ทั้งหมด เหมาะสมในการเป็นห้องรับรองเป็นห้องเรียนหรือ Metaverse Auditorium ต้อนรับอาหารผู้มาเยี่ยมชมออนไลน์

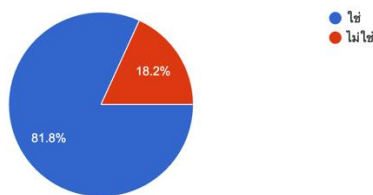
ผลการทดลอง ออกมาสวยงามเสมือนจริงในทุกมิติ และสัดส่วนต่าง ๆ โดยเฉพาะภาพและนามอดีตผู้บัญชาการโรงเรียนนายร้อย จปร.

6.3 ส่วนการเรียนรู้การประกอบชิ้นส่วนอาวุธปืน

การวิจัยพัฒนาโครงการนี้ ได้เพิ่มในส่วนของ Courseware การเรียนรู้ส่วนประกอบอาวุธปืนที่ใช้เพื่อศึกษาในโครงการนี้ จำนวน 3 ชนิด คือ ปืนยาวจูโจมรุ่น M16A4 ปืนสั้น M1911 และปืนยิงลูกระเบิด M79

โดยผู้วิจัยได้ทำการสำรวจความเห็นอดีตนักเรียนนายร้อย จปร. และนักเรียนนายร้อยเหล่าอื่น จำนวน 22 ราย ว่ามีความพึงพอใจต่อส่วนการเรียนรู้การประกอบชิ้นส่วนอาวุธปืนของโครงการนี้ ผลการสำรวจเป็นดังนี้

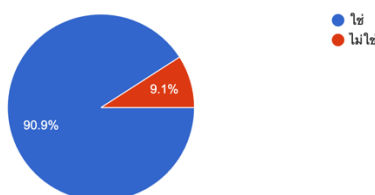
ท่านเคยเรียน โรงเรียนนายร้อย จปร.
คำตอบ 22 ข้อ



ภาพที่ 27 สัดส่วนอดีตนักเรียนนายร้อย จปร. ที่ตอบแบบสอบถาม

อดีตนักเรียนนายร้อย จปร. ที่ตอบแบบสอบถามนี้คิดเป็นสัดส่วน 81.8% ที่เหลือเป็นอดีตนักเรียนนายเรือหรือนายร้อยเหล่าอื่น ที่ล้วนเคยมีประสบการณ์เรียนรู้ชิ้นส่วนอาวุธปืนจริง

นอกจากเรียนด้วยการจับอาวุธจริงแล้ว ท่านเห็นว่าเว็บไซต์ CRMA Training ช่วยเสริมให้การจดจำชิ้นส่วนอาวุธปืนดีขึ้น
คำตอบ 22 ข้อ



ภาพที่ 28 สัดส่วนผู้ที่เห็นด้วยกับโครงการนี้ ช่วยเสริมให้จดจำชิ้นส่วนอาวุธปืนได้ดีขึ้น

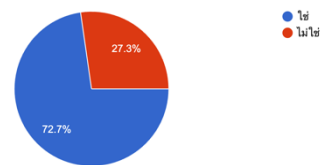
จากภาพที่ 28 คำถามที่สำรวจต้องการทราบความเห็นจากอดีตนักเรียนนายร้อย เมื่อเคยมีประสบการณ์เรียนรู้ ชิ้นส่วนต่าง ๆ จากการที่เคยจับใช้อาวุธปืนจริงแล้ว ได้ทดลองใช้งานส่วนการเรียนรู้การประกอบชิ้นส่วนอาวุธปืนจากเว็บไซต์ CRMA Training

ของโครงการนี้ ช่วยเสริมให้สามารถจดจำชิ้นส่วนอาวุธปืนต่าง ๆ ได้ดีขึ้นหรือไม่

ผลสำรวจพบว่า ผู้ที่เห็นด้วยมีจำนวน 90.9% และไม่เห็นด้วย 9.1%

สำหรับกลุ่มผู้ที่ไม่เห็นด้วยสรุปได้ว่า พวกเขาจะจดจำชิ้นส่วนอาวุธปืนได้จากการจับปืนจริงเท่านั้น สื่อการเรียนดิจิทัลดังในโครงการนี้ไม่ช่วยเสริมให้จดจำชิ้นส่วนอาวุธปืนได้ดีขึ้น

CRMA Training ช่วยให้ผู้เรียนรู้อาวุธปืนได้ทุกที่ทุกเวลา และช่วยให้จดจำดีกว่าเรียนรู้จากอาวุธจริง?
คำตอบ 22 ข้อ



ภาพที่ 29 สัดส่วนผู้ที่เห็นด้วยกับโครงการนี้ ช่วยเสริมให้จดจำชิ้นส่วนอาวุธปืนได้ดีกว่าอาวุธจริง

จากภาพที่ 29 เป็นคำถามที่สำคัญมาก เพราะต้องการทราบความเห็นจากอดีตนักเรียนนายร้อย เมื่อได้ทดลองใช้งานส่วนการเรียนรู้การประกอบชิ้นส่วนอาวุธปืนจากเว็บไซต์ CRMA Training ของโครงการนี้ เทียบกับประสบการณ์เรียนรู้จากอาวุธปืนจริงแล้ว

เห็นด้วยหรือไม่ว่า ส่วนการเรียนรู้การประกอบชิ้นส่วนอาวุธปืน CRMA Training ของโครงการนี้ นอกจากจะใช้เรียนรู้ได้ทุกที่ทุกเวลาแล้ว ยังช่วยเสริมให้สามารถจดจำชิ้นส่วนอาวุธปืนต่าง ๆ ได้ดีกว่าอาวุธปืนจริง

ผลสำรวจพบว่า ผู้ที่เห็นด้วยมีจำนวน 72.7% และไม่เห็นด้วย 27.3%

ซึ่งผลสำรวจที่น่าสนใจสำหรับกลุ่มผู้เห็นด้วย 72.7% สรุปได้ว่า พวกเขายอมรับว่าเทคโนโลยีการเรียน 3 มิติในโครงการนี้สามารถเรียนรู้ได้ทุกที่ทุกเวลาและช่วยเสริมให้จดจำชิ้นส่วนอาวุธปืนได้ดีขึ้นกว่าวิธีการศึกษาแบบเดิมในอดีตด้วยการเรียนรู้จากอาวุธปืนจริง

7. ข้อเสนอแนะ

การวิจัยพัฒนาโครงการนี้ ได้สร้างกรอบการทำงาน (Framework) ให้ทหารใช้เป็นแนวทางในสร้างอาคารที่ไม่มีแบบแปลนในจักรวาลอนมิติ เพื่อวางแผนและซ่อมปฏิบัติการพิเศษอาคารเป้าหมาย

ผลลัพธ์จากการวิจัยพัฒนาโครงการนี้ ได้สร้างอาคารกองบัญชาการ รร.จปร. และสร้างห้องรับรองสุโขทัยในจักรวาลอนมิติ เป็นแหล่งเรียนรู้ประวัติศาสตร์โรงเรียนนายร้อย จปร. และเป็นห้องรับรองในโลกเสมือนสามารถต้อนรับผู้เยี่ยมชมจากทั่วทุกมุมโลกที่เข้ามาในรูปแบบอวตาร สามารถจัดการสัมมนาวิชาการออนไลน์ในโลกเสมือน สามารถจัดบรรยายในโลกเสมือน และสร้างระบบสื่อการเรียนดิจิทัลสมัยใหม่ ในโครงการวิจัยพัฒนานี้สร้างการเรียนรู้ขึ้นส่วนป็นสงครามในแบบ 3D ที่ได้รับการยอมรับจากอดีตนักเรียนนายร้อย จปร. จำนวนหนึ่ง เห็นด้วยว่าช่วยให้การศึกษามหาวิทยาลัยมีประสิทธิภาพมากขึ้น

เทคโนโลยีความจริงเสมือนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้ขึ้นส่วนประกอบอาวุธปืนสงครามได้ทุกที่ทุกเวลา โดยไม่มีอันตราย และเทคโนโลยีความจริงเสมือนควรเป็นวิชาที่นักเรียนนายร้อยยุคใหม่ต้องศึกษา ทั้งช่วยในการออกแบบงานวิศวกรรมป้องกันประเทศ การวางแผนจู่โจมหรือซ่อมรบ ตลอดจนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเรียนการสอนได้อย่างดี

บทความวิจัยและพัฒนานี้ นับเป็นจุดเริ่มต้นการศึกษาจักรวาลอนมิติสำหรับวิชาการทหาร โดยใช้อาคารกองบัญชาการ รร.จปร. ในจักรวาลอนมิติของโครงการนี้ เป็นศูนย์กลางการเรียนรู้ด้านวิชาการวิศวกรรมป้องกันประเทศต่อไปในอนาคต

8. บรรณานุกรม

- [1] Chenggong, Biao, Hongsi, Xingguang Liyong, Weipei. (2023). Research on the Application of Metaverse Technology in the US Army. 14th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies. 2023.
- [2] Lav Soni, Amanpreet Kaur. (2023). AR and VR in Military Combat: Enhancing Soldier Performance and Safety. Proceedings of the International Conference on Sustainable Computing and Smart

Systems (ICSCSS 2023) IEEE Xplore Part Number: CFP23DJ3-ART; ISBN: 979-8-3503-3360-2. 2022.

- [3] Jose, Ekaterina, Stian. (2022). Using Extended Reality to Teach Protection of Civilians in Higher Military Education. 2022 International Conference on Cyberworlds (CW). 2022.

การเสีรรูปของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่น
และอีกสองด้านปล่อยอิสระ

Deformation of composite plate with two opposite edges clamped
and other two edges free

กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข^{1*}, ปิยะพันธ์ ธรรมปัญญา², พงษ์นุกร ไทยะ³

Kullasup Phongsrisk^{1*}, Piyapan Thammapanya², Pongnukorn Thaiya³

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 50300 ประเทศไทย

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Lanna 50300, Thailand

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

(Received: April 28, 2025, Revised: June 10, 2025, Accepted: July 7, 2025)

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเสีรรูปของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ รับภาระแบบกระจายสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับแผ่น โดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ในการคำนวณระยะการแอ่นและความเค้นดัดของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนทางเรขาคณิต 1:1 ถึง 5:1 รวมถึงมีรูปแบบการเรียงตัวของเส้นใยแบบ $[0]_4$, $[0/90]_s$, $[90/0]_s$ และ $[90]_4$ จากผลการศึกษาพบว่าการกระจายของระยะการแอ่นและความเค้นดัดมีแนวโน้มที่คล้ายกันในทุกอัตราส่วนทางเรขาคณิต โดยระยะการแอ่นสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณกลางแผ่น ส่วนความเค้นดัดสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณขอบที่มีการรองรับแบบยึดแน่น นอกจากนี้ยังพบว่าระยะการแอ่นและความเค้นดัดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนทางเรขาคณิตเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเมนต์ดัดที่สูงขึ้นในแผ่นที่ยาวขึ้น ทั้งนี้แผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบ $[90]_4$ มีระยะการแอ่นและความเค้นดัดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับารเรียงตัวของเส้นใยแบบอื่น เนื่องจากค่าความแข็งแรงดึงดัดในแนวแกนและโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดที่ต่ำกว่า ผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบโครงสร้างคอมโพสิตที่ต้องการควบคุมการแอ่นตัวและความเค้นดัดให้เหมาะสมกับการใช้งานทางวิศวกรรม

คำสำคัญ: การเสีรรูป แผ่นวัสดุคอมโพสิต ระยะการแอ่น ความเค้นดัด ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract: This research aimed to study the deformation of a composite plate with two opposite edges clamped and the other two edges free, subjected to a uniformly distributed load acting perpendicular to the plate. Finite element software was utilized to calculate the deflection and bending stress of the composite plate with geometric ratios from 1:1 to 5:1 and with $[0]_4$, $[0/90]_s$, $[90/0]_s$, and $[90]_4$ fiber arrangements. The study results indicated that the distributions of deflection and bending stress were similar across all geometric ratios, with the maximum deflection occurring

at the center of the plate and the maximum bending stress occurring near the clamped edges. Additionally, the deflection and bending stress increased as the geometric ratios increased, due to the higher bending moment in the longer plates. The composite plates with $[90]_4$ fiber arrangement exhibited the highest deflection and bending stress compared to the other fiber arrangements, due to their lower axial bending stiffness and cross-sectional moment of inertia. The results of this study could serve as a guideline for designing composite structures that require controlled deflection and bending stress for appropriate engineering applications.

Keywords: Deformation, Composite plate, Deflection, Bending stress, Finite element

1. บทนำ

ในปัจจุบัน แผ่นวัสดุคอมโพสิต (Composite plates) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่น เช่น ความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา ทนต่อการกัดกร่อน และสามารถปรับแต่งคุณสมบัติเชิงกลได้ตามความต้องการ จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อากาศยาน ยานยนต์ เครื่องจักรกล และอุปกรณ์กีฬา โดยเฉพาะในส่วนที่ต้องการโครงสร้างที่มีความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบา [1] เมื่อแผ่นวัสดุคอมโพสิตรับภาระกระทำตั้งฉากกับแผ่น แผ่นวัสดุคอมโพสิตจะเกิดการเสียรูป (Deformation) ซึ่งประกอบด้วยการแอ่น (Deflection) และความเค้นดัด (Bending stress) ที่มีลักษณะซับซ้อน เนื่องจากโครงสร้างของแผ่นวัสดุคอมโพสิตจะมีการเรียงตัวของเส้นใยที่แตกต่างกัน รวมไปถึงความแตกต่างของคุณสมบัติเชิงกล การศึกษาการเสียรูปของแผ่นวัสดุคอมโพสิตจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้สามารถออกแบบโครงสร้างที่รองรับภาระได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด

จึงได้มีการสร้างเอลิเมนต์แบบเปลือก (Shell element) ที่อิงตามทฤษฎีการเปลี่ยนรูปเฉือนลำดับที่หนึ่ง (First order shear deformation theory: FSDT) และทฤษฎีการเปลี่ยนรูปเฉือนลำดับสูง (Higher order shear deformation theory: HSDT) เพื่อทำการศึกษาค้นคว้าการเสียรูปของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสี่ด้านรองรับแบบอย่างง่าย (SSSS) รับภาระแบบกระจายสม่ำเสมอ [2] และภาระแบบไซน์ [3] กระทำตั้งฉากกับแผ่น โดยทำการแปรผันอัตราส่วนความหนาต่อความกว้าง และได้มีการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ในการวิเคราะห์

การกระจายของระยะการแอ่นและความเค้นดัดในแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสี่ด้านรองรับแบบยึดแน่น (CCCC) [4] และที่มีขอบสามด้านรองรับแบบยึดแน่น และอีกหนึ่งด้านปล่อยอิสระ (CCCF) [5] รับภาระแบบกระจายสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับแผ่น โดยทำการแปรผันอัตราส่วนทางเรขาคณิต

แผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ (CFCF) เป็นรูปแบบที่พบได้บ่อยในงานวิศวกรรม เช่น แผ่นปิด ฝาครอบ แผ่นรองรับในโครงสร้าง ชิ้นส่วนของปีกหรือแพนหาง และแผงตัวถังรถยนต์ แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของแผ่นวัสดุคอมโพสิตภายใต้เงื่อนไขขอบหลากหลายแบบ เช่น SSSS, CCCC หรือ CCCF แต่ยังไม่พบว่ามีช่องว่างในการศึกษาเกี่ยวกับแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบแบบ CFCF โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาเกี่ยวกับการแปรผันอัตราส่วนทางเรขาคณิต และการเรียงตัวของเส้นใยแบบสมมาตร (ตารางที่ 1) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมการเสียรูปของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบแบบ CFCF โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method: FEM) เพื่อศึกษาผลกระทบของรูปแบบการเรียงตัวของเส้นใย และอัตราส่วนทางเรขาคณิต ซึ่งผลการศึกษานี้จะช่วยเติมเต็มช่องว่างในองค์ความรู้ และสามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการออกแบบโครงสร้างแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีลักษณะขอบดังกล่าวในงานวิศวกรรมจริง

ตารางที่ 1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ผู้เขียน	วิธีการ	ภาระ	ขอบ	เส้นใย	อัตราส่วน
งานวิจัย [2]	FEM (FSDT)	กระจายสม่ำเสมอ	SSSS	0, 90	h/a
งานวิจัย [3]	FEM (HSDT)	โซ่	SSSS	0, 90	h/a
งานวิจัย [4]	FEM (FSDT)	กระจายสม่ำเสมอ	CCCC	0, 90	a/b
งานวิจัย [5]	FEM (FSDT)	กระจายสม่ำเสมอ	CCCF	0, 90	a/b
การศึกษานี้	FEM (FSDT)	กระจายสม่ำเสมอ	CFCF	0, 90	a/b

2. วัตถุประสงค์

2.1 วิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ ภายใต้ภาระแบบกระจายสม่ำเสมอที่กระทำตั้งฉากกับแผ่น

2.2 ศึกษาผลของอัตราส่วนทางเรขาคณิต (Aspect ratio) ที่มีค่าตั้งแต่ 1:1 ถึง 5:1 ต่อระยะการแอ่นและความเค้นดัดของแผ่นวัสดุคอมโพสิต

2.3 เปรียบเทียบพฤติกรรมของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีรูปแบบการเรียงตัวของเส้นใยแบบสมมาตร ได้แก่ $[0]_4$, $[90]_4$, $[0/90]_s$ และ $[90/0]_s$

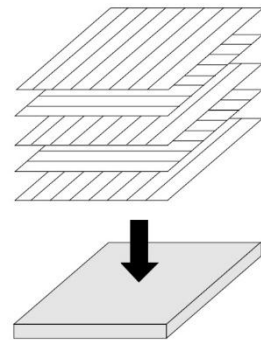
3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 แผ่นวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิต (Composite material) ประกอบด้วยวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันอย่างน้อยสองชนิด ซึ่งรวมตัวกันโดยไม่เกิดการเป็นเนื้อเดียวกัน [6] ทำให้วัสดุที่ได้มีสมบัติที่ดีเป็นพิเศษหรือมีลักษณะที่สำคัญบางอย่างแตกต่างไปจากเดิม [7] โดยทั่วไป วัสดุคอมโพสิตจะประกอบไปด้วยตัวประสาน (Matrix) และตัวเสริมแรง (Reinforcement) ซึ่งตัวประสานทำหน้าที่กระจายแรงไปยังตัวเสริมแรงและรักษารูปทรงของวัสดุคอมโพสิต ขณะที่ตัวเสริมแรงช่วยเสริมสมบัติให้ตัวประสานเพื่อให้วัสดุคอมโพสิตมีสมบัติตามที่ต้องการ [1] สมบัติ

ของวัสดุคอมโพสิตสามารถออกแบบได้โดยการเลือกวัสดุองค์ประกอบ สัดส่วนของวัสดุองค์ประกอบ ความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุองค์ประกอบ การเรียงตัวของตัวเสริมแรง และการกระจายตัวของตัวเสริมแรงในตัวประสาน[8] ทำให้วัสดุคอมโพสิตสามารถปรับแต่งสมบัติได้ตามความต้องการในการใช้งาน

วัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยเป็นตัวเสริมแรงและถูกสร้างเป็นแผ่นบางเรียกว่า ลามิना (Lamina) และเมื่อลามินาหลายชั้นถูกซ้อนทับกันจะเรียกว่า ลามิเนต (Laminate) ซึ่งสามารถนำมาประกอบเป็นแผ่น วัสดุคอมโพสิต (ภาพที่ 1) ซึ่งเป็นชั้นส่วนพื้นฐานที่สำคัญในงานวิศวกรรม [9] เมื่อแผ่นวัสดุคอมโพสิตเกิดการแอ่นตัว ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) สำหรับระนาบชั้นที่ k สามารถแสดงได้ด้วยสมการ [6]



ภาพที่ 1 แผ่นวัสดุคอมโพสิต

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}_k = [\bar{Q}]_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}_k \quad (1)$$

โดย σ_x คือ ความเค้นตั้งฉากในทิศทาง x (N/m^2)

σ_y คือ ความเค้นตั้งฉากในทิศทาง y (N/m^2)

σ_{xy} คือ ความเค้นเฉือนในระนาบ $x-y$ (N/m^2)

ε_x คือ ความเครียดตั้งฉากในทิศทาง x

ε_y คือ ความเครียดตั้งฉากในทิศทาง y

γ_{xy} คือ ความเครียดเฉือนในระนาบ $x-y$

$[\bar{Q}]$ คือ เมทริกซ์สติฟเนสแบบลดรูปและแปรงรูป (Transformed and reduced stiffness) ซึ่งจะสัมพันธ์กับคุณสมบัติของวัสดุ และลักษณะการวางตัวของเส้นใยเทียบกับแกนอ้างอิง (θ) ดังสมการ (2)

$$\begin{aligned}\bar{Q}_{11} &= Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}n^4 \\ \bar{Q}_{12} &= Q_{12}(m^4 + n^4) + (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})m^2n^2 \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})m^3n + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})n^3m \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}m^4 \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})n^3m + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})m^3n \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{66}(m^4 + n^4) \quad (2)\end{aligned}$$

โดย m คือ $\cos\theta$ และ n คือ $\sin\theta$ ในกรณีที่ลามินาเป็นวัสดุออร์โททรอปิก (Orthotropic material) จะมีค่า $Q_{11} = E_1^2/(E_1 - \nu_{12}^2E_2)$, $Q_{22} = E_1E_2/(E_1 - \nu_{12}^2E_2)$, $Q_{12} = \nu_{12}E_1E_2/(E_1 - \nu_{12}^2E_2)$ และ $Q_{66} = G_{12}$ โดย E_1 เป็นมอดุลัสยืดหยุ่นตามแนวเส้นใย E_2 เป็นมอดุลัสยืดหยุ่นตามแนวขวางเส้นใย G_{12} เป็นมอดุลัสเฉือนในระนาบตามแนวเส้นใยและตามแนวขวางเส้นใย และ ν_{12} เป็นอัตราส่วนปัวซองในระนาบตามแนวเส้นใยและตามแนวขวางเส้นใย ซึ่งผลรวมของความเค้นที่เกิดขึ้นตลอดแนวความหนาของแผ่นวัสดุคอมโพสิต สามารถคำนวณเป็นแรงลัพธ์ (Force resultants) N_{xx} , N_{yy} และ N_{xy} และโมเมนต์ลัพธ์ (Moment resultants) M_{xx} , M_{yy} และ M_{xy} ได้ดังสมการ (3)

$$\begin{Bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \\ M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \\ \kappa_{xx} \\ \kappa_{yy} \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

โดยแรงลัพธ์และโมเมนต์ลัพธ์ที่เกิดขึ้นในแผ่นวัสดุคอมโพสิตจะสัมพันธ์กับความเครียด ϵ_{xx} , ϵ_{yy} และ γ_{xy} และความโค้ง (Curvature) κ_{xx} , κ_{yy} และ κ_{xy} ของระนาบกึ่งกลางของแผ่นวัสดุคอมโพสิต เมทริกซ์ขนาด 6x6 ในสมการ (3) เรียกว่า เมทริกซ์ ABD ซึ่งประกอบไปด้วยเมทริกซ์ย่อย 3 เมทริกซ์ ได้แก่ เมทริกซ์ A คือ เมทริกซ์ความแข็งแรงยืด (Extensional

stiffness), เมทริกซ์ B คือ เมทริกซ์ความแข็งแรงเชื่อมต่อน (Coupling stiffness) และเมทริกซ์ D คือ เมทริกซ์ความแข็งแรงดัด (Bending stiffness) โดยเมทริกซ์ ABD จะเป็นผลรวมของผลคูณของค่าสติฟเนสแบบลดรูปและแปรงรูปกับความหนาของชั้นลามินา ($z_k - z_{k-1}$) ชั้นที่ k ดังสมการ (4) - (6)

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \quad (4)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (5)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (6)$$

3.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์และความเค้นดัดของแผ่นวัสดุคอมโพสิตสามารถทำได้โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ที่มีความแม่นยำสูงในการคำนวณปัญหาทางวิศวกรรมโครงสร้าง โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์แผ่นวัสดุคอมโพสิตมีขั้นตอนหลักดังนี้

1) การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์และความเค้นดัดของแผ่นวัสดุคอมโพสิต จะใช้เอลิเมนต์แบบเปลือกในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของแผ่นวัสดุคอมโพสิตเนื่องจากแผ่นวัสดุคอมโพสิตมีความหนาน้อยเมื่อเทียบกับความยาวและความกว้าง และเอลิเมนต์แบบเปลือกสามารถรองรับการแอ่นตัว (Bending) และการบิดตัว (Twisting) ได้ โดยแต่ละจุดต่อ (Node) ของเอลิเมนต์แบบเปลือกจะมี 6 องศาอิสระ (Degrees of freedom: DOF) ได้แก่ การเคลื่อนที่ในแนวแกน x , y และ z และการหมุนรอบแกน x , y และ z

2) การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถสร้างได้จากวิธีการโดยตรง (Direct approach) วิธีการแปรผัน (Variational approach) และวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals) ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์และความเค้นดัดของแผ่นวัสดุคอมโพสิต จะสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง ซึ่งเป็นการสร้างสมการ

ไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equation) โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องหาฟังก์ชันที่มีความสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างสามารถนำไปใช้ในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาโดยทั่ว ๆ ไป และถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ในปัจจุบัน [10] ซึ่งสมการเชิงอนุพันธ์ของแผ่นวัสดุคอมโพสิตสามารถเขียนได้ดังนี้ [11]

$$\frac{\partial N_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_{yy}}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 M_{xx}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 M_{yy}}{\partial y^2} + q = 0 \quad (9)$$

สมการเชิงอนุพันธ์เหล่านี้จะถูกแปลงเป็นสมการเชิงเส้น (Linear equations) โดยใช้ฟังก์ชันรูปร่าง (Shape functions) ดังสมการ (10) - (12) ในการประมาณค่าการกระจัด (Displacement) ในแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์แผ่นวัสดุคอมโพสิต

$$u = \sum_{i=1}^n N_i u_i \quad (10)$$

$$v = \sum_{i=1}^n N_i v_i \quad (11)$$

$$w = \sum_{i=1}^n N_i w_i \quad (12)$$

โดย u_i, v_i, w_i คือ การกระจัดในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ ส่วน N_i คือ ฟังก์ชันรูปร่าง

3) การประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์ จะทำให้ได้สมการรวม (Global equation)

4) การแทนเงื่อนไขขอบ (Boundary conditions) ของแผ่นวัสดุเชิงประกอบในสมการรวม เช่น การยึดแน่นที่สองด้านและปล่อยอิสระที่อีกสองด้าน (Clamped-Free: C-F)

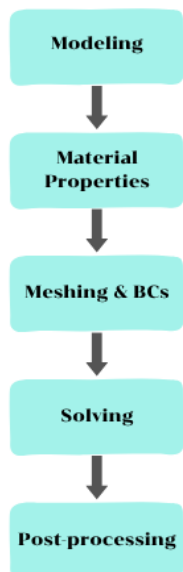
5) การแก้สมการรวมเพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อจะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เช่น ระเบียบวิธีกำจัดแบบเกาส์ (Gaussian elimination method) หรือระเบียบวิธีแยกแบบแอลยู (LU decomposition

method) เพื่อหาการกระจัดที่จุดต่อของเอลิเมนต์แผ่นวัสดุคอมโพสิต

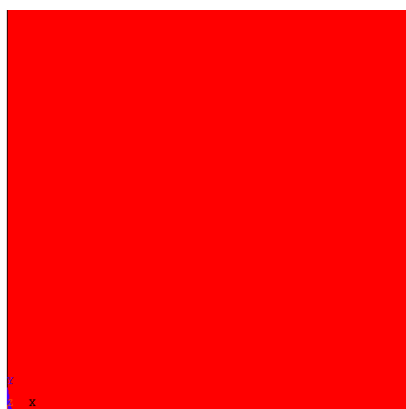
4. วิธีดำเนินการศึกษา

ในการศึกษาการเสียรูปของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ จะทำการศึกษาระยะการแอ่น การกระจายของระยะการแอ่น (Deflection distribution) ความเค้นดัดและการกระจายของความเค้นดัด (Bending stress distribution) ของแผ่นวัสดุคอมโพสิตเมื่อแผ่นวัสดุคอมโพสิตรับภาระแบบกระจายสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับแผ่นโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งในภาพที่ 2 ได้แสดงลำดับขั้นตอนการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลัก ตั้งแต่การสร้างแบบจำลอง (Modeling) การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ (Material properties) การกำหนดขนาดเอลิเมนต์ (Meshing) และเงื่อนไขขอบ (Boundary conditions: BCs) ไปจนถึงการคำนวณ (Solving) และวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Post-processing)

ในขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง จะทำการสร้างแบบจำลองแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนทางเรขาคณิต (ความกว้างด้าน x ต่อความกว้างด้าน y) ตั้งแต่ 1:1 ถึง 5:1 ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์โปรแกรม ANSYS [12] ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยแผ่นวัสดุคอมโพสิตจะมีการเรียงตัวของเส้นใยแบบ $[0]_4, [90]_4, [0/90]_5$ และ $[90/0]_5$ ซึ่งแต่ละชั้นจะมีความหนา 0.0025m และค่าคุณสมบัติเชิงกลของแบบจำลองแผ่นวัสดุคอมโพสิตจะถูกกำหนดให้ $E_1 = 150$ GPa, $E_2 = E_3 = 7$ GPa, $G_{12} = G_{13} = 3.5$ GPa, $G_{23} = 1.4$ GPa และ $\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = 0.3$



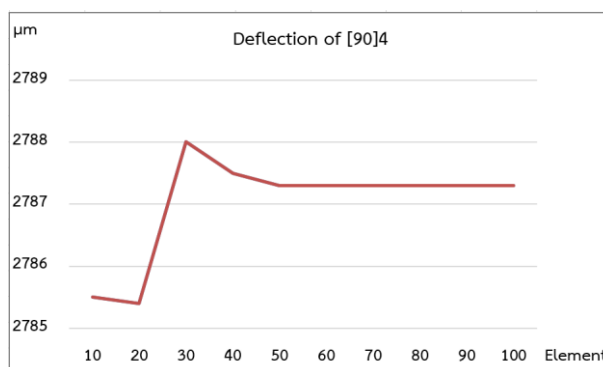
ภาพที่ 2 ขั้นตอนการจำลองด้วยระเบียบวิธี
ไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 3 แบบจำลองแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีอัตราส่วน
ทางเรขาคณิต 1:1

แบบจำลองแผ่นวัสดุคอมโพสิตจะถูกแบ่งออกเป็น
เอลิเมนต์ โดยเลือกใช้เอลิเมนต์แบบเปลือก (Shell
281) ที่มีจำนวน 8 จุดต่อ (Node) เนื่องจากแผ่นวัสดุ
คอมโพสิตเป็นกรณีความเค้นระนาบ (Plane stress) ที่
มีลำดับชั้นความเป็นอิสระเท่ากับ 6 กล่าวคือ ทุกจุดของ
แผ่นวัสดุคอมโพสิตสามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน x , y
และ z รวมไปถึงสามารถหมุนรอบแกน x , y และ z
ได้ ซึ่งจำนวนเอลิเมนต์จะมีผลต่อการคำนวณ โดย
จำนวนเอลิเมนต์ที่มากจะทำให้ผลการคำนวณมีความ
ถูกต้องแม่นยำกว่าเอลิเมนต์ที่มีจำนวนน้อยกว่า แต่จะ
ใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า จึงต้องทำการหาจำนวน
เอลิเมนต์ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่มีความ

ถูกต้องแม่นยำและใช้เวลาในการคำนวณที่รวดเร็ว จึง
แบ่งแบบจำลองแผ่นวัสดุคอมโพสิตออกเป็นเอลิเมนต์
สี่เหลี่ยม (Quadrilateral) ด้านละ 10, 20, 30, ..., 100
เอลิเมนต์ เพื่อพิจารณาการลู่เข้าของผลการคำนวณ
ระยะการแอ่นและความเค้นดัด ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่ง
พบว่าผลการคำนวณระยะการแอ่นและความเค้นดัดมี
การลู่เข้าเมื่อจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 50 และ 80
เอลิเมนต์ ตามลำดับ เพื่อให้สามารถใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์
ซอฟต์แวร์ในการคำนวณระยะการแอ่นและความเค้น
ดัดได้ จึงทำการเลือกใช้เอลิเมนต์จำนวน 100 เอลิเมนต์



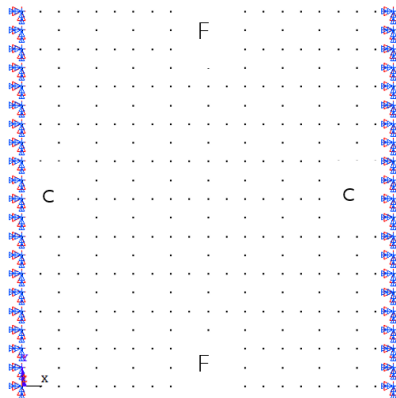
(ก) การลู่เข้าของระยะการแอ่น



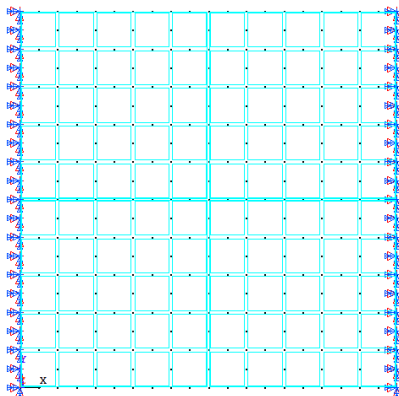
(ข) การลู่เข้าของความเค้นดัด

ภาพที่ 4 การลู่เข้าของผลการคำนวณที่ได้จาก FEM

ส่วนเงื่อนไขขอบของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสอง
ด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่น (Clamped: C) และ
อีกสองด้านปล่อยอิสระ (Free: F) ได้แสดงดังภาพที่ 5
ซึ่งภาระแบบกระจายสม่ำเสมอ 1 N/m^2 กระทำตั้งฉาก
กับแผ่นวัสดุคอมโพสิตได้แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 เงื่อนไขขอบของแบบจำลองที่มีการรองรับแบบ CFCF



ภาพที่ 6 การกำหนดภาระกระทำต้งจากกับแผ่นวัสดุคอมโพสิต

ผลการคำนวณการกระจายของระยะการแอ่นและการกระจายของความเค้นดัดของแบบจำลองแผ่นวัสดุคอมโพสิตโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ จะแสดงผลเป็นแผนที่ที่เรียกว่าแผนภาพเส้นชั้นความสูง (Contour plot) ซึ่งโดยทั่วไป สีที่ต่างกันในแผนภาพเส้นชั้นความสูงจะสื่อความหมาย โดยสีแดงแสดงค่าที่สูงสุดของระยะการแอ่นและความเค้นดัด ส่วนสีน้ำเงินแสดงค่าที่ต่ำสุดของระยะการแอ่นและความเค้นดัด (รวมถึงค่าลบในกรณีความเค้นกด) ส่วนผลการคำนวณระยะการแอ่นและความเค้นดัดของแบบจำลองแผ่นวัสดุคอมโพสิตโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ จะบันทึกเป็นค่าในรูปแบบ .txt หรือไฟล์ข้อความซึ่งเรียกว่า ASCII Output File โดยจะเลือกค่าที่ตำแหน่งจุดต่อ (Node)

5. ผลการศึกษา

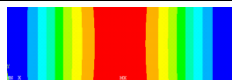
5.1 จากผลการคำนวณการกระจายของระยะการแอ่น พบว่าแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนทางเรขาคณิต 1:1 ถึง 5:1 ที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบ $[0]_4$, $[0/90]_s$, $[90/0]_s$ และ $[90]_4$ มีลักษณะการกระจายของระยะการแอ่นที่เหมือนกัน ดังแสดงในตารางที่ 2-5 โดยระยะการแอ่นสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณกลางแผ่น (สีแดง) และลดลงตามลำดับ เป็นสีเหลือง เขียว ฟ้ำ และน้ำเงิน ที่มีหน่วยของระยะการแอ่นเป็นไมโครเมตร (μm) ซึ่งเมื่อมองจากภาพตัดแกน y จะพบว่าตำแหน่งตรงกลางแผ่นวัสดุคอมโพสิตจะมีระยะการแอ่นมากกว่าตำแหน่งตรงขอบที่มีการรองรับแบบยึดแน่น และเมื่อมองจากภาพตัดแกน x ระยะการแอ่นตำแหน่งตรงกลางขอบที่มีการรองรับแบบปล่อยอิสระจะมีค่ามากกว่าตำแหน่งตรงกลางแผ่นวัสดุคอมโพสิต จึงทำให้รูปร่างการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตมีลักษณะคล้ายอานม้า

5.2 จากผลการคำนวณระยะการแอ่นตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นวัสดุคอมโพสิต พบว่าระยะการแอ่นจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออัตราส่วนทางเรขาคณิตมีค่ามากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 6 เนื่องจากแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนทางเรขาคณิต 5:1 จะยาวกว่าแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนทางเรขาคณิต 1:1 จึงทำให้เกิดโมเมนต์ดัดมากกว่า เป็นผลให้ระยะการแอ่นมีค่ามากกว่า และพบว่าระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบ $[90]_4$ จะมีค่ามากกว่า $[90/0]_s$, $[0/90]_s$ และ $[0]_4$ เนื่องจากการเรียงตัวของเส้นใยที่ต่างกันจะทำให้ค่า D_{11} ในสมการ (6) ซึ่งเป็นค่าความแข็งเกร็งดัดในแนวแกน x มีค่าต่างกัน ซึ่งค่า D_{11} ของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีการเรียงตัวของเส้นใย $[90]_4$ จะมีค่าน้อยกว่า $[90/0]_s$, $[0/90]_s$ และ $[0]_4$ ตามลำดับ เป็นผลให้ระยะการแอ่นสูงสุดของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีการเรียงตัวของเส้นใย $[90]_4$ มีค่ามากที่สุด

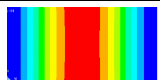
ตารางที่ 2 การกระจายของระยะการแอ่นของ $[0]_4$

อัตราส่วน	การกระจายของระยะการแอ่น
1:1	
2:1	
3:1	
4:1	
5:1	

ตารางที่ 3 การกระจายของระยะการแอ่นของ $[0/90]_s$

อัตราส่วน	การกระจายของระยะการแอ่น
1:1	
2:1	
3:1	
4:1	
5:1	

ตารางที่ 4 การกระจายของระยะการแอ่นของ $[90/0]_s$

อัตราส่วน	การกระจายของระยะการแอ่น
1:1	
2:1	
3:1	
4:1	
5:1	

ตารางที่ 5 การกระจายของระยะการแอ่นของ $[90]_4$

อัตราส่วน	การกระจายของระยะการแอ่น
1:1	
2:1	
3:1	
4:1	
5:1	

ตารางที่ 6 ระยะการแอ่น (μm) ตำแหน่งกึ่งกลางแผ่นวัสดุคอมโพสิต

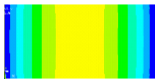
อัตราส่วน	$[0]_4$	$[0/90]_s$	$[90/0]_s$	$[90]_4$
1:1	0.211	0.243	1.250	4.434
2:1	3.303	3.778	20.011	71.204
3:1	16.687	19.078	101.370	360.920
4:1	52.840	60.290	320.470	1141.300
5:1	129.240	147.220	782.540	2787.300

5.3 ผลการคำนวณการกระจายของความเค้นตัดพบว่าแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนทางเรขาคณิต 1:1 ถึง 5:1 ที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบ $[0]_4$, $[0/90]_s$, $[90/0]_s$ และ $[90]_4$ มีลักษณะการกระจายของความเค้นตัดที่เหมือนกัน ดังแสดงในตารางที่ 7-10 โดยความเค้นตัดสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณขอบที่มีการรองรับแบบยึดแน่น ซึ่งผลการคำนวณโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์จะแสดงเป็นสีแดง และความเค้นตัดจะลดลงเป็นลำดับ ได้แก่ สีเหลือง เขียว ฟ้ำ และน้ำเงิน ที่มีหน่วยของความเค้นตัดเป็นกิโลพาสคาล (kPa) แต่เนื่องจากแผ่นวัสดุคอมโพสิตรับภาระแบบกระจายสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับแผ่น จึงทำให้รูปร่างการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตเมื่อมองจากภาพตัด y มีลักษณะคล้ายกระทะทำให้ขอบบนของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีการรองรับแบบยึดแน่นเกิดความเค้นดัดแบบกดซึ่งเป็นค่าความเค้นดัดลบ ผลการคำนวณโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์จึงแสดงเป็นสีน้ำเงินซึ่งเป็นค่าน้อยเนื่องจาก

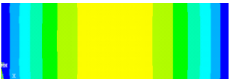
เป็นค่าติดลบ

5.4 จากผลการคำนวณความเค้นดัดตำแหน่งกึ่งกลางขอบที่มีการรองรับแบบยึดแน่น พบว่าความเค้นดัดจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออัตราส่วนทางเรขาคณิตมีค่ามากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 11 เนื่องจากโมเมนต์ดัดมีค่าสูงขึ้นในแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่ยาวกว่า เป็นผลให้ความเค้นดัดมีค่ามากกว่า และพบว่าความเค้นดัดของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบ $[90]_4$ จะมีค่ามากกว่า $[90/0]_s$, $[0/90]_s$ และ $[0]_4$ เนื่องจากการเรียงตัวของเส้นใยที่ต่างกันจะทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดมีค่าต่างกัน ซึ่งการที่มอดุลัสความยืดหยุ่นของการเรียงตัวของเส้นใย $[0]$ มีค่ามากกว่าการเรียงตัวของเส้นใย $[90]$ เป็น 21:1 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีการเรียงตัวของเส้นใย $[90]_4$ จะมีค่าน้อยกว่า $[90/0]_s$, $[0/90]_s$ และ $[0]_4$ ตามลำดับ เป็นผลให้ความเค้นดัดของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีการเรียงตัวของเส้นใย $[90]_4$ มีค่ามากที่สุด

ตารางที่ 7 การกระจายของความเค้นดัดของ $[0]_4$

อัตราส่วน	การกระจายของความเค้นดัด
1:1	
2:1	
3:1	
4:1	
5:1	

ตารางที่ 8 การกระจายของความเค้นดัดของ $[0/90]_s$

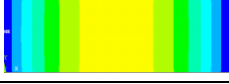
อัตราส่วน	การกระจายของความเค้นดัด
1:1	
2:1	
3:1	
4:1	
5:1	

6. สรุปผลและอภิปรายผล

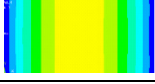
จากผลการศึกษาพบว่าแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนทางเรขาคณิต 1:1 ถึง 5:1 มีรูปแบบการกระจายของระยะการแอ่นและความเค้นดัดที่คล้ายกัน โดยระยะการแอ่นสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณกลางแผ่นและลดลงไปยังขอบที่ถูกรองรับแบบยึดแน่น ส่วนความเค้นดัดสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณขอบที่ถูกรองรับแบบยึดแน่น และลดลงไปยังกลางแผ่น ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับทฤษฎีแผ่นบางแบบคลาสสิก (Classical plate theory: CPT) ที่อธิบายไว้ว่า เมื่อแผ่นบางรับภาระแบบกระจายสม่ำเสมอ กระทำตั้งฉากกับแผ่นโมเมนต์ดัด (Bending moment) จะมีค่าสูงสุดที่บริเวณขอบที่มีข้อจำกัดการเคลื่อนที่สูง เช่น ขอบที่มีการรองรับแบบยึดแน่น ทำให้เกิดความเค้นดัด (Bending stress) สูงสุดบริเวณดังกล่าว [13] ในขณะที่ยาระยะการแอ่นจะเกิดสูงสุดบริเวณที่แผ่นบางมีอิสระในการเคลื่อนที่มาก เช่น ขอบที่มีการรองรับแบบปล่อยอิสระ [14] นอกจากนี้ยังพบว่า แผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนทางเรขาคณิตที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ระยะการแอ่นและความเค้นดัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเมนต์ดัดมีค่ามากขึ้นเมื่อความยาวของแผ่นวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้น สำหรับผลของการเรียงตัวของเส้นใย พบว่าการเรียงตัวของเส้นใยส่งผลต่อระยะการแอ่นและความเค้นดัดด้วย โดยแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบ $[90]_4$ จะมีระยะการแอ่นและความเค้นดัดสูงสุดเมื่อ

เปรียบเทียบกับแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีการเรียงตัวของเส้นใยแบบ $[90/0]_s$, $[0/90]_s$ และ $[0]_4$ เนื่องจากค่าความแข็งแรงดึงดัดในแนวแกนน้อยกว่า $[0]_4$ ตามสมการโมเมนต์ดัดของแผ่น (ค่า D_{11} ในเมทริกซ์ D มีค่าน้อย) และโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดต่ำกว่าการเรียงตัวของเส้นใยแบบอื่น จึงส่งผลให้ระยะการแอ่นและความเค้นดัดมากกว่าการเรียงตัวของเส้นใยแบบอื่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nadaf และ Fernandes [3] ที่ระบุว่าความแข็งแรงดึงดัดในแนวเส้นใยมีอิทธิพลอย่างมากต่อพฤติกรรมการเสียรูปของแผ่นวัสดุคอมโพสิต ดังนั้นผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นสำหรับการออกแบบแผ่นวัสดุคอมโพสิต โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องคำนึงถึงการแอ่นตัวและความเค้นดัด การเลือกอัตราส่วนทางเรขาคณิตและรูปแบบการเรียงตัวของเส้นใยที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางกลของแผ่นวัสดุคอมโพสิตในงานวิศวกรรมที่ต้องการความแข็งแรงและความทนทานสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างที่มีข้อจำกัดด้านน้ำหนัก เช่น อุตสาหกรรมการบินและยานยนต์

ตารางที่ 9 การกระจายของความเค้นดัดของ $[90/0]_s$

อัตราส่วน	การกระจายของความเค้นดัด
1:1	
2:1	
3:1	
4:1	
5:1	

ตารางที่ 10 การกระจายของความเค้นดัดของ $[90]_4$

อัตราส่วน	การกระจายของความเค้นดัด
1:1	
2:1	
3:1	
4:1	
5:1	

ตารางที่ 11 ความเค้นดัดสูงสุด (kPa) ของแผ่นวัสดุคอมโพสิต

อัตราส่วน	$[0]_4$	$[0/90]_s$	$[90/0]_s$	$[90]_4$
1:1	1.402	4.995	5.014	5.657
2:1	5.670	19.811	20.395	22.593
3:1	12.822	44.672	46.208	51.126
4:1	22.857	79.915	82.454	91.312
5:1	35.775	125.600	129.130	143.130

7. ข้อจำกัดงานวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้สมมติฐานที่ว่า แผ่นวัสดุคอมโพสิตมีพฤติกรรมเชิงเส้น (Linear behavior) และรับภาระแบบกระจายสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับแผ่น โดยมิได้พิจารณาผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น รอยตำหนิในวัสดุ อิทธิพลจากอุณหภูมิและความชื้น ตลอดจนผลของการเสื่อมสภาพของวัสดุเมื่อใช้งานจริง รวมถึงเงื่อนไขการรองรับที่ถูกกำหนดให้เป็นแบบยึดแน่นสมบูรณ์ (Perfect clamping) ซึ่งอาจแตกต่างจากสภาวะจริง นอกจากนี้ งานวิจัยนี้เน้นศึกษาพฤติกรรมของแผ่นวัสดุคอมโพสิตเพียงชนิดเดียว โดยมิได้เปรียบเทียบกับวัสดุอื่น เช่น โลหะหรือวัสดุผสม ซึ่งอาจมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน จึงมีข้อจำกัดในการอ้างอิงผลลัพธ์ไปใช้กับระบบโครงสร้างที่ซับซ้อนหรือแตกต่างจากแบบจำลอง แนวทาง

การศึกษาต่อยอดในอนาคตที่สามารถนำไปพัฒนาได้ ได้แก่ การเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทอื่น การวิเคราะห์ภายใต้ภาระและสภาวะแวดล้อมที่ซับซ้อน การศึกษาผลของความไม่สมบูรณ์ของแผ่นวัสดุคอมโพสิต และการทดลองจริงเพื่อยืนยันผลการจำลองและประเมินความไม่แน่นอนของผลลัพธ์

8. บรรณานุกรม

- [1] ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ. (2559). กลศาสตร์ของวัสดุคอมโพสิต. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] Mohammed O., Suleiman E. (2016). Deflection and stress analysis of fibrous composite laminates. *International Journal of Advanced Research in Computer Science Software Engineering*, 6(2), 105-112.
- [3] Nadaf M., Fernandes R. J. (2023). Bending analysis for stress and deflection for cross-ply laminated composite plate using higher order shear deformation theory subjected to sinusoidal loading using finite element method. *Indian Journal of Science and Technology*, 16(38), 3177-3185.
- [4] กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข, ณัฐพงษ์ กุลท้วม, เอกนรินทร์ ระลาธิ. (2559). ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่น – ความเค้นดัด และอัตราส่วนทางเรขาคณิตของแผ่นวัสดุเชิงประกอบเรียงชั้นแบบสมมาตรขอบสี่ด้านรองรับแบบยึดแน่น. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ มอ.*, 9(1), 61-69.
- [5] ธวัชชัย อุ้นใจม, กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข, อนุชา ตาน้อย, อนุชิต เกตุทะจักร์. (2561). พฤติกรรมการแอ่นของแผ่นวัสดุเชิงประกอบที่มีการเรียงชั้นแบบครอสพลาที่มีขอบสามด้านรองรับแบบยึดแน่น และอีกหนึ่งด้านปล่อยอิสระ. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.* อบ, 11(2), 53-64.
- [6] Autar K.K. (2006). *Mechanics of Composite Materials*. Boca Raton: Taylor & Francis Group LLC.
- [7] Isaac M., Daniel O. (1994). *Engineering Mechanics of Composite Materials*. New York: Oxford University Press.
- [8] หฤทกั กิรีติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิตสกุล, อภิรัตน์ เล่าห์บุตร. (2552). ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ. *วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 22(70), 18-32.
- [9] กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข. (2564). การสันสะท้อนเชิงกล. เชียงใหม่: ห้างหุ้นส่วนจำกัดจรัสธุรกิจการพิมพ์.
- [10] กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข. (2556). เอกสารประกอบการสอนวิชาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา.
- [11] Reddy J.N. (2004). *Mechanics of laminated composite plates and shells: Theory and Analysis*. Boca Raton: CRC Press LLC.
- [12] ANSYS, Inc. (2025). *ANSYS Student Version (Version 2025 R1) [Computer software]*. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc.

Retrieved April 3, 2025, from <https://www.ansys.com/>

- [13] Ugural A.C. (2009). *Stresses in beams, plates, and shells*. Boca Raton: CRC Press LLC.
- [14] Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. (1959). *Theory of plates and shells*. New York: McGraw-Hill.

การศึกษาและพัฒนาวิธีการและอุปกรณ์ในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มจากปฏิกิริยาเคมี เพื่อใช้ในการฝึกภาคสนาม

The Study and Development of Methods and A Chemical Reaction-Based Drinking Water Cooling Device for Military Field Training

ภัทรียา ตันติกุล

Pathareeya Tunthikul

กองวิชาเคมี ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า 26001 ประเทศไทย

Department of Chemistry, Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy
26001, Thailand

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

(Received: March 19, 2025, Revised: July 8, 2025, Accepted: July 22, 2025)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในการลดอุณหภูมิ
น้ำดื่มแบบบรรจุขวด ขนาด 330 มิลลิลิตร ให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาที่สั้นกว่าการใช้น้ำแข็ง ออกแบบ
และพัฒนาวิธีการและอุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่มจากปฏิกิริยาเคมีเพื่อใช้ในการฝึกภาคสนาม จากการศึกษาพบว่า
ค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่น้ำแข็งลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส เท่ากับ 37.00 ± 1.00 นาที ศึกษาปริมาณ
สารเคมีที่เหมาะสมในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส พบว่า ปฏิกิริยาระหว่างแบเรียมไฮดรอกไซด์
ออกตะไฮเดรต ปริมาณ 157.74 กรัม กับแอมโมเนียมไทโอไซยาเนต ปริมาณ 76.12 กรัม มีค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่ลด
อุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส เท่ากับ 30.33 ± 0.58 นาที การออกแบบและพัฒนาวิธีการและอุปกรณ์ลด
อุณหภูมิน้ำดื่ม ผลการพิจารณาทางเลือกในการปล่อยแก๊สแอมโมเนียออกจากถุงซีล็คพบว่า วิธีที่เหมาะสมที่สุด
ได้แก่ วิธีที่ 3 และทางเลือกในการเพิ่มการแนบสนิทของถุงซีล็คพบว่าวิธีที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ วิธีที่ 3 เมื่อทดสอบ
ประสิทธิภาพของอุปกรณ์พบว่ามีความเฉลี่ยระยะเวลาที่ลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส เท่ากับ
 14.00 ± 1.00 นาที ซึ่งสั้นกว่าระยะเวลาเฉลี่ยที่น้ำแข็งและสารเคมีลดอุณหภูมิน้ำดื่ม

คำสำคัญ : อุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่ม ปฏิกิริยาเคมี การฝึกภาคสนาม

Abstract : This research is an experimental study. The objective of this study was to determine the
amount of chemicals that reduced the temperature of bottled drinking water 330 mL to 15°C in a
shorter period of time than using ice, and to design and develop a chemical reaction-based drinking
water cooling device for military field training. From the study, it was found that the average time
taken by ice to reduce the temperature of drinking water to 15°C was 37.00 ± 1.00 minutes. According
to the study of the amount of chemicals to reduce the temperature of drinking water to 15°C, it was
found that chemical reaction between 157.74 grams of barium hydroxide octahydrate and 76.12
grams of ammonium thiocyanate could reduce the temperature of drinking water to 15°C in

30.33±0.58 minutes. For the design and development of a chemical reaction-based drinking water cooling device, the investigation into methods for releasing ammonia gas from the aluminum ziplock bag indicated that Method 3 was the most suitable approach. Similarly, in exploring ways to enhance the sealing efficiency of the aluminum ziplock bag, Method 3 also proved to be the most effective. When testing the efficiency of the drinking water cooling device that was developed, it was found that the device could reduce the temperature to 15°C with an average time of 14.00±1.00 minutes. This was less than the average time taken by using ice and chemical reaction.

Keywords : Drinking Water Cooling Device, Chemical Reaction, Military Field Training

1. บทนำ

การฝึกหรือปฏิบัติการภาคสนามของกำลังพลทหาร ส่วนใหญ่เป็นกิจกรรมและภารกิจที่ต้องใช้พลกำลัง ประกอบกับความร้อนในอากาศของประเทศไทย ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำออกจากร่างกาย เกิดความเหนื่อยล้า และรู้สึกกระหายน้ำ ดังนั้นในขณะกำลังฝึกหรือปฏิบัติการ และภายหลังการฝึกหรือปฏิบัติการภาคสนามจึงจำเป็นต้องดื่มน้ำให้เพียงพอเพื่อชดเชยน้ำที่สูญเสียไป น้ำที่นิยมดื่มเป็นน้ำเย็นเพื่อคืนน้ำให้กับร่างกาย การดื่มน้ำเย็นนอกจากคืนน้ำให้กับร่างกายแล้ว ยังทำให้รู้สึกสดชื่น กระปรี้กระเปร่า และคลายความรู้สึกกระหายน้ำได้ดี

ปัจจุบันการลดอุณหภูมิน้ำดื่มบรรจุขวดให้เป็นน้ำเย็นโดยไม่ใช้พลังงานไฟฟ้านิยมใช้น้ำแข็งเป็นหลัก โดยมีวิธีการลดอุณหภูมิ 2 วิธี คือ แช่ขวดน้ำดื่มลงในถังน้ำแข็ง และการเติมน้ำแข็งลงในน้ำดื่มโดยตรง อย่างไรก็ตาม แต่ละวิธีมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน การแช่ขวดน้ำดื่มลงในถังน้ำแข็งจำเป็นต้องใช้ถังขนาดใหญ่ ซึ่งอาจไม่สะดวกต่อการพกพาและการใช้งานภาคสนาม และเมื่อน้ำแข็งละลายทำให้บริเวณโดยรอบเปียกชื้นและไม่สะอาด ในขณะที่การเติมน้ำแข็งลงในน้ำดื่มโดยตรงจะต้องเทน้ำดื่มออกจากขวดลงภาชนะหรือแก้วที่มีปากกว้างแล้วจึงเติมน้ำแข็ง เนื่องจากก้นน้ำแข็งไม่สามารถผ่านปากขวดน้ำดื่มที่แคบได้ วิธีนี้อาจเสี่ยงต่อการปนเปื้อนเชื้อโรคหรือสิ่งสกปรกจากน้ำแข็งที่ไม่สะอาด และน้ำแข็งที่ลอยอยู่ในน้ำอาจทำให้ดื่มน้ำไม่สะดวก นอกจากนี้การพกพา จัดหา หรือเก็บรักษาน้ำแข็งสำหรับการใช้งานภาคสนามยังเป็นเรื่องที่ทำนาย

เพราะน้ำแข็งละลายง่าย และต้องใช้พื้นที่จัดเก็บที่เหมาะสม ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถลดอุณหภูมิน้ำดื่มโดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแหล่งความเย็นภายนอก เช่น น้ำแข็งหรือตู้เย็น จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจสำหรับการใช้งานในภาคสนาม

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาที่สั้นกว่าการใช้น้ำแข็ง

2.2 ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่มจากปฏิกิริยาเคมีเพื่อใช้ในการฝึกภาคสนาม

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ประโยชน์ของการดื่มน้ำเย็นกับการออกกำลังกาย

ข้อมูลจากสถาบันวิทยาศาสตร์การกีฬาของสหรัฐอเมริกา ระบุว่าน้ำเย็นมีประสิทธิภาพในการเติมน้ำให้ร่างกายได้ดีกว่าน้ำอุ่น เพราะน้ำเย็นดูดซึมได้เร็วกว่า สำหรับผู้ที่ต้องการความสดชื่นและเพิ่มประสิทธิภาพในการออกกำลังกาย ควรดื่มน้ำที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 15 - 22 องศาเซลเซียส หรือดื่มน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิร่างกาย [1] และ Abdollah Hosseinlou (2556) ได้ทำการวิจัยเรื่อง The effect of water of temperature and voluntary drinking on the post rehydration sweating ซึ่งได้นำกลุ่มตัวอย่างมาออกกำลังกายในห้องควบคุมที่ร้อนและชื้น เพื่อให้เสียเหงื่อมาก หลังจากนั้นจึงให้ดื่มน้ำในอุณหภูมิที่

แตกต่างกัน ได้แก่ 5, 16, 26 และ 58 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 วัน พบว่าน้ำที่อุณหภูมิ 16 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนักกีฬาที่สูญเสียเกลือแร่ [2]

การดื่มน้ำเย็นระหว่างการออกกำลังกายช่วยให้ร่างกายรู้สึกสดชื่นและเหมือนได้เติมพลังกลับมาอีกครั้ง นอกจากนี้การดื่มน้ำเย็นยังมีประโยชน์เพิ่มเติม [3] ดังนี้

3.1.1 ลดอุณหภูมิในร่างกาย การดื่มน้ำเย็นช่วยลดอุณหภูมิแกนกลางลำตัวได้ดี ลดการเสียเหงื่อ รักษาระดับน้ำในร่างกายได้ดีกว่า ซึ่งส่งผลให้ออกกำลังกายได้นานขึ้นอีกด้วย

3.1.2 ลดการสูญเสียจากการออกกำลังกาย มีงานวิจัยพบว่าผู้คนประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ เลือกดื่มน้ำเย็นระหว่างการออกกำลังกายหรือเล่นกีฬา เนื่องจากรู้สึกสดชื่นมากกว่า และช่วยลดการเสียเหงื่อได้มากกว่า ผลการวิจัยชิ้นหนึ่งชี้ให้เห็นว่าการดื่มน้ำเย็นช่วยลดการสูญเสียน้ำในร่างกายจากการออกกำลังกายได้ถึง 1.3 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัว ในขณะที่การเสียเหงื่อเพียง 2 เปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักตัวสามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการเล่นกีฬาได้อย่างมีนัยสำคัญ

3.1.3 เฝอผลแลยแคลอรี ข้อดีอีกอย่างหนึ่งของการดื่มน้ำเย็นคือการเฝอผลแลยแคลอรี เนื่องจากร่างกายจำเป็นต้องใช้พลังงานในการปรับอุณหภูมิของน้ำเย็นให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของร่างกาย ซึ่งในปี 2013 มีการวิจัยด้วยการให้อาสาสมัครสุขภาพสตรี 50 คน อายุระหว่าง 18 - 23 ปี ดื่มน้ำ 1.5 ลิตร ก่อนทานอาหารแต่ละมื้อครึ่งชั่วโมง พบว่าการดื่มน้ำช่วยให้น้ำหนักตัวลดลงเล็กน้อย

3.2 การเปลี่ยนแปลงพลังงานประเภทดูดความร้อนจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ปฏิกิริยาเคมีจำนวนมากเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อน ซึ่งสังเกตได้จากการถ่ายเทความร้อนระหว่างระบบ (System) กับสิ่งที่อยู่โดยรอบ (Surrounding) ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) และ ปฏิกิริยาดูดกลืนความร้อน (Endothermic reaction) [4]

ปฏิกิริยาดูดความร้อน หมายถึง ปฏิกิริยาที่

เกิดขึ้นแล้วจะดูดพลังงานความร้อนจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ระบบ ทำให้สภาพแวดล้อมมีอุณหภูมิลดลง ตัวอย่างปฏิกิริยาดูดความร้อน เช่น การสลายของผงฟูให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ด้วยแสง [5] งานวิจัยนี้้นำปฏิกิริยาดูดความร้อนระหว่างแบเรียมไฮดรอกไซด์ ออกตะไฮเดรต (Barium Hydroxide Octahydrate; $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) และแอมโมเนียมไทโอไซยาเนต (Ammonium Thiocyanate; NH_4SCN) ดังสมการที่ (1) [6] มาประยุกต์ใช้เพื่อลดอุณหภูมิน้ำดื่ม



3.3 ข้อมูลเบื้องต้นของสารเคมี

3.3.1 แบเรียมไฮดรอกไซด์ออกตะไฮเดรต [7]

1) ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

$\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ เป็นของแข็งสีขาว น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 315.48 กรัม/โมล ค่าความเป็นกรดต่าง 12.5 ที่ 20 องศาเซลเซียส มีจุดหลอมเหลว 78 องศาเซลเซียส ไม่ไวไฟ ความหนาแน่น 2.180 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถละลายน้ำได้ มีความเสถียรทางเคมีภายใต้สภาพแวดล้อมมาตรฐาน (อุณหภูมิห้อง) และคายความร้อนเมื่อทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือกรด

2) ข้อมูลด้านพิษวิทยา

ค่า LD50 ทางปากในหนูแรท เท่ากับ 550 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และค่า LC50 เมื่อสูดดมเข้าไปเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เท่ากับ 1.5 มิลลิกรัม/ลิตร

3) ข้อมูลเกี่ยวกับอันตราย

ความเป็นพิษเฉียบพลัน (ประเภทย่อย 4) เป็นอันตรายเมื่อสูดดม (H332) และเป็นอันตรายเมื่อกลืนกิน (H302) ในกรณีของการกัดกร่อนผิวหนัง (ประเภทย่อย 1B) สารนี้จะทำให้เกิดการไหม้อย่างรุนแรงบนผิวหนังและส่งผลให้ดวงตาถูกทำลาย (H314)

4) การปฐมพยาบาล

หากมีการสูดดมสารให้ผู้ประสบเหตุรับอากาศบริสุทธิ์ทันที และนำส่งแพทย์โดยด่วน กรณีที่มีการสัมผัสกับผิวหนัง ให้ถอดเสื้อผ้าที่ปนเปื้อนทั้งหมดออกทันที ล้างผิวหนังบริเวณที่สัมผัสด้วยน้ำไหลรินหรือฝักบัว กรณีมีสารเข้าตา ให้ล้างตาด้วยน้ำปริมาณมาก

ทันที หากมีการกลืนกิน ให้ดื่มน้ำตามอย่างน้อย 2 แก้ว และหลีกเลี่ยงการทำให้อาเจียนเพราะอาจทำให้เกิดการกัดกร่อน ห้ามทำให้เป็นกลาง

3.3.2 แอมโมเนียมไทโอไซยาเนต [8]

1) ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกายภาพ และเคมี

NH_4SCN เป็นของแข็งไม่มีสี ไม่มีกลิ่น น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 76.12 กรัม/โมล ค่าความเป็นกรดต่าง 4.0 - 5.5 ที่ 25 องศาเซลเซียส มีจุดหลอมเหลว 152 - 154 องศาเซลเซียส ไม่วัไฟ ความหนาแน่น 1.300 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความสามารถในการละลายน้ำ โดยประมาณ 76.1 กรัม/ลิตร ที่ 20 องศาเซลเซียส มีความเสถียรทางเคมีภายใต้สภาพแวดล้อมมาตรฐาน (อุณหภูมิห้อง) สามารถสร้างแก๊สหรือไอที่อันตรายเมื่อสัมผัสกับกรด มีความเสี่ยงต่อการระเบิดหรือเกิดแก๊สพิษเมื่อทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์หรือไนเตรต มีความว่องไวต่อการกระแทกหรือเสียดสีเมื่อทำปฏิกิริยากับคลอเรต

2) ข้อมูลด้านพิษวิทยา

ค่า LD50 ทางปากในหนูแรท เท่ากับ 750 มิลลิกรัม/กิโลกรัม อาจทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน และท้องเสีย การประมาณความเป็นพิษเฉียบพลัน ถ้าสูดดมเข้าไป เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เท่ากับ 1.6 มิลลิกรัม/ลิตร และถ้าสัมผัสผิวหนัง เท่ากับ 1,100.1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

3) ข้อมูลเกี่ยวกับอันตราย

ความเป็นพิษเฉียบพลัน (ประเภทย่อย)
4) เป็นอันตรายเมื่อสูดดม (H332) เป็นอันตรายเมื่อกลืนกิน (H302) และเป็นอันตรายเมื่อสัมผัสผิวหนัง (H312) นอกจากนี้สารยังทำให้เกิดการทำลายดวงตาอย่างรุนแรง (H318) เป็นอันตรายระยะยาวต่อสิ่งแวดล้อมในน้ำ รวมถึงมีผลกระทบระยะยาว (H412)

4) การปฐมพยาบาล

หากมีการสูดดมสารให้ผู้ประสบเหตุรับอากาศบริสุทธิ์ทันที และพักในที่ที่หายใจสะดวก จากนั้นรีบนำส่งแพทย์ กรณีที่มีการสัมผัสกับผิวหนังให้ล้างบริเวณที่สัมผัสด้วยน้ำปริมาณมาก ๆ ส่วนกรณี

สารเข้าสู่ดวงตาให้ล้างตาออกด้วยน้ำเป็นเวลาหลาย ๆ นาที

3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธนพล อามาตร และคณะ (2556) [9] ทำการวิจัยเรื่องการพัฒนาแพคให้ความเย็นแบบพกพาจากปฏิกิริยาเคมีเพื่อใช้ในการปฐมพยาบาลเบื้องต้น พบว่าสารที่ทำปฏิกิริยาแล้วให้อุณหภูมิต่ำที่สุดและสะดวกสำหรับการพกพา คือ $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ กับ NH_4SCN โดยอัตราส่วนโดยโมลที่ให้อุณหภูมิเริ่มต้นต่ำที่สุดและระยะเวลาที่นานที่สุด เท่ากับ 1 : 2 และปริมาณที่เหมาะสมคือ 0.10 : 0.20 โมล เนื่องจากเป็นปริมาณสารเคมีที่น้อยที่สุด แต่ให้อุณหภูมิเริ่มต้นต่ำและระยะเวลาที่นานใกล้เคียงกับปริมาณอื่น สำหรับแพคให้ความเย็นจะใช้ถุงอะลูมิเนียมซีปล็อก ขนาด 4.5 x 7 นิ้ว เป็นอุปกรณ์ที่ใช้บรรจุสารเคมี โดยบรรจุ $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ลงในถุง แล้วใช้คลิปพลาสติกอุดปิดไว้ตรงกลางถุงก่อนใส่ NH_4SCN ลงในถุงเหนือคลิปพลาสติก ปิดถุงอะลูมิเนียมซีปล็อกให้สนิท เมื่อต้องการใช้งาน ให้ดึงคลิปพลาสติกตรงกลางออก แล้วเขย่าให้สารเคมีผสมกันจนเกิดความเย็น ซึ่งเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมในการเป็นแพคให้ความเย็นแบบพกพามากที่สุด

วรพล มณีดุลย์ และคณะ (2557) [10] ทำการวิจัยเรื่องการศึกษาสารเคมีเพื่อใช้ในแพคความเย็นสำหรับภารกิจภาคสนามทางทหาร สารที่ทำปฏิกิริยาแล้วให้อุณหภูมิต่ำที่สุดและสะดวกสำหรับการพกพา คือ $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ กับ NH_4NO_3 อัตราส่วนโดยโมลที่ให้อุณหภูมิเริ่มต้นต่ำที่สุดและระยะเวลาที่นานที่สุด เท่ากับ 1 : 2 ปริมาณที่เหมาะสมคือ 0.10 : 0.20 โมล เนื่องจากใช้ปริมาณสารเคมีน้อยที่สุดแต่ให้อุณหภูมิเริ่มต้นต่ำ และระยะเวลาที่นานใกล้เคียงกับปริมาณอื่น นอกจากนี้การเติม NaCl ปริมาณ 4 กรัม มีส่วนช่วยให้อุณหภูมิของแพคความเย็นต่ำลง การพัฒนาแพคความเย็นโดยใช้ถุงอะลูมิเนียมซีปล็อก ขนาด 6 X 10 นิ้ว เป็นอุปกรณ์ที่ใช้บรรจุสารเคมี โดยการบรรจุ $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ และ NaCl ลงในถุง แล้วใช้คลิปพลาสติกอุดปิดไว้ตรงกลางถุงก่อนใส่ NH_4NO_3 ลงในถุงเหนือคลิปพลาสติก ปิดถุงอะลูมิเนียมซีปล็อกให้สนิท ซิลด้วยความร้อน พับครึ่งตามรอยคลิป

พลาสติกเพื่อแบ่งสารเคมีเป็นสองส่วน ดึงคลิปพลาสติกออก พับถุงอะลูมิเนียมตรงรอยพับครึ่งลงอีกเล็กน้อยแล้วติดเทปกาวยาวตรงรอยพับ ทำการบรรจุลงช่องบรรจุภัณฑ์พลาสติกซิปล็อก เมื่อต้องการใช้งานให้นำแพคเกจความเย็นออกจากช่องพลาสติก ดึงปลายสองด้านของแพคเกจความเย็นออกจากกันจนเทปกาวยหลุด เชี่ยวแพคเกจความเย็นให้สารเคมีในแพคเกจความเย็นทั้งสองส่วนผสมเข้าด้วยกัน นำแพคเกจความเย็นไปใช้ตามต้องการ

Park, D., et al. (2023) [11] ทำการวิจัยเรื่อง Experimental Work on Salt-Based Cooling Systems พบว่าระบบทำความเย็นที่ใช้เกลือเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถชาร์จพลังงานได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบนี้อาศัยคุณสมบัติของเกลือดูดความร้อน (Endothermic Salts) ซึ่งให้ผลทำความเย็นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อถูกละลายในน้ำ ในงานวิจัยนี้ได้มีการทดสอบคัดเลือกเกลือดูดความร้อนหลายชนิดเพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำความเย็น และมีการพัฒนาระบบต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อสาธิตกระบวนการกักเก็บพลังงานความร้อนและการสร้างความเย็นจากเกลือดูดความร้อน ผลการทดลองพบว่าระบบที่ใช้เกลือโพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium Chloride; KCl) สามารถลดอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 12.3 °C และยังสามารถรักษาการลดลงของอุณหภูมิได้แม้ผ่านกระบวนการชาร์จและคายประจุ อย่างไรก็ตามระยะเวลาการทำความเย็นลดลงหลังจากรอบการทำงานแต่ละครั้ง

ศิริลักษณ์ ถาวรวิริยะ และคณะ (2548) [12] ทำการศึกษาการพัฒนาแบบก้อนทำความเย็น (น้ำแข็งแห้ง) กับการรักษาความเย็นในภาชนะสำหรับเก็บนํ้านมเพื่อรักษาคุณภาพนํ้านมแม่ โดยเปรียบเทียบก้อนทำความเย็นชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ถุงพลาสติกใส่นํ้า (น้ำแข็งแห้ง) ฟองนํ้าใส่นํ้า Icebrick และ Coldhot pack กับภาชนะที่ใช้บรรจุ นํ้านมแม่ ผลการวิจัยพบว่าในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 28 - 32 องศาเซลเซียส สามารถรักษาอุณหภูมิในกระติกน้ำแข็งหรือกระเป๋าสติกให้น้อยกว่า หรือเท่ากับ 15 องศาเซลเซียสได้ โดยใช้ถุงพลาสติกใส่นํ้า 100 ml จำนวน 4, 6 และ 8 ก้อน ในกระติกน้ำแข็ง และกระเป๋าสติก ซึ่งสามารถรักษาความเย็นได้ที่ 12, 15 และ

17 ชั่วโมง และ 8, 10 และ 11 ชั่วโมง ตามลำดับ นอกจากนี้ฟองนํ้าใส่นํ้า 100 ml 4, 6 และ 8 ก้อนในกระติกน้ำแข็ง และกระเป๋าสติก สามารถรักษาความเย็นได้ที่ 11, 14 และ 16 ชั่วโมง และ 8, 10 และ 11 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วน Icebrick จำนวน 1 และ 2 ก้อน ในกระติกน้ำแข็ง สามารถรักษาความเย็นได้ที่ 4 และ 17 ชั่วโมง ตามลำดับ สำหรับ Coldhot pack จำนวน 1 และ 2 ก้อน ในกระติกน้ำแข็ง และกระเป๋าสติก สามารถรักษาความเย็นได้ที่ 2 ชั่วโมง

4. วิธีดำเนินการศึกษา

เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) ที่พัฒนาต่อยอดจากงานวิจัยของธนพล อามาตร และคณะ [9] ใช้ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง $\text{Ba(OH)}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ กับ NH_4SCN อัตราส่วนโดยโมล เท่ากับ 1 : 2 แต่ปรับขนาดถุงอะลูมิเนียมซิปล็อคจากขนาด 4.5×7 นิ้ว เป็นขนาด 8×12 นิ้ว ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถพันรอบขวดนํ้าดื่มขนาด 330 มิลลิตรได้พอดี มีการดำเนินการวิจัย ดังนี้

4.1 การศึกษาระยะเวลาที่น้ำแข็งลดอุณหภูมิ นํ้าดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส

ทำการทดลองโดยวัดอุณหภูมิของนํ้าดื่มที่บรรจุขวดพลาสติกขนาด 330 มิลลิตร บันทึกอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25 องศาเซลเซียส นำขวดนํ้าดื่มแช่ในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิตร ที่มีน้ำแข็งบรรจุสูงเท่ากับความสูงของนํ้าดื่มในขวด ดังภาพที่ 1 เสมือนเป็นการจำลองการลดอุณหภูมิ นํ้าดื่มบรรจุขวดโดยวิธีแช่ขวดนํ้าดื่มลงในนํ้าแข็ง บันทึกอุณหภูมิของนํ้าดื่มในขวดทุก 1 นาที จนนํ้าดื่มมีอุณหภูมิเหลือ 15 องศาเซลเซียส บันทึกระยะเวลาที่นํ้าแข็งลดอุณหภูมิ นํ้าดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง นำมาหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่นํ้าแข็งลดอุณหภูมิ นํ้าดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส

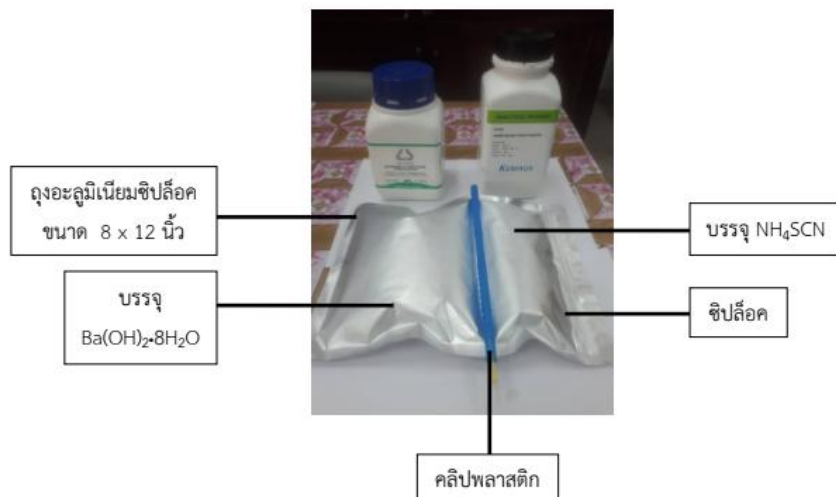


ภาพที่ 1 การศึกษาระยะเวลาที่น้ำแข็งลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส

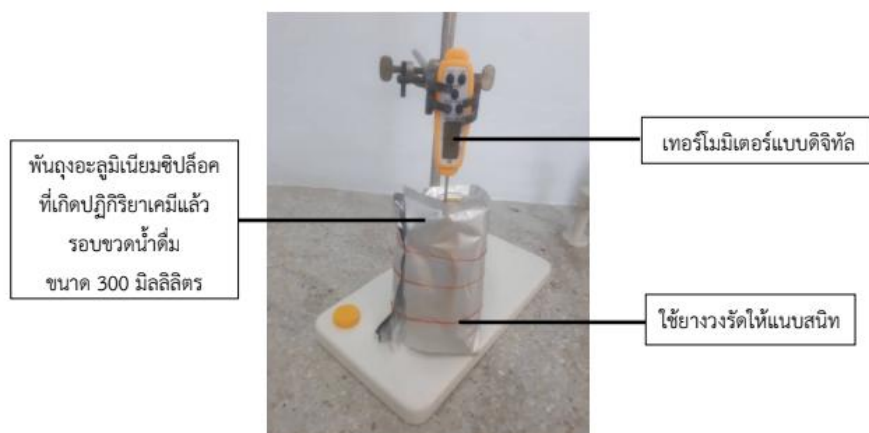
4.2 การศึกษาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาที่สั้นกว่าการใช้น้ำแข็ง

ศึกษาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในการลดอุณหภูมิ น้ำดื่ม จะใช้ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ และ NH_4SCN ในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 1 : 2

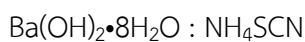
ทำการทดลองโดยเตรียม $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ บรรจุลงในถุงอะลูมิเนียมซีปล็อก ปิดคลิปพลาสติกที่กลางถุงเติม NH_4SCN ลงในถุงเหนือคลิปพลาสติก ปิดซีปล็อกให้สนิท ดังภาพที่ 2 เมื่อต้องการใช้งานดึงคลิปพลาสติกออก เขย่าถุงให้สารเคมีผสมกัน นำถุงอะลูมิเนียมซีปล็อกพันรอบขวดน้ำดื่มขนาด 330 มิลลิลิตร ใช้ยางรัดให้แน่นสนิทโดย ดังภาพที่ 3 บันทึกอุณหภูมิของน้ำดื่มในขวดเริ่มต้นที่ 25 องศาเซลเซียส และบันทึกอุณหภูมิทุก 1 นาที จนน้ำดื่มมีอุณหภูมิเหลือ 15 องศาเซลเซียส บันทึกระยะเวลาที่สารเคมีลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง นำมาหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่สารเคมีลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส โดยแบ่งเป็น 3 การทดลองตามจำนวนโมลและปริมาณสารเคมี ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 2 การเตรียมบรรจุสารเคมีลงในถุงอะลูมิเนียมซีปล็อก



ภาพที่ 3 การศึกษาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 1 จำนวนโมลและปริมาณของ

ที่ใช้ในการทดลอง

การทดลอง ที่	$\text{Ba(OH)}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$		NH_4SCN	
	โมล	ปริมาณ(กรัม)	โมล	ปริมาณ(กรัม)
1	0.25	78.87	0.50	38.06
2	0.50	157.74	1.00	76.12
3	0.75	236.61	1.50	114.18

4.3 การออกแบบและพัฒนาวิธีการและอุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่มจากปฏิกิริยาเคมีเพื่อใช้ในการฝึกภาคสนาม

การออกแบบและพัฒนาวิธีการและอุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่มพัฒนาจากงานวิจัยของธนพล อามาตร และคณะ [9] โดย บรรจุ $\text{Ba(OH)}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ลงในถุงอะลูมิเนียมซีปล็อก ขนาด 8×12 นิ้ว ปิดคลิปพลาสติกที่กลางถุงอะลูมิเนียมซีปล็อก เติม NH_4SCN ลงในถุงอะลูมิเนียมซีปล็อกเหนือคลิปพลาสติก ปิดซีปล็อกให้สนิท เมื่อทำให้สารเคมีเกิดปฏิกิริยากันในถุงแล้ว นำถุงมาพันรอบขวดน้ำดื่มขนาด 330 มิลลิลิตร โดยใช้ยางรัดครอบขวด เพื่อลดอุณหภูมิน้ำดื่มที่อยู่ในขวด แต่ยังพบปัญหา 2 ประการ คือ แก๊สแอมโมเนียที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีซึ่งยังคงตกค้างอยู่ในถุงซีปล็อก และการแนบสนิทของถุงซีปล็อกกับขวดน้ำดื่ม การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จะเป็นการแก้ไขปัญหาและเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะพิจารณาข้อดีและข้อเสียในการใช้งานของทางเลือกแต่ละวิธี แล้วเลือกวิธีที่ดีที่สุด ดังนี้

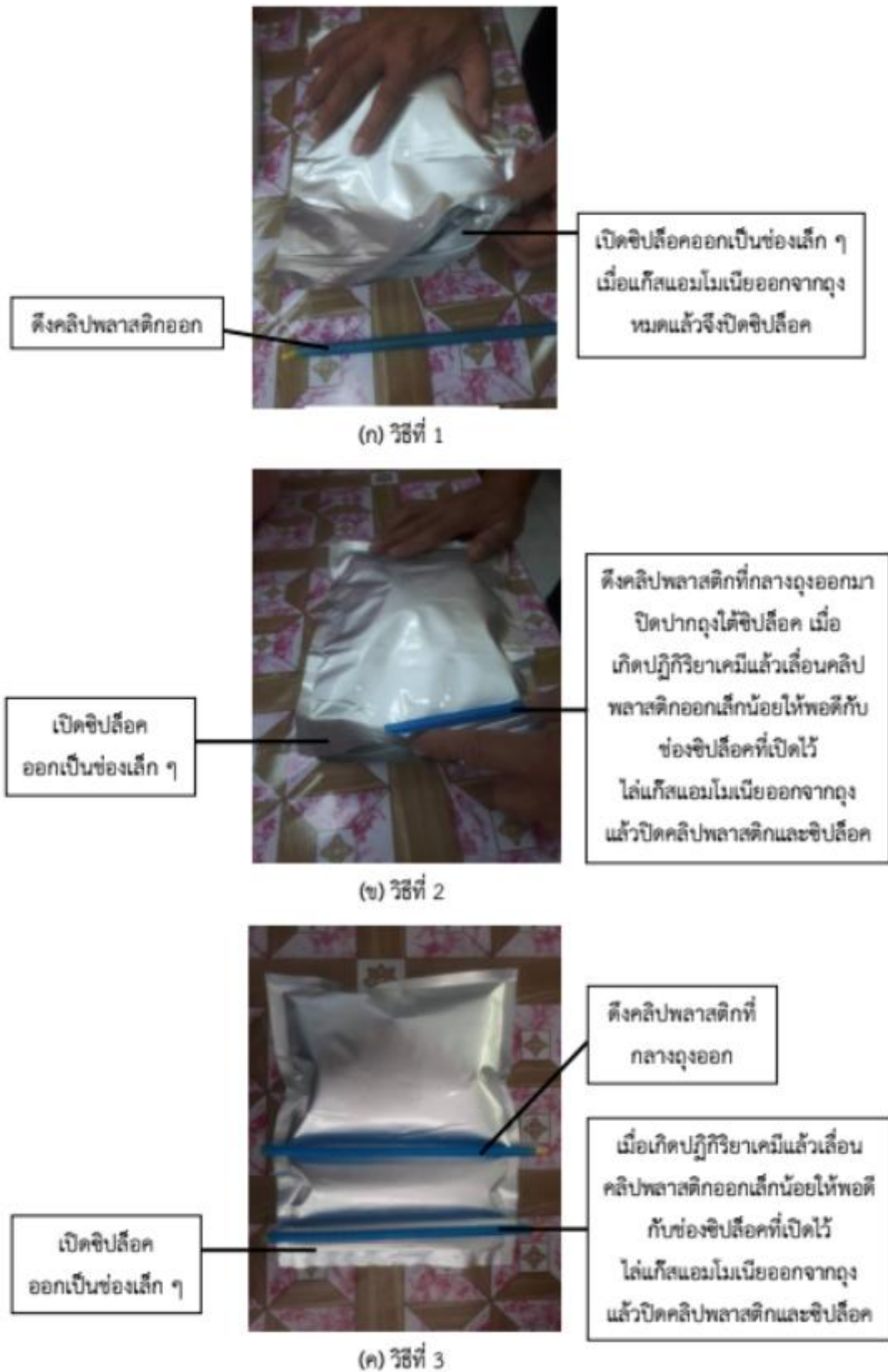
4.3.1 แก๊สแอมโมเนีย (Ammonia; NH_3) ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่าง $\text{Ba(OH)}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ และ NH_4SCN ดังสมการที่ (1) ซึ่งยังคงตกค้างอยู่ในถุงอะลูมิเนียมซีปล็อก ทำให้ประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มลดลง งานวิจัยนี้ได้นำเสนอทางเลือกในการปล่อยแก๊สแอมโมเนียออกจากถุง ซีปล็อก 3 วิธี ดังนี้

1) วิธีที่ 1 เมื่อเวลาใช้งาน ดึงคลิปพลาสติกที่กลางถุงออก เขย่าถุงให้สารเคมีผสมกัน แล้วเปิดซีปล็อกเป็นช่องเล็ก ๆ ที่ปลายด้านใดด้านหนึ่งเพื่อให้แก๊สแอมโมเนียออกจากถุง โดยระมัดระวังไม่ให้สารเคมีอื่นรั่วไหลออกมาด้วย เมื่อแก๊สแอมโมเนียออกจากถุง

หมดแล้วจึงปิดซีปล็อก ดังภาพที่ 4 (ก)

2) วิธีที่ 2 เมื่อเวลาใช้งาน เปิดซีปล็อกออกเป็นช่องเล็ก ๆ ที่ปลายด้านใดด้านหนึ่ง โดยระมัดระวังไม่ให้ NH_4SCN ซึ่งบรรจุอยู่รั่วไหลออกมา แล้วดึงคลิปพลาสติกที่กลางถุงออก จากนั้นนำคลิปพลาสติกมาปิดปากถุงใต้ซีปล็อก เขย่าถุงให้สารเคมีผสมกัน เลื่อนคลิปพลาสติกออกเล็กน้อยให้พอดีกับช่องซีปล็อกที่เปิดไว้ ใส่แก๊สแอมโมเนียออกจากถุง โดยระมัดระวังไม่ให้สารเคมีอื่นรั่วไหลออกมาด้วย เมื่อแก๊สแอมโมเนียออกจากถุงหมดแล้ว จึงปิดคลิปพลาสติกและซีปล็อก ดังภาพที่ 4 (ข)

3) วิธีที่ 3 ในการเตรียมอุปกรณ์จะใส่คลิปพลาสติก 2 อัน บริเวณกลางถุงระหว่างสารเคมี 1 อัน เหมือนเช่นเดิม และบริเวณปากถุงใต้ซีปล็อกอีก 1 อัน เมื่อเวลาใช้งานเปิดซีปล็อกออกเป็นช่องเล็ก ๆ แล้วดึงคลิปพลาสติกที่กลางถุงออก เขย่าถุงให้สารเคมีผสมกัน เลื่อนคลิปพลาสติกที่ปากถุงออกเล็กน้อยให้พอดีกับช่องซีปล็อกที่เปิดไว้ ใส่แก๊สแอมโมเนียออกจากถุง โดยระมัดระวังไม่ให้สารเคมีอื่นรั่วไหลออกมาด้วย เมื่อแก๊สแอมโมเนียออกจากถุงหมดแล้ว จึงปิดคลิปพลาสติกและซีปล็อก ดังภาพที่ 4 (ค)



ภาพที่ 4 ทางเลือกในการปล่อยแก๊สแอมโมเนียออกจากถุงซิปล็อค 3 วิธี

4.3.2 การเพิ่มการแนบสนิทของถุงซิปล็อคที่เกิดขึ้นปฏิกิริยาแล้วและพร้อมใช้งานกับขวดน้ำดื่มทดแทนการใช้ยางวงที่รัดรอบขวด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิน้ำดื่ม งานวิจัยนี้ได้นำเสนอทางเลือกในการเพิ่มการแนบสนิทของถุงซิปล็อค 3 วิธี ดังนี้

1) วิธีที่ 1 ใช้รัดท้อป (ยางยืดรัดขาทางเกษตรกรรม ลักษณะเป็นแผ่นผ้ายืดหยุ่นขนาด 2×11 นิ้ว มีตีนตุ๊กแกที่ปลายทั้ง 2 ข้าง) จำนวน 1 ชิ้น พันทับถุงอะลูมิเนียมซิปล็อคที่พันรอบขวดน้ำดื่ม ดัดตีนตุ๊กแกให้แน่น ดังภาพที่ 5 (ก)

2) วิธีที่ 2 ใช้รัดท้อป จำนวน 2 ชิ้น พันทับถุงอะลูมิเนียมซิปล็อคที่พันรอบขวดน้ำดื่ม ดัดตีนตุ๊กแกให้แน่น ดังภาพที่ 5 (ข)

3) วิธีที่ 3 ใช้แผ่นรัดขวดน้ำดื่ม (ทำจากรัดท้อป 3 ชิ้น เย็บติดกันเป็นแผ่น) โดยวางถุงอะลูมิเนียมซิปล็อคที่สารเคมีเกิดปฏิกิริยาในถุงแล้วลงบนแผ่นรัดขวดน้ำดื่ม วางขวดน้ำดื่มบนถุงแล้วพันรอบขวดน้ำดื่ม ดัดตีนตุ๊กแกให้แน่น ดังภาพที่ 5 (ค)



ภาพที่ 5 ทางเลือกในการเพิ่มการแนบสนิทของถุงซิปล็อค 3 วิธี

4.3.3 ทดสอบอุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่มโดยใช้ผลการพิจารณาทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดจากข้อ 4.3.1 และ 4.3.2 โดยดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในข้อ 4.2 โดยใช้ปริมาณสารเคมีที่สามารถลดอุณหภูมิน้ำดื่มได้ดีที่สุด จากนั้นบันทึกระยะเวลาที่อุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่มสามารถลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และนำผลที่ได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่อุปกรณ์สามารถลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส

วิธีการในการทดลองลดอุณหภูมิน้ำดื่มมีทั้งสิ้น 3 วิธีการดังตารางที่ 2

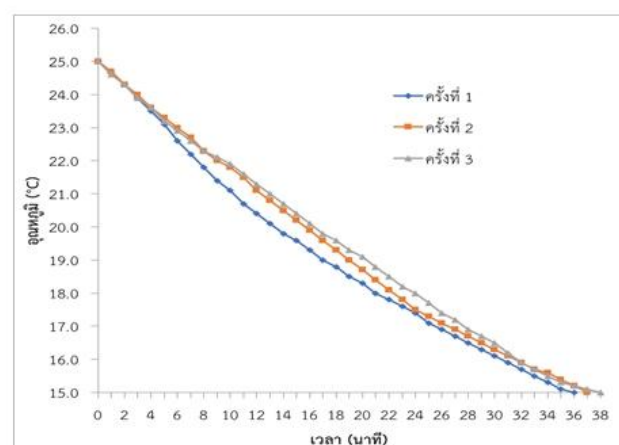
ตารางที่ 2 วิธีการในการทดลองลดอุณหภูมิน้ำดื่ม

วิธีที่	การทดลองลดอุณหภูมิน้ำดื่ม	
1	น้ำแข็ง	
2	Ba(OH) ₂ ·8H ₂ O : NH ₄ SCN (กรัม)	78.87 : 38.06
		157.74 : 76.12
		236.61 : 114.18
3	อุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่มจากปฏิกิริยาเคมี	

5. ผลการศึกษา

5.1 ผลการศึกษาระยะเวลาที่น้ำแข็งลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส

ผลการดำเนินการวิจัยพบว่า น้ำดื่มในขวดที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 25 องศาเซลเซียส เมื่อนำขวดน้ำดื่มแช่ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำแข็งบรรจุอยู่และบันทึกอุณหภูมิของน้ำดื่มในขวดทุก 1 นาที จนน้ำดื่มมีอุณหภูมิลดลงเหลือ 15 องศาเซลเซียส ผลการทดลองครั้งที่ 1, 2 และ 3 ใช้ระยะเวลาเท่ากับ 36, 37 และ 38 นาที ตามลำดับ ดังภาพที่ 6 เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่น้ำแข็งใช้ในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 37.00 ± 1.00 นาที ดังแสดงในตารางที่ 5



ภาพที่ 6 อุณหภูมิน้ำดื่มและระยะเวลาที่น้ำแข็งลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส

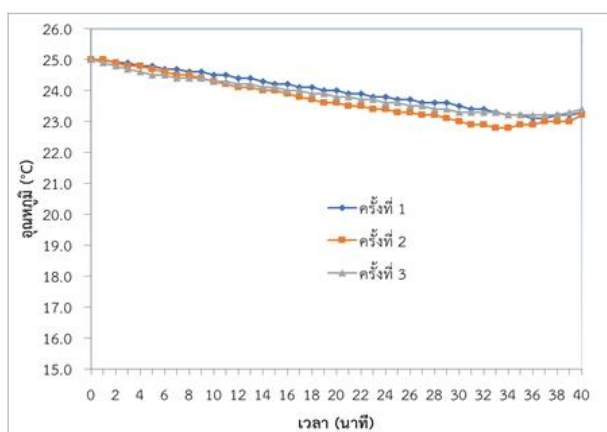
5.2 ผลการศึกษาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส ใน

ระยะเวลาที่สั้นกว่าการใช้น้ำแข็ง

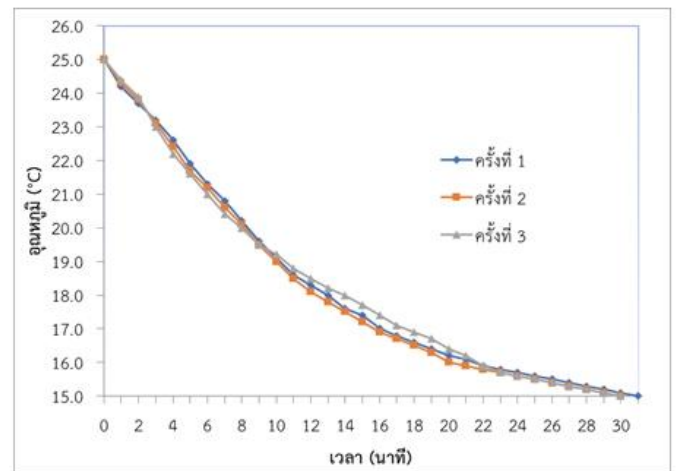
ในการทดลองที่ 1 ใช้สารเคมีคือ $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ปริมาณ 78.87 กรัม ร่วมกับ NH_4SCN ปริมาณ 38.06 กรัม ผลการทดลองพบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไป 40 นาที ทำการวัดอุณหภูมิของน้ำดื่ม ครั้งที่ 1, 2 และ 3 ลดลงเหลือ 23.3, 23.2 และ 23.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังภาพที่ 7 ซึ่งค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่สารเคมีลดอุณหภูมิน้ำดื่มมากกว่า 37 นาทีแล้ว แต่ยังไม่สามารถลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียสได้ จึงยุติการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 5

ในการทดลองที่ 2 ใช้สารเคมีคือ $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ปริมาณ 157.74 กรัม ร่วมกับ NH_4SCN ปริมาณ 76.12 กรัม ผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาที่สารเคมีใช้ลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 31, 30 และ 30 นาที ตามลำดับ ดังภาพที่ 8 เมื่อนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 30.33 ± 0.58 นาที ดังแสดงในตารางที่ 5

ในการทดลองที่ 3 ใช้สารเคมีคือ $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ปริมาณ 236.61 กรัม ร่วมกับ NH_4SCN ปริมาณ 114.18 กรัม ผลการทดลองพบว่า ปริมาณสารเคมีมีมากเกินไปที่จะบรรจุลงในถุงอะลูมิเนียมซีปล็อก ขนาด 8×12 นิ้ว ได้หมด จึงยุติการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 5



ภาพที่ 7 อุณหภูมิน้ำดื่มและระยะเวลาที่สารเคมีใช้ในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส จากการทดลองที่ 1



ภาพที่ 8 อุณหภูมิน้ำดื่มและระยะเวลาที่สารเคมีใช้ในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส จากการทดลองที่ 2

5.3 การออกแบบและพัฒนาวิธีการและอุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่มจากปฏิกิริยาเคมีเพื่อใช้ในการฝึกภาคสนาม

5.3.1 ทางเลือกในการปล่อยแก๊สแอมโมเนียออกจากถุงซีปล็อก

ทางเลือกในการกำจัดแก๊สแอมโมเนียที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีซึ่งยังคงตกค้างอยู่ในถุงอะลูมิเนียมซีปล็อกที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้สามารถจำแนกเป็น 3 วิธี แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อดีและข้อเสียของวิธีการกำจัดแก๊สแอมโมเนียโดยการปล่อยแก๊สแอมโมเนียออกจากถุงซิปล็อค 3 วิธี

วิธีการกำจัดแก๊สแอมโมเนีย	ข้อดี	ข้อเสีย
วิธีที่ 1: เมื่อเวลาใช้งาน ดึงคลิปพลาสติกที่กลางถุงออก เขย่าถุงให้สารเคมีผสมกัน แล้วเปิดซิปล็อคเป็นช่องเล็ก ๆ ที่ปลายด้านใดด้านหนึ่ง ไล่แก๊สออกจากถุงแล้วปิด ซิปล็อค	- ใช้งานอุปกรณ์ได้อย่างรวดเร็ว ไม่เสียเวลาในการใส่คลิปพลาสติกอีกครั้ง - ใช้ค่าใช้จ่ายคลิปพลาสติก 1 ชิ้น	- เสี่ยงต่อการปนเปื้อนสารเคมีออกมานอกถุงขณะดึงเปิดซิปล็อค
วิธีที่ 2: เมื่อเวลาใช้งาน เปิดซิปล็อคออกเป็นช่องเล็ก ๆ ที่ปลายด้านใดด้านหนึ่ง ดึงคลิปพลาสติกที่กลางถุงออก จากนั้นนำคลิปพลาสติกมาปิดปากถุงได้ซิปล็อค เขย่าถุงให้สารเคมีผสมกัน เลื่อนคลิปพลาสติกออกเล็กน้อยให้พอดีกับช่องซิปล็อคที่เปิดไว้ ไล่แก๊สแอมโมเนียออกจากถุง แล้วปิดคลิปพลาสติกและซิปล็อค	- ใช้ค่าใช้จ่ายคลิปพลาสติก 1 ชิ้น - เสี่ยงต่อการปนเปื้อนสารเคมีน้อย การมีคลิปพลาสติกปิดได้ซิปล็อคและเปิดช่องซิปล็อคไว้ ทำให้ไม่ต้องมีการดึงเปิดซิปล็อค	- เสียเวลาในการใส่คลิปพลาสติกใหม่
วิธีที่ 3: ในการเตรียมอุปกรณ์จะใส่คลิปพลาสติก 2 อัน บริเวณกลางถุงระหว่างสารเคมี 1 อัน และบริเวณปากถุงได้ซิปล็อคอีก 1 อัน เมื่อเวลาใช้งานเปิดซิปล็อคออกเป็นช่องเล็ก ๆ แล้วดึงคลิปพลาสติกที่กลางถุงออก เขย่าถุงให้สารเคมีผสมกัน ดึงคลิปพลาสติกที่ปากถุงออกเล็กน้อยให้พอดีกับช่องซิปล็อคที่เปิดไว้ ไล่แก๊สแอมโมเนียออกจากถุงแล้วปิดคลิปพลาสติกและซิปล็อค	- ใช้งานอุปกรณ์ได้อย่างรวดเร็ว ไม่เสียเวลาในการใส่คลิปพลาสติกอีกครั้ง - ไม่เสี่ยงต่อการปนเปื้อนสารเคมีออกมานอกถุงเนื่องจากไม่ต้องดึงเปิดซิปล็อค	- ใช้ค่าใช้จ่ายคลิปพลาสติก 2 ชิ้น

จากการพิจารณาทางเลือกในการปล่อยแก๊สแอมโมเนียออกจากถุงซิปล็อคพบว่า วิธีที่เหมาะสมที่สุดได้แก่ วิธีที่ 3 ในการเตรียมอุปกรณ์จะใส่คลิปพลาสติก 2 อัน บริเวณกลางถุงระหว่างสารเคมี 1 อัน และบริเวณปากถุงได้ซิปล็อคอีก 1 อัน เมื่อเวลาใช้งานเปิดซิปล็อคออกเป็นช่องเล็ก ๆ แล้วดึงคลิปพลาสติกที่กลางถุงออก เขย่าถุงให้สารเคมีผสมกัน ดึงคลิปพลาสติกที่ปากถุงออกเล็กน้อยให้พอดีกับช่องซิปล็อคที่เปิดไว้ ไล่แก๊สแอมโมเนียออกจากถุง เมื่อแก๊สแอมโมเนียออกจากถุงหมดแล้ว จึงทำการปิดคลิปพลาสติกและซิปล็อค เนื่องจากถึงแม้จะมีค่าใช้จ่ายคลิปพลาสติกเพิ่มขึ้นเป็น 2 อัน แต่ในการใช้งานสามารถใช้ได้อย่างสะดวกรวดเร็ว ที่สำคัญคือมีความปลอดภัยไม่เสี่ยงต่อการปนเปื้อนสารเคมีออกมานอกถุง

5.3.2 ทางเลือกในการเพิ่มการแนบสนิของถุงซิปล็อค ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้สามารถจำแนกออกเป็น 3

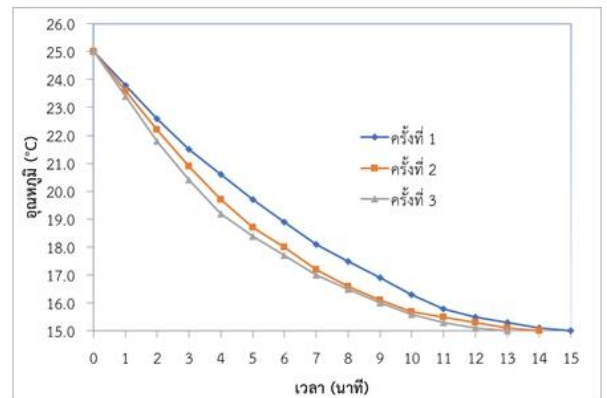
วิธี แต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ข้อดีและข้อเสียของวิธีการเพิ่มการแนบสนิทของถุงซิปล็อค

วิธีเพิ่มการแนบสนิทของถุงซิปล็อค	ข้อดี	ข้อเสีย
วิธีที่ 1: ใช้รัดท้อป 1 ชั้น พันทับถุงอะลูมิเนียมซิปล็อคที่พันรอบขวดน้ำดื่ม ดัดตีสันตึกแก็ให้แน่น	- ใช้ค่าใช้จ่ายรัดท้อป 1 ชั้น - พันทับถุงซิปล็อคได้ง่าย	- ทำให้ถุงแนบสนิทกับขวดน้ำดื่มน้อย
วิธีที่ 2: ใช้รัดท้อป จำนวน 2 ชั้น พันทับถุงอะลูมิเนียมซิปล็อคที่พันรอบขวดน้ำดื่ม ดัดตีสันตึกแก็ให้แน่น	- พันทับถุงซิปล็อคได้ง่าย - ทำให้ถุงแนบสนิทกับขวดน้ำดื่มมากขึ้น	- ใช้ค่าใช้จ่ายรัดท้อป 2 ชั้น
วิธีที่ 3: ใช้แผ่นรัดขวดน้ำดื่ม (ทำจากรัดท้อป 3 ชั้น เย็บติดกันเป็นแผ่น) โดยวางถุงอะลูมิเนียมซิปล็อคที่สารเคมีเกิดปฏิกิริยาในถุงแล้วลงบนแผ่นรัดขวดน้ำดื่ม วางขวดน้ำดื่มบนถุงแล้วพันรอบขวดน้ำดื่ม ดัดตีสันตึกแก็ให้แน่น	- พันทับถุงซิปล็อคได้ง่าย - ทำให้ถุงแนบสนิทกับขวดน้ำดื่มดีมาก	- ใช้ค่าใช้จ่ายรัดท้อป 3 ชั้น และค่าจ้างเย็บ

จากการพิจารณาทางเลือกในการเพิ่มการแนบสนิทของถุงซิปล็อคพบว่าวิธีที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ วิธีที่ 3 คือ ใช้แผ่นรัดขวดน้ำดื่ม โดยวางถุงอะลูมิเนียมซิปล็อคที่สารเคมีเกิดปฏิกิริยาในถุงแล้วลงบนแผ่นรัดขวดน้ำดื่ม วางขวดน้ำดื่มบนถุงแล้วพันรอบขวดน้ำดื่ม ดัดตีสันตึกแก็ให้แน่น เนื่องจากถึงแม้จะมีค่าใช้จ่ายรัดท้อปเพิ่มเป็น 3 ชั้น และมีค่าจ้างเย็บให้ติดกันเป็นแผ่น แต่ในการใช้งานยังคงพันทับถุงซิปล็อคได้ง่าย ที่สำคัญคือสามารถทำให้ถุงแนบสนิทกับขวดน้ำดื่มได้ดีมากตลอดทั้งความสูงของขวดน้ำดื่ม

5.3.3 จากผลการพิจารณาทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในข้อ 5.3.1 วิธีที่ 3 และข้อ 5.3.2 วิธีที่ 3 พัฒนาเป็นอุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่มจากปฏิกิริยาเคมี นำมาทำการทดลองการลดอุณหภูมิน้ำดื่มโดยเตรียมสารเคมีตามผลการทดลองในข้อ 5.2 การทดลองที่ 2 คือ $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 0.50 โมล ปริมาณ 157.74 กรัม กับ NH_4SCN จำนวน 1.00 โมล ปริมาณ 76.12 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมที่สุด ผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาที่อุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส ครั้งที่ 1, 2 และ 3 เท่ากับ 15, 14 และ 13 นาที ตามลำดับ ดังภาพที่ 9 เมื่อนำมาคำนวณค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.00 ± 1.00 นาที ดังแสดงในตารางที่ 5



ภาพที่ 9 อุปกรณ์น้ำดื่มและระยะเวลาที่อุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่มจากปฏิกิริยาเคมีที่พัฒนาขึ้น ใช้ในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่ลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียสของแต่ละวิธีการในการทดลอง

วิธีการในการทดลอง			ค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่ลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส (นาท)
1	น้ำแข็ง		37.00±1.00
2	Ba(OH) ₂ •8H ₂ O : NH ₄ SCN (กรัม)	78.87 : 38.06	>37*
		157.74 : 76.12	30.33±0.58
		236.61 : 114.18	n/a**
3	อุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่มจากปฏิกิริยาเคมี		14.00±1.00

หมายเหตุ : *ค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่สารเคมีลดอุณหภูมิน้ำดื่มมากกว่า 37 นาทแล้ว แต่ยังไม่สามารถลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียสได้ จึงยุติการทดลอง

**ปริมาณสารเคมีมีมากเกินไปที่จะบรรจุลงในถุงอะลูมิเนียมซีลล็อก ขนาด 8 x 12 นิ้ว ได้หมดจึงยุติการทดลอง

6. สรุปและอภิปรายผล

6.1 ศึกษาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาที่สั้นกว่าการใช้น้ำแข็ง

ผลการศึกษาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาที่สั้นกว่าการใช้น้ำแข็ง สรุปว่า การทดลองที่ 2 คือ Ba(OH)₂•8H₂O จำนวน 0.50 โมล ปริมาณ 157.74 กรัม ทำปฏิกิริยากับ NH₄SCN จำนวน 1.00 โมล ปริมาณ 76.12 กรัม มีค่าเฉลี่ยระยะเวลาลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียส เท่ากับ 30.33±0.58 นาท น้อยกว่าค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่น้ำแข็งลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เท่ากับ 15 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 37.00±1.00 นาท แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Ba(OH)₂•8H₂O กับ NH₄SCN ในอัตราส่วนโดยโมล เท่ากับ 1 : 2 สอดคล้องกับงานวิจัยของธนพล อามาตร และคณะ [9] สามารถดูดพลังงานความร้อนจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ระบบและนำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดอุณหภูมิน้ำดื่มโดยใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่าการใช้น้ำแข็งได้ แต่จะต้องเพิ่มปริมาณสารเคมีให้เหมาะสมกับขนาดของถุงอะลูมิเนียมซีลล็อก ขนาด 8 x 12 นิ้ว ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถพันรอบขวดน้ำดื่มขนาด 330 มิลลิลิตร ได้พอดี ซึ่งควรจะต้องมีการปรับทั้งขนาดของถุงและปริมาณสารเคมีเมื่อจะใช้ลดอุณหภูมิน้ำดื่มขนาดอื่น ๆ จึงจะมีประสิทธิภาพดี นอกจากปฏิกิริยาระหว่าง Ba(OH)₂•8H₂O กับ NH₄SCN ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนแล้ว

ปฏิกิริยาดูดความร้อนที่เกิดขึ้นจากสารเคมีอื่นยังมีความน่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้ได้เช่นเดียวกัน จากงานวิจัยของวรพล มณีดุลย์ และคณะ [10] ประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาระหว่าง Ba(OH)₂•8H₂O กับ NH₄NO₃ ซึ่งทำการวิจัยเรื่องการศึกษาสารเคมีเพื่อใช้ในแพคเกจความเย็นสำหรับภารกิจภาคสนามทางทหาร โดยพบว่า อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง Ba(OH)₂•8H₂O : NH₄NO₃ เท่ากับ 1 : 2 ปริมาณที่เหมาะสมคือ 0.10 : 0.20 โมล และเติม NaCl ปริมาณ 4 กรัม ให้อุณหภูมิเริ่มต้นต่ำที่สุดและระยะเวลานานที่สุด แต่ NH₄NO₃ ถูกกำหนดเป็นยุทธภัณฑ์ที่ต้องขออนุญาตตามประกาศกระทรวงกลาโหม ดังนั้นการจัดหามาใช้เพื่องานวิจัยอาจมีความยุ่งยากกว่าสารเคมีอื่น นอกจากนี้การใช้เกลือที่มีคุณสมบัติในการดูดความร้อนมาเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาเคมี ดังเช่นงานวิจัยของวรพล มณีดุลย์ และคณะ ใช้เกลือ NaCl [10] หรือ Park, D., et al. ใช้เกลือ KCl [11] หรือเกลืออื่นเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิ เป็นสิ่งที่น่าสนใจในการทำวิจัยต่อไป แต่จะต้องคำนึงถึงการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่พึงประสงค์กับสารเคมีที่ใช้หรือผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีด้วย

6.2 การออกแบบและพัฒนาวิธีการและอุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่มจากปฏิกิริยาเคมีเพื่อใช้ในการฝึกภาคสนาม

ผลการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่มจากปฏิกิริยาเคมีเพื่อใช้ในการฝึกภาคสนาม

สรุปว่า วิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหา 2 ประการ คือ การแก้ปัญหาแก๊สแอมโมเนียที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีซึ่งยังคงตกค้างอยู่ในถุงซิปล็อควิธีที่เหมาะสมที่สุดคือวิธีที่ 3 และ การแก้ปัญหาการเนบสนิทของถุงซิปล็อคกับขวดน้ำดื่มวิธีที่เหมาะสมที่สุดคือวิธีที่ 3 เมื่อทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์โดยใช้สารเคมีปริมาณที่เหมาะสมพบว่า ระยะเวลาเฉลี่ยที่อุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่มให้เหลือ 15 องศาเซลเซียสเท่ากับ 14.00 ± 1.00 นาที ซึ่งน้อยกว่าน้ำแข็งและสารเคมีที่มีค่าเฉลี่ยระยะเวลาเท่ากับ 37.00 ± 1.00 และ 30.33 ± 0.58 นาที ตามลำดับ งานวิจัยนี้เลือกใช้รูปแบบแพคเกจความเย็นจากงานวิจัยของธนพล อามาตร และคณะ [9] และของ วรพล มณีดุลย์ และคณะ [10] นำมาต่อยอดออกแบบและพัฒนาแบบให้มีความเหมาะสมกับการลดอุณหภูมิน้ำดื่ม สามารถสรุปรูปแบบการเตรียมและใช้งานอุปกรณ์ได้ดังนี้ การเตรียมอุปกรณ์โดยใส่แบเรียมไฮดรอกไซด์ ออกตะไฮเดรตปริมาณ 157.74 กรัม ลงในถุงอะลูมิเนียมซิปล็อค ขนาด 8×12 นิ้ว ใส่คลิปลาสติก 1 อัน ไว้ที่กลางถุงอะลูมิเนียมซิปล็อคเหนือสารเคมี เติมแอมโมเนียมาไทโอไซยาเนต ปริมาณ 76.12 กรัม ลงในถุงอะลูมิเนียมซิปล็อคเหนือคลิปลาสติก ใส่คลิปลาสติกอีก 1 อัน ตรงปากถุงใต้ซิปล็อค ปิดซิปล็อคโดยเปิดซิปล็อคเว้นไว้เป็นช่องเล็ก ๆ เมื่อต้องการใช้งานอุปกรณ์ให้ดึงคลิปลาสติกที่กลางถุงออก เขย่าถุงจนสารเคมีผสมกัน ดึงคลิปลาสติกที่ปากถุงออกเล็กน้อยให้พอดีกับช่องซิปล็อคที่เปิดไว้ ใส่แก๊สแอมโมเนียออกจากถุงแล้วปิดคลิปลาสติกและซิปล็อค วางถุงลงบนแผ่นรัดขวดน้ำดื่มวางขวดน้ำดื่มบนถุงแล้วพันรอบขวดน้ำดื่ม ดัดติดกันแน่น ซึ่งในการใช้งานจริงในภาคสนามจะทำคำอธิบายพร้อมภาพประกอบเพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น

สำหรับการออกแบบและพัฒนาในงานวิจัยนี้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์โดยการประยุกต์ใช้อุปกรณ์และวิธีการที่ทำได้โดยทั่วไปและไม่ซับซ้อน ซึ่งยังมีอุปกรณ์และวิธีการอื่นที่น่าสนใจในการทำวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ต่อไป เช่น การใช้ one way valve หรือการออกแบบบรรจุภัณฑ์รูปแบบอื่น เพื่อให้เกิดความ

สะดวกในการใช้งานเพิ่มมากขึ้น และที่สำคัญคือความปลอดภัยจากการรั่วไหลของสารเคมี

ถึงแม้ว่าการนำสารเคมีมาประยุกต์ใช้ต้องมีความระมัดระวังเป็นอย่างสูงทั้งในส่วนของการเตรียมสารเคมีและอุปกรณ์ ในส่วนการใช้งาน ในส่วนการเก็บรักษาและการกำจัดอย่างถูกต้องเพื่อให้เกิดความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพตามที่ต้องการ ดังนั้นต้องมีการทำเอกสารประกอบอุปกรณ์เป็นข้อเสนอแนะแนวทางปฏิบัติในการใช้งานจริงในภาคสนามเกี่ยวกับการใช้สารเคมีเพื่อลดความเสี่ยงและให้เกิดความปลอดภัย แต่ผลการวิจัยในครั้งนี้เป็นการจุดประกายให้เห็นว่าปฏิกิริยาเคมีสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบและพัฒนาเป็นอุปกรณ์ลดอุณหภูมิน้ำดื่มโดยใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่าการใช้น้ำแข็งได้ ซึ่งนอกจากจะพัฒนาเพื่อใช้ในการฝึกภาคสนามแล้ว ยังสามารถนำอุปกรณ์ไปใช้ลดอุณหภูมิน้ำดื่มสำหรับกิจกรรมที่ใช้พลกำลังอื่น ๆ นอกเหนือจากงานภาคสนาม เช่น การออกกำลังกาย เดินป่า ซ้อมหรือแข่งขันกีฬา หรือเพื่อประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในทางอื่น ๆ เช่น การประคบเย็นเพื่อลดอาการเจ็บปวด การเก็บรักษาหรือยืดอายุอาหาร ยา หรือนมผงเช่นงานวิจัยของ ศิริลักษณ์ ถาวรวิวัฒน์ และคณะ [12] เป็นต้น ดังนั้นควรมีการศึกษาปฏิกิริยาเคมีหรือสารเคมีอื่น ๆ ที่นอกจากจะนำมาประยุกต์ใช้ในการลดอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นแล้ว ยังมีความเป็นพิษต่ำ ราคาถูก และสามารถหาซื้อได้โดยทั่วไป ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์มีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณกองทุนพัฒนาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ที่สนับสนุนเงินทุนวิจัย ขอขอบคุณคณาจารย์และกำลังพลกองวิชาเคมี ส่วนการศึกษาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาในด้านต่าง ๆ ขอขอบคุณคณะกรรมการประเมินโครงการวิจัยทุกท่านที่พิจารณากลั่นกรองและให้คำแนะนำงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

8. บรรณานุกรม

- [1] Jiraporn, P. (n.d.). ต้มน้ำเย็น เป็นอันตราย จริงหรือไม่. คลังความรู้. SciMath. Retrieved February 20, 2022, from <https://www.scimath.org/article-science/item/4754-2015-08-16-14-08-13>
- [2] Hosseinlou, A. (2013). The effect of water temperature and voluntary drinking on the post-rehydration sweating. ASTV ผู้จัดการสุดสัปดาห์, 14-20 พฤศจิกายน 2015.
- [3] ณัฐกร ทองนพเก้า. (n.d.). น้ำเย็น ประโยชน์ที่มากกว่าแค่ความสดชื่น. STADIUM. Retrieved February 20, 2022, from <https://stadiumth.com/columns/detail?id=706&tab=thai>
- [4] มานพ พรหมณโชติ, และอานวย อรุณรุ่งอารีย์. (2543). เคมีทั่วไป 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [5] พยารั ยินดีสุข. (n.d.). ปฏิกริยาเคมี. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. Retrieved April 5, 2021, from <https://curadio.chula.ac.th/Images/Class-Onair/sc/2009/sc-2009-08-02.pdf>
- [6] Purdue University. (n.d.). Endothermic reactions. Retrieved April 5, 2021, from https://chemed.chem.purdue.edu/demos/main_pages/5.1.html
- [7] Merck. (n.d.). เอกสารข้อมูลความปลอดภัย ฉบับที่ 8.6. Retrieved January 14, 2025, from <https://www.sigmaaldrich.com/TH/en/search/12230-71-6>
- [8] Merck. (n.d.). เอกสารข้อมูลความปลอดภัย ฉบับที่ 8.9. Retrieved January 14, 2025, from <https://www.sigmaaldrich.com/TH/en/search/12230-71-6>
- [9] ธนพล อามาตร และคณะ. (2556). การพัฒนาแพคเกจให้ความเย็นแบบพกพาจากปฏิกริยาเคมีเพื่อใช้ในการปฐมพยาบาลเบื้องต้น. รายงานการวิจัยโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า.
- [10] วรพล มณีดุลย์ และคณะ. (2557). การศึกษาสารเคมีเพื่อใช้ในแพคเกจความเย็นสำหรับภารกิจภาคสนามทางทหาร. รายงานการวิจัยโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า.
- [11] Park, D., Hayatina, I., Farid, M., & Auckaili, A. (2023). Experimental work on salt-based cooling systems. Thermo, 3(1), 200–215. from <https://doi.org/10.3390/thermo3010012>
- [12] ศิริลักษณ์ ถาวรวงษ์ และคณะ. (2548). การพัฒนารูปแบบก้อนทำความเย็น (น้ำแข็งแห้ง) กับการรักษาความเย็นในภาชนะสำหรับเก็บน้ำนมเพื่อรักษาคุณภาพน้ำนมแม่. รายงานวิจัยนมแม่, ศูนย์นมแม่แห่งประเทศไทย, 1-16.

การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนและแนวทางการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว กลับมาใช้ใหม่: กรณีศึกษาเมืองพัทยา

Evaluation of the efficiency of domestic wastewater treatment and guidelines for reusing treated wastewater: A case study of Pattaya City

วรพต พงษ์पालี¹, อภิเสฏฐกร สุวรรณสะอาด^{2*}, มณีรัตน์ เข้มขาว^{1*}

Woraphot Phongphalee¹, Apisedkorn Suwansaard^{2*}, Maneerat Khemkhao^{1*}

¹วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ นครปฐม
73170 ประเทศไทย

¹Rattanakosin College for Sustainable Energy and Environment,
Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Nakhon Pathom 73170, Thailand

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ นครปฐม 73170 ประเทศไทย

²Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Nakhon Pathom
73170, Thailand

*Corresponding Author. E-mail : maneerat.khe@rmutr.ac.th, apised.suw@rmutr.ac.th

(Received: June 14, 2025, Revised: July 14, 2025, Accepted: July 22, 2025)

บทคัดย่อ: พัทยาเมืองท่องเที่ยวที่มีชื่อเสียงระดับโลกของประเทศไทย แต่ละปีมีน้ำเสียชุมชนไม่น้อยกว่า 28.57 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ที่ต้องเข้าสู่ระบบบำบัด งานวิจัยนี้เป็นการประเมินประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียชุมชนและการเสนอวิธีการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดไปใช้ประโยชน์ โดยอาศัยข้อมูลผลการดำเนินงานของการบำบัดน้ำเสียตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561-2566 และนโยบายและการบริหารจัดการน้ำภายใต้หลักการอนุรักษ์น้ำที่ยั่งยืน ผลการประเมินพบว่าโรงบำบัดน้ำเสียที่ 1 (ซอยหนองใหญ่) และโรงบำบัดน้ำเสียที่ 2 (ซอยวัดบุญญ์กัญจนาราม) รับน้ำเสียกว่า 22.95 และ 5.62 ล้านลูกบาศก์เมตร/ปี ตามลำดับ มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบน้ำเสยรวมชุมชน โดยสามารถกำจัดซีโอดี (Chemical oxygen demand) ได้เฉลี่ยร้อยละ 54.81 - 69.36 บีโอดี (Biochemical oxygen demand) เฉลี่ยร้อยละ 63.56 - 82.27 และไนโตรเจนและสารอินทรีย์ไนโตรเจน (total Kjeldahl nitrogen) เฉลี่ยร้อยละ 81.07 - 89.28 น้ำที่ผ่านการบำบัดไม่ว่าจะเป็นการบำบัดโดยตรง หรือผ่านขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายทาง เช่น การรดน้ำต้นไม้ในเมือง การใช้น้ำเพื่อการเกษตร การจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ให้แก่เกษตรกรหรือเพื่อการผลิตน้ำใช้ในภาวะขาดแคลนน้ำจืด เป็นการใช้ประโยชน์ที่มีประสิทธิภาพและทำให้น้ำใช้ได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: น้ำเสียชุมชน เมืองพัทยา โรงบำบัดน้ำเสีย การบริหารจัดการน้ำ

Abstract: Pattaya, a famous tourist city in Thailand, has more than 28.57 million cubic meters of

community wastewater per year entering the wastewater treatment system. This study is an evaluation of the efficiency of domestic wastewater treatment and how to utilize treated water based on data on wastewater treatment results from 2018–2023, as well as water policies and management under the principles of sustainable water conservation. The evaluation results indicate that wastewater treatment plant 1 (Soi Nong Yai) and plant 2 (Soi Wat Bun Kanchanaram) receive more than 22.95 and 5.62 million cubic meters of wastewater per year, respectively. They are efficient in treating wastewater to meet the standards controlling the discharge of wastewater from the domestic wastewater system. The average removal efficiency of chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD), and total Kjeldahl nitrogen (TKN) was 54.81 - 69.36%, 63.56 - 82.27%, and 81.07 - 89.28%, respectively. Wastewater, after treatment directly or through processes that improve water quality, can be used in many ways—such as for watering trees in the city, agricultural purposes, commercial sales to industrial estates, or producing water during freshwater shortages—is an efficient way to utilize water and ensures sustainable availability.

Keywords: Domestic wastewater, Pattaya City, Wastewater treatment plant, Water management

1. บทนำ

น้ำเป็นทรัพยากรที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่ง ในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต และจำเป็นต่อการส่งเสริมการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ การเพิ่มขึ้นของประชากร ความต้องการในการใช้น้ำของภาคอุตสาหกรรมและภาคการเกษตร และผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ล้วนส่งผลให้เกิดความต้องการในการใช้น้ำในปริมาณที่มากขึ้น [1] ซึ่งการตระหนักรู้ถึงความจำเป็นเร่งด่วนในการอนุรักษ์น้ำผ่านการจัดการน้ำมีความจำเป็นในทุกขั้นตอน ได้แก่ การจัดหาแหล่งน้ำ การปรับปรุงคุณภาพน้ำ การแจกจ่าย การรวบรวมน้ำเสีย การบำบัด และการใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว ส่งผลต่อการมีน้ำใช้อย่างยั่งยืน [2]

ในแต่ละปีปริมาณน้ำเสียชุมชนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการเติบโตของจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น และการพัฒนาทางเศรษฐกิจ ทำให้มีปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดเพิ่มสูงขึ้นด้วย ในพื้นที่ที่มีทรัพยากรน้ำจำกัด และมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น [3] แม้ว่าน้ำเสียชุมชนจัดเป็นน้ำเสียประเภทที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ต่ำ แต่จำเป็นต้องได้รับการบำบัดด้วยระบบที่มีประสิทธิภาพก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม [4] ซึ่งใน

ประเทศไทยระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบรวมศูนย์ที่ใช้ อยู่ได้แก่ ระบบบำบัดบ่อผึ่ง 23 แห่ง สระเติมอากาศ 14 แห่ง ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง 5 แห่ง ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง ประเภทคลองวนเวียน 18 แห่ง แบบบึงประดิษฐ์ 2 แห่ง แบบผสมผสานระหว่างบ่อผึ่งกับบึงประดิษฐ์ 3 แห่ง และระบบบำบัดน้ำเสียแบบจานหมุนชีวภาพ 1 แห่ง [5-7]

การนำน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ เป็นวิธีแก้ปัญหายั่งยืนและมีประสิทธิภาพอย่างมาก [3] ในปัจจุบันทั่วโลกมีการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่กันอย่างแพร่หลาย เช่น ใช้เพื่อการเกษตร การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ การทำความสะอาด ใช้ในภาคอุตสาหกรรม และการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพิ่มเติมเพื่อการบริโภค [8-13] อย่างไรก็ตาม การนำน้ำผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ มีสิ่งที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ ปริมาณน้ำ คุณภาพน้ำ มาตรฐานของน้ำ การปรับปรุงคุณภาพน้ำ ระยะทางในการขนส่งน้ำ ค่าใช้จ่าย ความไว้วางใจและการรับรู้ของประชาชน [2]

พัทยาเป็นเมืองท่องเที่ยวที่มีชื่อเสียงของประเทศไทย ทำให้แต่ละปีมีนักท่องเที่ยวจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดน้ำเสียชุมชนไม่น้อยกว่า 28.57 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี ระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนของเมืองพัทยาคือ

โรงบำบัดน้ำเสียแบบรวมศูนย์ จำนวน 2 แห่ง คือ โรงบำบัดน้ำเสียที่ 1 ชื่อว่า โรงบำบัดน้ำเสียเมืองพัทยา ตั้งอยู่ที่ซอยหนองใหญ่รับน้ำเสียจากพื้นที่พัทยาและนาเกลือ และโรงบำบัดน้ำเสียที่ 2 ชื่อว่า โรงบำบัดน้ำเสียซอยวัดบุญญ์กัญจนาราม ตั้งอยู่ที่ซอยวัดบุญญ์กัญจนาราม รับน้ำเสียจากพื้นที่จอมเทียน น้ำที่ผ่านการบำบัดเหล่านี้หากปล่อยลงสู่ทะเลโดยตรงอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำชายฝั่งและสิ่งแวดล้อมในทะเล [14]

2. วัตถุประสงค์

การประเมินประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียชุมชนและและเสนอวิธีการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดในพื้นที่พัทยาไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการน้ำภายใต้หลักการอนุรักษ์น้ำที่ยั่งยืนต่อไปในอนาคต

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ข้อมูลเมืองพัทยาเบื้องต้น

เมืองพัทยา (ภาพที่ 1) ตั้งอยู่ทางภาคตะวันออก บริเวณเส้นรุ้งที่ 13° เหนือ และเส้นแวงที่ 101° ตะวันออก อยู่ในท้องที่อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี อยู่ห่างจากกรุงเทพมหานคร ประมาณ 150 กม. ทิศเหนือติดกับเขตเทศบาลตำบลบางละมุง ทิศใต้ติดกับเขตเทศบาลตำบลห้วยใหญ่ ทิศตะวันออกขนานกับถนนสุขุมวิทติดกับเทศบาลตำบลหนองปลาไหลและทิศตะวันตกขนานกับแนวชายฝั่งทะเลไทย มีความยาวตลอดแนวชายหาด 15 กม.



ภาพที่ 1 แผนที่เมืองพัทยา [16]

เมืองพัทยามีพื้นที่ทั้งหมด 208.10 ตร.กม. เป็นพื้นดิน 53.44 ตร.กม. พื้นน้ำ 154.66 ตร.กม. ประกอบด้วย 4 ตำบล คือ ตำบลนาเกลือรวมเกาะล้าน ตำบลหนองปรือ ตำบลห้วยใหญ่ และตำบลหนองปลาไหล มีประชากรตามทะเบียนราษฎรทั้งสิ้น 119,532 คน โดยพัทยาแบ่งเป็น 4 ส่วนได้แก่ พัทยาเหนือ พัทยากลาง พัทยาใต้ และหาดจอมเทียนชายหาดพัทยา [15]

3.2 การจัดการน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียเมืองพัทยา

เมืองพัทยามีโรงบำบัดน้ำเสีย 2 แห่ง คือ โรงบำบัดน้ำเสียที่ 1 ตั้งอยู่ที่ซอยหนองใหญ่ เลขที่ 171 หมู่ 6 ซ.หนองใหญ่ ต.หนองปรือ อ.บางละมุง จ.ชลบุรี รับน้ำเสียจากพื้นที่นาเกลือ พัทยาเหนือ พัทยากลาง และพัทยาใต้บางส่วน มีพื้นที่ 80 ไร่ ที่มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียชุมชน 65,000 ลบ.ม./วัน เป็นระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge)

ส่วนโรงบำบัดน้ำเสียที่ 2 ตั้งอยู่ที่ซอยวัดบุญญ์กัญจนาราม เลขที่ 391 หมู่ 12 ถ.บุญญ์กัญจนาราม ต.หนองปรือ อ.บางละมุง จ.ชลบุรี รับน้ำเสียจากพื้นที่เขตจอมเทียน

และพื้ยาใต้บางส่วน มีพื้นที่ 13 ไร่ ความสามารถบำบัดน้ำเสียชุมชนได้ 43,000 ลบ.ม./วัน เป็นระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) แบบ Step feed NBR เป็นการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ถังเติมอากาศเป็นจุด ๆ (Step feed) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด และมีการควบคุมปริมาณไนโตรเจน (NBR: Nitrogen removal) ในระบบ

3.3 ระบบรวบรวมน้ำเสียเมืองพื้ยา

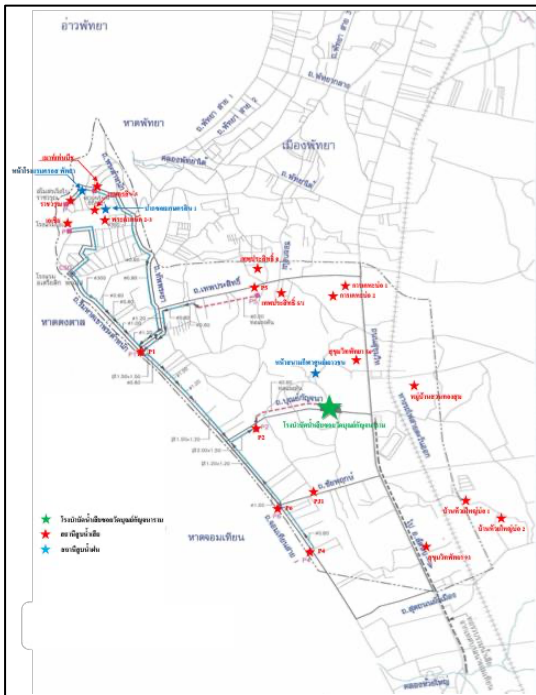
ระบบรวบรวมน้ำเสียที่เมืองพื้ยาใช้ประกอบด้วยท่อดักน้ำเสีย ท่อส่งน้ำเสีย และสถานีสูบน้ำ ทำหน้าที่รวบรวมน้ำเสียส่งไปบำบัด โดยมีสถานีสูบน้ำในพื้นที่พื้ยาและนาเกลือ 38 แห่ง (ภาพที่ 2) และพื้นที่จอมเทียน 20 แห่ง (ภาพที่ 3) ระบบท่อสูบน้ำที่สถานีสูบน้ำระบายน้ำเพื่อป้องกันน้ำท่วม 15 แห่ง อ่างชะลอน้ำ 1 แห่ง และอาคารผันน้ำพื้นที่พื้ยาและนาเกลือ 2 แห่ง พื้นที่จอมเทียน 8 แห่ง และประตูละบายน้ำฝน 4 อาคาร ดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3

ท่อดักน้ำเสียย่อยจะกระจายออกไปรับน้ำเสียที่ถูกผันออกมาจากอาคารดักน้ำเสียในบริเวณต่าง ๆ เพื่อรวบรวมเข้าสู่โรงบำบัดน้ำเสียแต่ละแห่ง การไหลในท่อดักน้ำเสียจะเป็นการไหลโดยแรงโน้มถ่วงของโลก แต่เมื่อท่อดักน้ำเสียมีระดับต่ำเกินไป จะมีสถานีสูบน้ำเสียเพื่อทำการยกกระตบน้ำให้สูงขึ้น และสามารถระบายน้ำโดยแรงโน้มถ่วงของโลกต่อไปได้



ภาพที่ 2 ตำแหน่งสถานีสูบน้ำของนาเกลือและพื้ยา [16]

ระบบระบายน้ำ เป็นระบบระบายน้ำแบบรวม (Combine system) ทำหน้าที่รวบรวมน้ำเสียจากแหล่งกำเนิดน้ำเสียต่าง ๆ และน้ำฝนที่ตกในพื้นที่เพื่อระบายลงสู่ทางน้ำธรรมชาติ โดยมีอาคารดักน้ำเสีย (Combine sewer overflow structure, CSO) ติดตั้งอยู่ที่ปลายทางน้ำของระบบระบายน้ำทำหน้าที่แยกน้ำฝนออกจากน้ำเสีย เพื่อแยกเฉพาะปริมาณน้ำที่กำหนด ส่งไปบำบัดที่โรงบำบัดน้ำเสียของเมืองพื้ยาแต่ละแห่ง



ภาพที่ 3 ตำแหน่งสถานีสูบน้ำของจอมเทียนและพัตยาใต้บางส่วน [16]

3.4 การบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียเมืองพัตยา

เมื่อน้ำเสียจากระบบรวบรวมน้ำเสียเข้าสู่โรงบำบัดน้ำเสียเมืองพัตยา น้ำเสียจะผ่านเข้าสู่ถังตกทรายแบบน้ำวน (Vortex grit chamber) เพื่อแยกกรวดทรายออก และตะกอนตกขยะละเอียด แบบ Rotary drum screen จากนั้นเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบตะกอนเร่ง ซึ่งประกอบด้วยถังเติมอากาศและถังตกตะกอน โดยน้ำเสียถูกส่งเข้าถังเติมอากาศที่มีตะกอนเร่งอยู่เป็นจำนวนมากทำหน้าที่กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียในรูปแบบต่างๆ ด้วยการย่อยสลายให้อยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ น้ำเสียที่ถูกบำบัดแล้วจากถังเติมอากาศจะไหลต่อไปยังถังตกตะกอน เพื่อแยกตะกอนจุลินทรีย์ออกจากน้ำใส ตะกอนที่แยกตัวอยู่กันถังตกตะกอนส่วนหนึ่งจะถูกสูบกลับไปเข้าถังเติมอากาศ เพื่อลดมวลสารที่เข้ามาใหม่ ส่วนน้ำที่ผ่านการบำบัดจะส่งต่อไปที่บ่อเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคก่อนระบายน้ำที่บำบัดแล้วสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

4. วิธีดำเนินการศึกษา

4.1 รูปแบบการวิจัย เป็นการวิจัยเชิงคุณภาพ ลงพื้นที่เพื่อโดยการสอบถามจากผู้ที่เกี่ยวข้องโดยตรงเพื่อ

เก็บรวบรวมข้อมูลจากสำนักงานการช่างสุขาภิบาลเมืองพัตยา ทั้งในส่วนจัดการระบบป้องกันและระบายน้ำ และส่วนจัดการคุณภาพน้ำ ประกอบไปด้วยฝ่ายบริหาร 5 คน ข้าราชการและลูกจ้าง 10 คน และผู้ดูแลระบบบำบัดน้ำเสียและป้องกันน้ำท่วมที่ได้รับว่าจ้างจากเมืองพัตยา 10 คน

4.2 แหล่งข้อมูลปฐมภูมิ คือ มุมมองและความคิดเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียชุมชนเมืองพัตยา นโยบายและการบริหารจัดการน้ำของผู้ปฏิบัติงานจากสำนักงานการช่างสุขาภิบาลเมืองพัตยาและผู้ดูแลระบบบำบัดน้ำเสียที่ได้รับว่าจ้างจากเมืองพัตยา

4.3 แหล่งข้อมูลทุติยภูมิ คือ ข้อมูลจากรายงานผลการดำเนินงานของการบำบัดน้ำเสีย ในปี 2561–2566 จากฝ่ายวิเคราะห์คุณภาพน้ำและควบคุมมลพิษที่สุ่มเก็บตัวอย่าง และจากผู้ดูแลระบบบำบัดน้ำเสียที่ได้รับว่าจ้างจากเมืองพัตยาที่เก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ทุกวัน

4.4 ทำการรวบรวมข้อมูลการดำเนินงานจากโรงบำบัดน้ำเสียเมืองพัตยา 2 แห่ง คือ โรงบำบัดน้ำเสียที่ 1 และโรงบำบัดน้ำเสียที่ 2 โดยปริมาณน้ำเสียเข้ารายวันจะถูกนำไปคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยรายเดือนเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียทั้งสองแห่ง ส่วนคุณภาพน้ำเสียขาเข้าและขาออกรายวันจะถูกนำมาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยรายเดือนเพื่อนำมาประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงธันวาคม ปี พ.ศ. 2561 – 2566

ปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบของโรงบำบัดน้ำเสีย และพารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biochemical oxygen demand, BOD) ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical oxygen demand, COD) ปริมาณไนโตรเจนและสารอินทรีย์ไนโตรเจน (Total Kjeldahl nitrogen, TKN) ค่าของแข็งแขวนลอย (Suspended solid, SS) ค่าของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (Total dissolved solid, TDS) ค่าพีเอช อุณหภูมิ ฟอสเฟต และไนเตรต-ไนโตรเจน ซึ่งวิธีการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์คุณภาพของน้ำทั้ง เป็นไปตามวิธี Standard methods for the examination of water

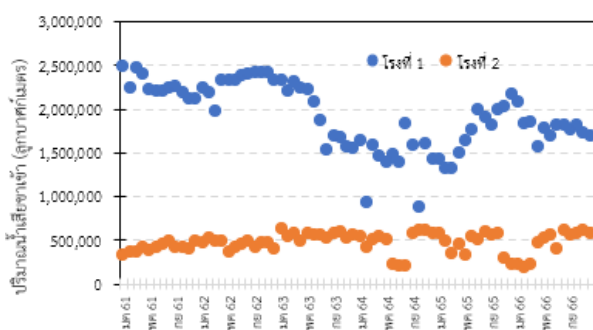
and wastewater ของ American Public Health Association, American Water Work Association และ Water Environment Federation ร่วมกันกำหนดไว้

5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

5.1 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชน

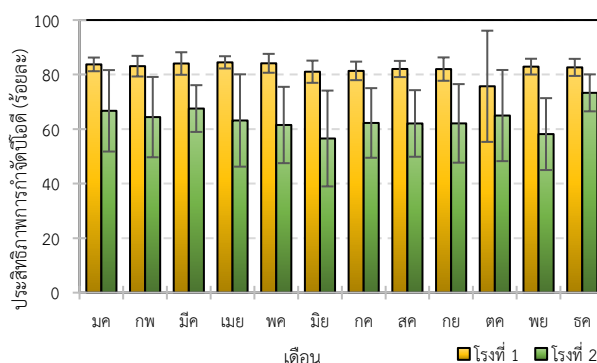
ปริมาณการรับน้ำเสียรายเดือน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561–2566 ของโรงบำบัดน้ำเสียทั้ง 2 แห่ง แสดงดังภาพที่ 4 พบว่า ปริมาณน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียที่ 1 แปรผันโดยตรงกับกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการกับท่องเที่ยว ธุรกิจโรงแรม ที่พัก และร้านอาหาร ในช่วงก่อนเกิดสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา (COVID 2019) ปริมาณน้ำเสียที่เข้าโรงบำบัดน้ำเสียที่ 1 มีปริมาณสูงเกิน 2,000,000 ลูกบาศก์เมตร แต่เมื่อเกิดสถานการณ์ระบาด ปริมาณน้ำเสียเข้าลดลงอยู่ในช่วงประมาณ 1,500,000 ลูกบาศก์เมตร และหลังจากสถานการณ์การระบาดเริ่มคลี่คลายปริมาณน้ำเสียเริ่มเพิ่มขึ้น โดยปี 2561–2562 มีนักท่องเที่ยวเมืองพัทยาประมาณ 13.8–14.1 ล้านคน [17] ส่วนปี 2563 และ 2564 เป็นช่วงสถานการณ์ระบาด มีนักท่องเที่ยวเข้ามาในจังหวัดชลบุรีประมาณ 6.9 ล้านคน [18] ปี 2564 มีนักท่องเที่ยวเมืองพัทยาประมาณ 1.9 ล้านคน ส่วนปี 2565 เพิ่มขึ้นมาประมาณ 8.9 ล้านคน [19] และในปี 2566 มีจำนวนเพิ่มขึ้นเป็น 23.3 ล้านคน [20]

ในขณะที่ปริมาณน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียที่ 2 ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตามสถานการณ์การแพร่ระบาด แต่ปริมาณน้ำเสียมีแนวโน้มค่อยๆ เพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี ซึ่งปริมาณน้ำเสียยังอยู่ระดับที่โรงบำบัดน้ำเสียสามารถรองรับได้



ภาพที่ 4 ปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่โรงบำบัดน้ำเสีย ตั้งแต่ปี 2561–2566

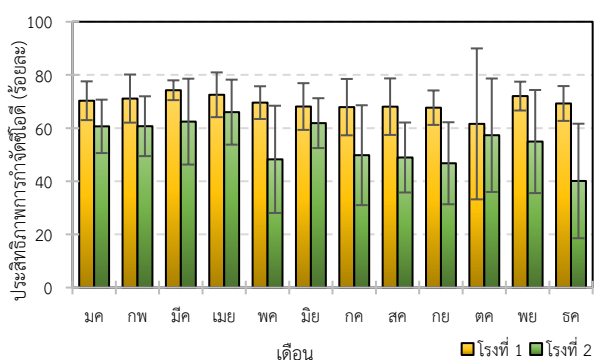
ประสิทธิภาพการกำจัดค่าบีโอดีแสดงในภาพที่ 5 พบว่า โรงบำบัดน้ำเสียที่ 1 สามารถกำจัดบีโอดีได้สูงกว่าร้อยละ 80 และสามารถกำจัดได้ดีกว่าโรงบำบัดน้ำเสียที่ 2 เฉลี่ยร้อยละ 22.69 น้ำเสียจากพื้นที่พทยาและนาเกลือมีปริมาณมากกว่าและมีความสกปรกสูงกว่าพื้นที่จอมเทียนซึ่งค่าบีโอดีขาเข้าของโรงบำบัดน้ำเสียที่ 1 มีค่าเฉลี่ย 71.32 ± 5.23 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าสูงกว่าโรงบำบัดน้ำเสียที่ 2 โดยมีค่าเฉลี่ยแค่ 25.50 ± 4.35 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าบีโอดีที่ผ่านการบำบัดจากโรงบำบัดน้ำเสียทั้งสองแห่งผ่านค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากระบบน้ำเสียรวมชุมชน (ตารางที่ 1)



ภาพที่ 5 ประสิทธิภาพการกำจัดค่า BOD ตั้งแต่ปี 2561–2566

ภาพที่ 6 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี พบว่า โรงบำบัดน้ำเสียที่ 1 มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้ดีกว่าโรงบำบัดน้ำเสียที่ 2 อยู่ร้อยละ 20.95 เนื่องจากโรงบำบัดน้ำเสียที่ 1 ใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แขวนลอยได้ดี ส่งผลให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้เต็มที่และรวดเร็วกว่า ขณะที่โรงบำบัดน้ำเสียที่ 2 ใช้ระบบ Step Feed NBR เป็นการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบเป็นช่วง ๆ

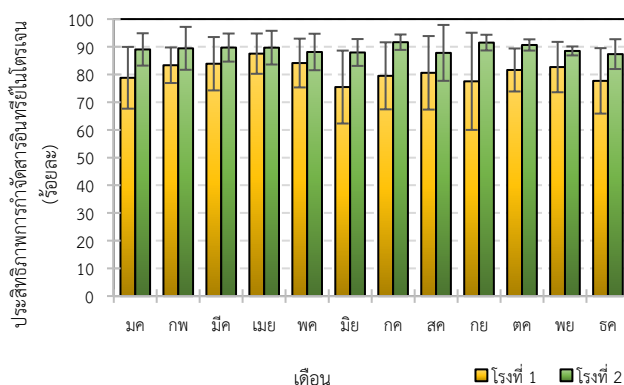
ซึ่งโรงบำบัดน้ำเสียทั้งสองแห่งมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีต่ำกว่าบีโอดี เนื่องจากซีโอดีเป็นการวัดปริมาณสารทั้งหมดที่ต้องใช้ในการออกซิเดชัน ส่วนบีโอดีเป็นการวัดเฉพาะปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งการกำจัดสารที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการกำจัดสารที่ไม่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ



ภาพที่ 6 ประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD ตั้งแต่ปี 2561-2566

ประสิทธิภาพการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดแสดงในภาพที่ 7 จะเห็นได้ว่าโรงบำบัดน้ำเสียที่ 2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดไนโตรเจนทั้งหมดได้ดีกว่าโรงบำบัดน้ำเสียที่ 1 ทุกเดือน โดยมีการกำจัดสูงกว่าที่เฉลี่ยร้อยละ 11.06 เนื่องจากโรงบำบัดน้ำเสียที่ 2 เป็นระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge) แบบ Step feed NBR เป็นกระบวนการเพื่อกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจนออกจากน้ำเสีย โดยใช้หลักการทำงานร่วมกันระหว่างไร้ออกซิเจน (Anaerobic) ใช้ออกซิเจน (Anoxic) และใช้ออกซิเจน (Aerobic) ด้วยการแบ่งออกเป็นถังย่อย ๆ และทำให้เกิดสภาวะที่จุลินทรีย์สามารถกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกจากน้ำได้โดยการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ให้เจริญเติบโตลอยอยู่ในน้ำ (Suspended growth) ภายในถังปฏิกรณ์มี

ทั้งส่วนที่เป็น Anoxic และ Aerobic น้ำที่ผ่านกระบวนการ Nitrification จากส่วนที่เป็น Aerobic จะหมุนเวียนกลับไปในส่วน Anoxic ซึ่งจะเกิด Denitrification เพื่อให้จุลินทรีย์ใช้ออกซิเจนจากไนไตรท์ (NO_2) และไนเตรต (NO_3) และปล่อยก๊าซไนโตรเจนสู่บรรยากาศต่อไป



ภาพที่ 7 ประสิทธิภาพการกำจัดค่า TKN ตั้งแต่ปี 2561-2566

โรงบำบัดน้ำเสียที่ 1 และ 2 สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยได้เฉลี่ยร้อยละ 69.38 และ 70.45 ตามลำดับ น้ำที่ผ่านการบำบัดเรียบร้อยแล้วจะมีค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำของทั้งสองแห่งอยู่ที่ 6.32-6.33 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดไว้มากกว่าหรือเท่ากับ 5 (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ปริมาณน้ำเสียและคุณลักษณะของน้ำเสียเฉลี่ยที่เข้าสู่โรงบำบัดน้ำเสียเมืองพัทยาและคุณภาพทิ้งที่ผ่านการบำบัด ตั้งแต่ปี 2561-2566

พารามิเตอร์	โรงบำบัดน้ำเสียที่ 1		โรงบำบัดน้ำเสียที่ 2		มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบน้ำเสียรวมชุมชน [21]
	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	
อัตราน้ำเข้า (ลบ.ม./วัน)	54,337.30 $\pm$ 3,765.37		15,358.28 $\pm$ 2,307.84		n/a
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	28.24 $\pm$ 1.32	n/a	28.17 $\pm$ 1.23	29.72 $\pm$ 0.89	n/a
พีเอช	7.25 $\pm$ 0.26	7.23 $\pm$ 0.29	7.26 $\pm$ 0.23	7.26 $\pm$ 0.28	5-9
บีโอดี (มก./ล.)	71.32 $\pm$ 5.23	11.42 $\pm$ 1.38	25.50 $\pm$ 4.35	8.66 $\pm$ 0.59	$\leq$ 20
ซีโอดี (มก./ล.)	87.74 $\pm$ 14.28	26.65 $\pm$ 3.99	91.38 $\pm$ 20.71	38.86 $\pm$ 5.83	n/a
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	38.37 $\pm$ 11.65	11.75 $\pm$ 3.31	39.05 $\pm$ 10.88	11.54 $\pm$ 3.39	$\leq$ 30
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มก./ล.)	n/a	n/a	792.19 $\pm$ 337.23	987.00 $\pm$ 290.52	n/a
ออกซิเจนละลายน้ำ (มก./ล.)	n/a	6.32 $\pm$ 1.15		6.33 $\pm$ 1.17	$\geq$ 5
ฟอสเฟต (มก./ล.)	n/a	n/a	1.37 $\pm$ 0.53	1.29 $\pm$ 0.39	$<$ 2
ไนเตรต-ไนโตรเจน (มก./ล.)	0.83 $\pm$ 0.17	4.91 $\pm$ 0.62	0.69 $\pm$ 0.21	1.57 $\pm$ 0.18	n/a
ไนโตรเจนทั้งหมด (มก./ล.)	13.46 $\pm$ 2.93	2.35 $\pm$ 0.73	21.74 $\pm$ 1.28	2.37 $\pm$ 0.65	$\leq$ 10

5.2 การจัดการน้ำที่ผ่านการบำบัดของโรงบำบัดน้ำเสียเมืองพัทยาทั้ง 2 แห่ง

จากข้อมูลที่ได้จากการสอบถาม (ข้อที่ 4.1) พบว่าเมื่อน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดและการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนจากโรงบำบัดน้ำเสียที่ 1 น้ำจะถูกปล่อยลงสู่คลองนาเกลือ ขณะที่โรงบำบัดน้ำเสียที่ 2 เมื่อน้ำผ่านกระบวนการบำบัดขั้นที่สาม น้ำปริมาตร 4,800 ลูกบาศก์เมตร/วัน จะถูกส่งไปที่ระบบกรองแบบ Moving bed sand filter แล้วผ่านระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยยูวี และเติมคลอรีน น้ำส่วนนี้ใช้สำหรับรดน้ำต้นไม้ สนามหญ้า และล้างพื้น ทั้งภายในและภายนอกโรงบำบัดน้ำเสีย ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 31.25 ของน้ำที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

การนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ประโยชน์สอดคล้องกับนโยบายระดับชาติของประเทศไทยหลายด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการจัดการทรัพยากรน้ำอย่างยั่งยืน การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม และการส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียน การนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ช่วยลดความต้องการใช้น้ำจากแหล่งธรรมชาติ ลดปัญหามลพิษทางน้ำ และสร้างความมั่นคงทางน้ำให้กับประเทศ อีกทั้งยังสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง SDG 6 (น้ำสะอาดและการสุขาภิบาล) และ SDG 12 (การบริโภคและการผลิตที่ยั่งยืน) ซึ่งการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ช่วยอนุรักษ์ทรัพยากรน้ำ ลดมลพิษ และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ

ในอนาคต น้ำอาจจะไม่พอใช้ในพื้นที่เมืองพัทยานี้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ภาวะโลกร้อน และปรากฏการณ์เอลนีโญ ส่งผลได้จากฝนไม่ตกต้องตามฤดูกาล และเมืองพัทยายู่ในพื้นที่เขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (EEC) อีกด้วย ซึ่งมีความท้าทายด้านความต้องการ หรือขาดแคลนน้ำได้

ปัจจุบันทั่วโลกกำลังให้ความสนใจในการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ ภายใต้หลักการอนุรักษ์น้ำเพื่อการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพและมีน้ำใช้อย่างยั่งยืน มีรายงานการศึกษาการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดที่น่าสนใจ ทั้งการนำน้ำไปใช้โดยตรง และผ่านขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนการนำไปใช้ ตัวอย่าง

รายงานการศึกษาการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดไปใช้ใหม่ได้แก่

5.2.1 การรดน้ำต้นไม้ในเมือง โดยในหลายประเทศ มีการนำน้ำที่ผ่านการบำบัด มาใช้รดน้ำต้นไม้ที่ปลูกตามข้างถนน ทางเดิน สวนสาธารณะ หรือในสนามกอล์ฟ [22]-[23] ซึ่งพัทยาเป็นเมืองท่องเที่ยวขนาดใหญ่ มีการปลูกหญ้า ไม้ดอก ไม้ประดับจำนวนมาก เพื่อความสวยงามและความร่มเย็น นอกจากนี้เป็นการประหยัดค่าน้ำแล้ว ยังเป็นการช่วยลดความร้อนในเมืองได้อีกด้วย

5.2.2 การใช้น้ำเพื่อการเกษตร น้ำที่ผ่านการบำบัดสามารถใช้เป็นน้ำสำหรับการปลูกมะกอก (ประเทศสเปน) ฝ้าย ข้าวสาลี ธัญพืช กะหล่ำดอก และบรอกโคลี (สหรัฐอเมริกา) รวมถึงข้าวเจ้า (ประเทศเกาหลี) [24]-[25] ในเขตจังหวัดชลบุรี มีพื้นที่ปลูกข้าวประมาณ 62,244 ไร่ ซึ่งการใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดอาจเป็นทางเลือกหนึ่งเพื่อการใช้งานอย่างคุ้มค่าและในภาวะขาดแคลนน้ำเช่นนี้

5.2.3 การจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ น้ำที่ผ่านการบำบัดของเมืองพัทยาจากทั้งสองแห่ง มีมากกว่า 2,090,850 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน เป็นปริมาณน้ำที่มากพอ ที่จะนำไปจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ เพื่อนำไปผลิตน้ำใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมที่อยู่ใกล้โรงบำบัดน้ำเสีย เช่น นิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง (ระยะทางประมาณ 30 กม.) และนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด (ระยะทางประมาณ 40 กม.) หรือเพื่อการผลิตน้ำใช้ในภาวะขาดแคลนน้ำจัดได้

6. สรุปผล

น้ำเสียชุมชนเมืองพัทยานีมีปริมาณเกือบ 28.57 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี แบ่งเป็นโรงบำบัดน้ำเสียที่ 1 ปริมาณ 22.95 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี และโรงบำบัดน้ำเสียที่ 2 ปริมาณ 5.62 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียให้ได้ตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบน้ำเสยรวมชุมชน ภายใต้หลักการอนุรักษ์น้ำเพื่อการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพและมีน้ำใช้อย่างยั่งยืน ทั้งการนำน้ำไปใช้

โดยตรง และผ่านขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนการนำไปใช้ ได้แก่ การรตนน้ำต้นไมในเมือง การใช้น้ำเพื่อการเกษตร การจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ให้แก่ นิคมอุตสาหกรรมหรือเพื่อการผลิตน้ำใช้ในภาวะขาดแคลนน้ำจืด อย่างไรก็ตามควรมีการวิเคราะห์เพิ่มเติมทางด้านการประเมินความเป็นไปได้ทางเทคนิค หรือทางเศรษฐศาสตร์ ความคุ้มค่าในการลงทุนในการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ และสามารถชดเชยความต้องการน้ำจืดในเมืองพัทยา

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณปลัดเมืองพัทยา ผู้อำนวยการและลูกจ้างสำนักงานการช่างสุขาภิบาลเมืองพัทยา และบริษัทผู้ได้รับการว่าจ้างดูแลระบบบำบัดน้ำเสียและป้องกันน้ำท่วมของโรงบำบัดน้ำเสียเมืองพัทยาย่อยหนองใหญ่และซอยวัดบุญญ์กัญจนารามสำหรับข้อมูลเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสีย

8. บรรณานุกรม

- [1] Kiliç, Z. (2020). The importance of water and conscious use of water. *International Journal of Hydrology*, 4(5), 239-241.
- [2] Valdes Ramos, A., Aguilera Gonzalez, E. N., Tobón Echeverri, G., Samaniego Moreno, L., Díaz Jiménez, L., & Carlos Hernández, S. (2019). Potential uses of treated municipal wastewater in a semiarid region of Mexico. *Sustainability*, 11(8), 2217.
- [3] Duan, Y., Xi, H., Qin, Z., Guo, R., Wang, F., & Yuan, Y., (2025). Water quality characteristics of municipal wastewater treatment plants and the prospect of reclaimed water utilization in lower-middle income and water-scarce areas: A case study of Puyang. *Water Cycle*, 6, 61-70.
- [4] Sikosana, M. L., Sikhwivhilu, K., Moutloali, R., & Madyira, D. M. (2019). Municipal wastewater treatment technologies: A review. *Procedia Manufacturing*, 35, 1018-1024.
- [5] สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์. (2563). น้ำเสียชุมชน. *วารสารอาชีวศึกษาภาคกลาง*, 4(1), จำนวน 10 หน้า
- [6] กรมควบคุมมลพิษ. (2560). คู่มือระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน. จำนวน 99 หน้า (เข้าถึงข้อมูลเมื่อวันที่ 9 กค 68 <https://www.pcd.go.th/publication/4241/>)
- [7] ศตพล มุ่งคำกลาง จำลอง โพธิ์บุญ และวิสาขา ภูจินดา. (2556, กรกฎาคม-ธันวาคม). ระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมสำหรับการ

จัดการน้ำเสียชุมชนขององค์การปกครองส่วนท้องถิ่น. *การจัดการสิ่งแวดล้อม*, 9(2), หน้า 1-24.

- [8] Pintilie, L., Torres, C. M., Teodosiu, C., & Castells, F. (2016). Urban wastewater reclamation for industrial reuse: An LCA case study. *Journal of cleaner production*, 139, 1-14.
- [9] Mcheik, M., Toufaily, J., Haj Hassan, B., Hamieh, T., Abi Saab, M. T., Roupheal, Y., Ferracin, E., da shio, B., Bashabshah, I., & Al Hadidi, L. (2017). Reuse of treated municipal wastewater in irrigation: a case study from Lebanon and Jordan. *Water and Environment Journal*, 31(4), 552-558.
- [10] Galkina, E., & Vasyutina, O. (2018, June). Reuse of treated wastewater. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 365, No. 2, p. 022047). IOP Publishing.
- [11] Tortajada, C. (2020). Contributions of recycled wastewater to clean water and sanitation Sustainable Development Goals. *NPJ Clean Water*, 3(1), 22.
- [12] Zabel, F., Müller, C., Elliott, J., Minoli, S., Jägermeyr, J., Schneider, J. M., Franke, J.A., Moyer, E., Dury, M., Francois, L., Folberth, C., Liu, W., Pugh, T.A.M., Olin, S., Rabin, S.S., Mauser, W., Hank, T., Ruane, A.C., & Asseng, S. (2021). Large potential for crop production adaptation depends on available future varieties. *Global Change Biology*, 27(16), 3870-3882.
- [13] Banna, A.A., Abdel Hameed, I.M., & El-Sobky, E.E.A., (2023). TREATED MUNICIPAL WASTEWATER REUSE IN VEGETABLE PRODUCTION IN INDIA: A REVIEW. *Zagazig Journal of Agricultural Research*, 50(4), 417-435.
- [14] Reopanichkul, P., Carter, R. W., Worachananant, S., & Crossland, C. J. (2010). Wastewater discharge degrades coastal waters and reef communities in southern Thailand. *Marine environmental research*, 69(5), 287-296.
- [15] <https://www.pattaya.go.th/document/standard/capter02-01.pdf> เข้าถึงข้อมูลเมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2568
- [16] เมืองพัทยา ได้รับมาเมื่อวันที่ 14 สิงหาคม 2567
- [17] บรรยายสรุปเมืองพัทยา ปี 2564 ฝ่ายวิจัยและประเมินผลส่วนยุทธศาสตร์การพัฒนา สำนักยุทธศาสตร์และงบประมาณ (<https://www.pattaya.go.th/wp-content/uploads/2021/10/บรรยายสรุปเมืองพัทยา-ปี-2564.pdf>)
- [18] สถิตินักท่องเที่ยวจังหวัดชลบุรี ประชาชาติธุรกิจ เผยแพร่เมื่อวันที่ 4 เมษายน 2565
- [19] บรรยายสรุปเมืองพัทยา ปี 2567 ฝ่ายวิจัยและประเมินผลส่วนยุทธศาสตร์การพัฒนา สำนักยุทธศาสตร์และงบประมาณ (<https://www.pattaya.go.th/wp-content/uploads/2021/10/บรรยายสรุปเมืองพัทยา-ปี-2564.pdf>)
- [20] สถิติการท่องเที่ยวจังหวัดชลบุรี องค์การบริหารการพัฒนาพื้นที่พิเศษเพื่อการท่องเที่ยวอย่างยั่งยืน (องค์การมหาชน) เผยแพร่เมื่อวันที่ 8 มกราคม 2567 (<https://www.dasta.or.th/th/article/3174>)
- [21] มาตรฐานคุณภาพน้ำตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและ

สิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจาก
ระบบบำบัดน้ำเสียรวมของชุมชน ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 127
2553 มิถุนายน 2 เมื่อ (ง) 69 ตอนพิเศษ

- [22] Rozos, E., Tsoukalas, I., Ripis, K., Smeti, E., & Makropoulos, C. (2017). Turning black into green: Ecosystem services from treated wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 91, 198-205.
- [23] Ramaiah, M., Avtar, R., & Kumar, P., (2022). Treated Wastewater Use for Maintenance of Urban Green Spaces for Enhancing Regulatory Ecosystem Services and Securing Groundwater. *Hydrology*, 9(10), 180.
- [24] Mishra, R. K. (2023). Fresh water availability and its global challenge. *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies*, 4(3), 1-78.
- [25] Yoon, C.G., Kwun, S.K., & Ham, J.H., (2001). Effects of treated sewage irrigation on paddy rice culture and its soil. *Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, 50(3), 227-236.

แนวทางการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์สำหรับการประยุกต์ใช้ทางการทหาร:
กรณีศึกษาบนระบบซอฟต์แวร์สำหรับการถอดรหัสและแสดงผลข้อมูลเรดาร์
Military Software Quality Assessment (MSQA) Framework:
A Case Study of the Air Situation Display (ASD) System

สุทธิชัย รอดแก้ว^{1, 2}, ภูจนา ปาลิยะวรรณ¹, กิ่งกาญจน์ สุขคณาภิบาล^{1*},
วรวัฒน์ เชิญสวัสดิ์¹

Sutthichai Rodkaew^{1, 2}, Pujana Paliyawan¹, Kingkarn Sookhanaphibarn^{1*},
Worawat Choensawat¹

¹ศูนย์นวัตกรรมเฉพาะทาง มหาวิทยาลัยกรุงเทพ 10120 ประเทศไทย

¹Center of Specialty Innovation (CoSI), Bangkok University 10120, Thailand

²หน่วยบัญชาการป้องกันภัยทางอากาศกองทัพบก, ประเทศไทย

²Army Air Defense Command, Thailand

*Corresponding Author. E-mail : kingkarn.s@bu.ac.th

(Received: March 27, 2025, Revised: July 23, 2025, Accepted: August 13, 2025)

บทคัดย่อ: การประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์เป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาและรับรองความสามารถของระบบซอฟต์แวร์ให้สอดคล้องกับมาตรฐานและข้อกำหนดเฉพาะทาง โดยเฉพาะสำหรับระบบซอฟต์แวร์ทางทหารที่มีความซับซ้อนสูงและต้องทำงานในสภาพแวดล้อมที่ท้าทาย การประเมินคุณภาพที่มีประสิทธิภาพจะช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่คาดหวัง และลดความเสี่ยงจากข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการพัฒนาและบำรุงรักษา บทความนี้นำเสนอกรอบการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์ใหม่ในชื่อ Military Software Quality Assessment (MSQA) Framework ซึ่งพัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของมาตรฐาน ISO/IEC 25010 พร้อมบูรณาการมาตรฐานสำคัญอื่น ๆ เช่น MIL-STD-498 MIL-STD-882 MIL-STD-1397C MIL-STD-810 MIL-STD-461 ISO/IEC 12207 ISO/IEC15504 และ ISO/IEC27001 เพื่อเพิ่มความครอบคลุมและเหมาะสมกับการใช้งานในบริบททางทหาร บทความยังนำเสนอกรณีศึกษาการพัฒนาระบบแสดงผลเรดาร์ของกองทัพบกไทย เพื่อแสดงการประยุกต์ใช้ MSQA ในการประเมินและปรับปรุงคุณภาพซอฟต์แวร์จริงอย่างเป็นระบบ

คำสำคัญ: การประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์ IEC25010 มาตรฐานซอฟต์แวร์ ระบบซอฟต์แวร์ทางทหาร การบูรณาการมาตรฐาน

Abstract: Software quality assessment is a critical factor in developing and validating software systems to ensure compliance with specific standards and requirements, especially for military software systems that are highly complex and must operate in challenging environments. Effective quality assessment ensures systems perform as expected and reduces risks from errors during

development and maintenance. This paper presents a novel software quality assessment framework, called the Military Software Quality Assessment (MSQA) Framework, developed based on the ISO/IEC 25010 standard and integrating key related standards such as MIL-STD-498, MIL-STD-882, MIL-STD-1397C, MIL-STD-810, MIL-STD-461, ISO/IEC 12207, ISO/IEC 15504, and ISO/IEC 27001 to enhance comprehensiveness and suitability for military applications. A case study on the development of a radar display system for the Royal Thai Army demonstrates the practical application of MSQA in systematically assessing and improving software quality in a real-world military context.

Keywords: Software Quality Assessment, IEC 25010, Software Standards, Military Software Systems, Standards Integration

1. บทนำ

ซอฟต์แวร์ทางทหารมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการสนับสนุนภารกิจที่เกี่ยวข้องกับความมั่นคงและความปลอดภัยของประเทศ ด้วยความซับซ้อนและสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญกับความท้าทายต่าง ๆ เช่น การโจมตีทางไซเบอร์ สถานะทางภูมิอากาศที่รุนแรง และสถานการณ์ฉุกเฉินอื่น ๆ การประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์สำหรับระบบทหารจึงมีความสำคัญเพื่อให้มั่นใจว่าซอฟต์แวร์สามารถทำงานได้อย่างแม่นยำ เชื่อถือได้ ในสภาพแวดล้อมและสถานการณ์ต่างๆ

กรณีตัวอย่างเหตุการณ์จริงที่แสดงผลกระทบในทางลบจากการขาดการบริหารจัดการซอฟต์แวร์อย่างเหมาะสม สามารถอ้างอิงจากข่าวตามเอกสารอ้างอิงที่ [1] และ [2] เช่น กรณีของระบบ Joint Disability Evaluation Tracking System (JDETS) ของกองทัพเรือสหรัฐฯ เคยเกิดเหตุระบบล่มจนไม่สามารถประมวลผล เพื่อปลดทหารกว่า 3,000 นาย เป็นเวลานานเกือบหนึ่งสัปดาห์ ส่งผลกระทบต่อการเข้าถึงบริการสำคัญต่อบุคลากร (อ้างอิง [1]) และกรณีของเฮลิคอปเตอร์ MRH-90 Taipan ของกองทัพออสเตรเลียที่ต้องลงจอดฉุกเฉินเนื่องจากการละลายการติดตั้งแพตช์ซอฟต์แวร์สำคัญ (อ้างอิง [2]) เหตุการณ์เหล่านี้แสดงให้เห็นถึงต้นทุนและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นหากไม่บริหารจัดการคุณภาพซอฟต์แวร์อย่างเคร่งครัด

ในประเทศไทย ซอฟต์แวร์มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการปฏิบัติการกิจทั้งในด้านการควบคุมระบบ ยุทธโศภรณ์ การวิเคราะห์ข้อมูลสถานการณ์ และการสื่อสารทางยุทธวิธี หน่วยทหารบางแห่ง เช่น ศูนย์ต่อสู้ป้องกันภัยทางอากาศกองทัพบก (ศปภอ.ทบ.) มีการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับงานทางทหารเอง ทั้งในรูปแบบของการสร้างระบบใหม่และการปรับปรุงระบบเดิม เพื่อให้ทันต่อการกิจที่เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม แม้จะมีการทดสอบระบบอย่างเข้มงวดโดยเจ้าหน้าที่ผู้ใช้งานจริง รวมถึงการประเมินผลการใช้งานโดยผู้บังคับบัญชา แต่กระบวนการเหล่านี้ยังขาดแนวทางการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์ที่เป็นมาตรฐานกลาง ทำให้การพิจารณาด้านคุณภาพขึ้นอยู่กับบริบทของแต่ละระบบ และมุมมองของผู้ประเมินในแต่ละครั้ง ซึ่งอาจส่งผลให้คุณลักษณะสำคัญบางประการไม่ได้รับการพิจารณาอย่างครบถ้วน

ด้วยเหตุนี้ จึงเกิดความต้องการในการกำหนดแนวทางการควบคุมและประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์อย่างเหมาะสม จนเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์ในบริบททางทหาร ซึ่งนำไปสู่การทบทวนมาตรฐานที่มีอยู่และข้อค้นพบว่ามาตรฐานเดิมยังไม่ตอบโจทย์อย่างครบถ้วน ส่งผลให้มีการเสนอกรอบการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์ใหม่ที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและความต้องการเฉพาะของกองทัพบกไทยในปัจจุบัน

มาตรฐานสากลที่ใช้เป็นกรอบอ้างอิงสำหรับการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์มีอยู่หลายรายการ โดยสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มหลัก ๆ เช่น กลุ่ม MIL (Military Standards) ซึ่งเป็นชุดมาตรฐานที่พัฒนาโดยกระทรวงกลาโหมสหรัฐอเมริกาเพื่อควบคุมคุณภาพของระบบและซอฟต์แวร์ทางทหารโดยเฉพาะ และกลุ่ม IEC (International Electrotechnical Commission) ซึ่งทำโดยองค์การระหว่างประเทศที่กำหนดมาตรฐานทางเทคนิคสำหรับระบบไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ รวมถึงมาตรฐานคุณภาพซอฟต์แวร์สำหรับการใช้งานทั่วไป ทีมวิจัยได้ทำการสำรวจและวิเคราะห์มาตรฐานจากทั้งสองกลุ่ม และพบว่ามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมคุณภาพซอฟต์แวร์มากที่สุด ได้แก่ MIL-STD-498 ซึ่งครอบคลุมขั้นตอนการพัฒนาและควบคุมเอกสารในโครงการทางทหาร และ ISO/IEC 25010 ซึ่งเน้นคุณลักษณะด้านคุณภาพของซอฟต์แวร์ทั่วไป ทีมวิจัยจึงได้นำทั้งสองมาตรฐานมาเป็นรากฐานหลักเพื่อการพัฒนาแนวทางการประเมินสำหรับกองทัพไทย

แม้ว่า MIL-STD-498 และ ISO/IEC 25010 จะเป็นมาตรฐานสากลที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางและมีความเกี่ยวข้องกับการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์ในระดับทั่วไปและทางทหาร แต่ทั้งสองมาตรฐานก็ยังมีข้อจำกัดสำคัญที่ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงในบริบทของกองทัพไทย โดย MIL-STD-498 ซึ่งประกาศใช้ในปี 1994 นั้น มุ่งเน้นที่การควบคุมเอกสารและกระบวนการพัฒนาซอฟต์แวร์อย่างเป็นระบบเป็นหลัก และสะท้อนแนวคิดของการจัดการคุณภาพในยุคต้นของระบบดิจิทัล อีกทั้ง MIL-STD-498 ได้ถูกยกเลิกอย่างเป็นทางการ และแทนที่ด้วย IEEE/EIA 12207 ซึ่งต่อมาได้รับการยอมรับเป็น ISO/IEC 12207 สำหรับการจัดการกระบวนการพัฒนาซอฟต์แวร์ อย่างไรก็ตาม ISO/IEC 12207 มุ่งเน้นที่การจัดการและควบคุมกระบวนการพัฒนาเป็นหลัก มากกว่าการประเมินคุณภาพของตัวซอฟต์แวร์ที่พัฒนาแล้วโดยตรง จึงไม่เหมาะสำหรับใช้เป็นโครงสร้างหลักในการประเมินคุณภาพเชิงเทคนิคในบริบทเฉพาะของระบบทางทหาร

ในขณะที่ ISO/IEC 25010 แม้จะครอบคลุมคุณภาพเชิงเทคนิคของซอฟต์แวร์ในหลากหลายมิติ เช่น ความน่าเชื่อถือ ความปลอดภัย และการใช้งานง่าย แต่ก็ยังไม่สามารถสะท้อนความต้องการเฉพาะของซอฟต์แวร์ทางทหารได้อย่างครบถ้วน เช่น ความทนทานภายใต้สภาวะฉุกเฉิน ความสามารถในการบำรุงรักษาภายใต้ข้อจำกัดของสนามรบ และมาตรการด้านความมั่นคงปลอดภัยในระดับสูง กรอบการประเมินใหม่จึงจำเป็นต้องได้รับการออกแบบให้มีความครอบคลุมมากขึ้น เพื่อให้ตอบสนองต่อบริบทและภารกิจของกองทัพได้อย่างแท้จริง

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อพัฒนา กรอบการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์สำหรับงานด้านการทหาร ที่มีชื่อว่า Military Software Quality Assessment (MSQA) Framework โดยมุ่งเน้นให้สามารถประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์ได้อย่างครอบคลุม สอดคล้องกับบริบทเฉพาะของระบบทางทหาร ซึ่งมักต้องเผชิญกับข้อจำกัดด้านทรัพยากร สภาพแวดล้อมที่ท้าทาย และความต้องการด้านความมั่นคงปลอดภัยในระดับสูง

MSQA พัฒนาขึ้นโดยอิงโครงสร้างหลักจากมาตรฐาน ISO/IEC 25010 ที่เน้นคุณลักษณะด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ซอฟต์แวร์ พร้อมทั้งผสมผสานมาตรฐานอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น MIL-STD-498 สำหรับเอกสารด้านเทคนิค, MIL-STD-882 สำหรับการจัดการความปลอดภัย, ISO/IEC 12207 สำหรับวงจรชีวิตซอฟต์แวร์, ISO/IEC 15504 สำหรับการประเมินกระบวนการ และ ISO/IEC 27001 สำหรับการจัดการความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูล การผสมผสานนี้ช่วยให้กรอบ MSQA มีความยืดหยุ่นเพียงพอในการประเมินทั้งซอฟต์แวร์ที่มีอยู่เพื่อการปรับปรุง และซอฟต์แวร์ใหม่ที่จะพัฒนาในอนาคต

ขอบเขตของงานวิจัยนี้ยังเสนอการประยุกต์ใช้ MSQA กับระบบที่มีข้อกำหนดเฉพาะ คือ ระบบซอฟต์แวร์สำหรับการถอดรหัสและแสดงผลข้อมูลเรดาร์ (Air Situation Display: ASD) เรียกโดยย่อว่า ระบบ

ASD โดยนำเสนอกรณีศึกษาจริง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพและความเหมาะสมของกรอบการประเมินที่พัฒนาขึ้น ข้อจำกัดที่สำคัญ ได้แก่ การประเมินเน้นที่ซอฟต์แวร์เป็นหลัก ไม่รวมฮาร์ดแวร์ และมุ่งเน้นบริบทของภารกิจทางทหารเท่านั้น ซึ่งอาจจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนกรอบเมื่อนำไปใช้กับระบบหรือภาคส่วนอื่น

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อนี้จะนำเสนอมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมคุณภาพซอฟต์แวร์ โดยเนื้อหาแบ่งเป็นสองส่วนหลักๆ คือ ส่วนของ ISO/IEC 25010 [3, 4] ได้ใช้เป็นโครงสร้างหลักของ MSQA และส่วนของมาตรฐานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง [5–13]

3.1 มาตรฐานหลักที่อ้างอิง (ISO/IEC 25010)

ISO/IEC 25010 [3, 4] มีชื่อเรียกว่า “System and Software Quality Models” ใช้สำหรับ ประเมินคุณภาพระบบและซอฟต์แวร์ โดยมีการกำหนดลักษณะคุณภาพที่ต้องพิจารณา โดยระบบจะถือว่ามีความถูกต้องเมื่อสามารถตอบสนองความต้องการทั้งที่ระบุไว้และที่ไม่ได้ระบุของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องได้อย่างเหมาะสม ซึ่งมีการแบ่งคุณภาพออกเป็นลักษณะหลักและลักษณะย่อยดังนี้

- 1) ความเหมาะสมของฟังก์ชันการทำงาน (Functional Suitability) คือ การวัดระดับที่ระบบสามารถตอบสนองความต้องการที่ระบุและแฝงไว้ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้ ความครบถ้วนของฟังก์ชัน (Functional Completeness) ความถูกต้องของฟังก์ชัน (Functional Correctness) และความเหมาะสมของฟังก์ชัน (Functional Appropriateness)
- 2) ประสิทธิภาพการทำงาน (Performance Efficiency) คือ การวัดระดับที่ระบบสามารถดำเนินการตามเวลาที่กำหนดและทรัพยากรอย่างเหมาะสม ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้ ประสิทธิภาพด้านเวลา (Time Behavior) ประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากร (Resource

Utilization) และขีดความสามารถในการรองรับงาน (Capacity)

- 3) ความสามารถในการทำงานร่วมกัน (Compatibility) คือ การวัดระดับที่ระบบสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลกับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ และทำงานร่วมกันได้ ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้ การอยู่ร่วมกัน (Co-existence) และความสามารถในการทำงานร่วมกัน (Interoperability)
- 4) ความสามารถในการโต้ตอบ (Interaction Capability) คือ การวัดระดับที่ระบบสามารถโต้ตอบกับผู้ใช้เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลผ่านอินเทอร์เฟซ ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้ ความเหมาะสมในการจดจำ (Appropriateness Recognizability) ความสามารถในการเรียนรู้ (Learnability) ความสามารถในการใช้งาน (Operability) การป้องกันข้อผิดพลาดของผู้ใช้ (User Error Protection) การมีส่วนร่วมของผู้ใช้ (User Engagement) ความครอบคลุมสำหรับผู้ใช้งานทุกกลุ่ม (Inclusivity) การช่วยเหลือผู้ใช้ (User Assistance) และความสามารถในการอธิบายตนเอง (Self-descriptiveness)
- 5) ความน่าเชื่อถือ (Reliability) คือ การวัดระดับที่ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้ ความถูกต้องแม่นยำ (Faultlessness) ความพร้อมใช้งาน (Availability) ความสามารถในการทนต่อข้อผิดพลาด (Fault Tolerance) และความสามารถในการกู้คืนข้อมูล (Recoverability)
- 6) ความปลอดภัย (Security) คือ การวัดระดับที่ระบบสามารถป้องกันการโจมตีและปกป้องข้อมูล ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้ การรักษาความลับ (Confidentiality) ความถูกต้องของข้อมูล (Integrity) การป้องกันการปฏิเสธความรับผิดชอบ (Non-repudiation) ความสามารถในการตรวจสอบความรับผิดชอบ (Accountability) ความแท้จริงของข้อมูล (Authenticity) และความสามารถในการต้านทานการโจมตี (Resistance)

- 7) ความสามารถในการบำรุงรักษา (Maintainability) คือ การวัดระดับที่ระบบสามารถแก้ไขปรับปรุง หรือปรับเปลี่ยนเพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้ การออกแบบเป็นโมดูล (Modularity) การนำกลับมาใช้ใหม่ (Reusability) และความสามารถในการวิเคราะห์ (Analyzability)
- 8) ความยืดหยุ่น (Flexibility) คือ การวัดระดับที่ระบบสามารถปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมและความต้องการ ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้ ความสามารถในการปรับตัว (Adaptability) ความสามารถในการขยายขนาด (Scalability) การติดตั้ง (Installability) และการทดแทน (Replacability)
- 9) ความปลอดภัย (Safety) คือ การวัดระดับที่ระบบสามารถหลีกเลี่ยงอันตรายต่อชีวิตทรัพย์สิน และสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้ ข้อจำกัดในการปฏิบัติการ (Operational Constraints) การระบุความเสี่ยง (Risk Identification) ระบบป้องกันความล้มเหลว (Failure Prevention) การเตือนภัยอันตราย (Hazard Warning) และการรวมระบบอย่างปลอดภัย (Safe System Integration)

3.1.1 การยอมรับและการใช้งานของมาตรฐาน ISO/IEC 25010

ISO/IEC 25010 เป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในทั้งภาคอุตสาหกรรมและงานวิจัย โดยงานศึกษาของ Wagner et al. (2017) [14] ชี้ให้เห็นว่าองค์กรต่างๆ ใช้มาตรฐานนี้ในการกำหนดและจัดการความต้องการด้านคุณภาพซอฟต์แวร์ ขณะที่งานของ Alnanh et al. (2014) [15] แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ ISO/IEC 25010 อย่างเป็นระบบในการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์ ทำให้มาตรฐานนี้เป็นเครื่องมือที่ครบถ้วนและมีประสิทธิภาพสำหรับการวัดและประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์ในทางปฏิบัติและทางวิชาการ

3.1.2 ข้อจำกัดของ ISO/IEC 25010

ในบริบทของการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์สำหรับระบบที่มีความซับซ้อนหรือใช้งานในสภาพแวดล้อมเฉพาะทาง เช่น ระบบทางทหาร มาตรฐาน ISO/IEC 25010 แม้จะเป็นกรอบการประเมินที่ครอบคลุมและได้รับการยอมรับในระดับสากล แต่ก็ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณา

ประการแรก มาตรฐานนี้ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อรองรับบริบทเฉพาะ เช่น การใช้งานในสถานการณ์วิกฤต ความจำเป็นในการทำงานแบบต่อเนื่อง หรือสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงสูง ซึ่งพบได้บ่อยในระบบที่เกี่ยวข้องกับความมั่นคงและความปลอดภัย

ประการที่สอง ISO/IEC 25010 ไม่มีหมวดประเมินที่มุ่งเน้นความทนทานของระบบ (durability) และความสามารถในการบูรณาการกับระบบเดิม (legacy systems) อย่างชัดเจน ทั้งที่เป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบและใช้งานระบบในระยะยาว

ประการที่สาม มาตรฐานนี้ยังขาดการประเมินความสอดคล้องกับข้อกำหนดด้านกฎหมายหรือมาตรฐานเฉพาะทาง เช่น มาตรฐานด้านความปลอดภัยสารสนเทศหรือมาตรฐานทางการทหาร ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการรับรองความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของระบบ

สุดท้าย ประเด็นด้านการติดตั้ง การใช้งานจริง และผลกระทบต่อระบบเดิมยังไม่ได้รับการกล่าวถึงอย่างชัดเจนใน ISO/IEC 25010 แม้จะเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จของการนำระบบไปใช้ในบริบทที่มีข้อจำกัดเฉพาะทาง เช่น การใช้งานในภาคสนามในสภาพการณ์ที่มีข้อจำกัดด้านเวลาและทรัพยากร

จากข้อจำกัดเหล่านี้ แสดงให้เห็นว่าแม้มาตรฐาน ISO/IEC 25010 จะมีความครอบคลุมในมุมมองทั่วไป แต่ก็ยังไม่เพียงพอสำหรับการประเมินซอฟต์แวร์ในบริบทที่มีความเฉพาะเจาะจงหรือมีข้อกำหนดด้านความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือสูง

3.2 มาตรฐานอื่นๆ ที่พิจารณา

แม้ว่ากรอบ MSQA จะอิงกับ ISO/IEC 25010 เป็นหลัก แต่มาตรฐานนี้เน้นเฉพาะคุณภาพของซอฟต์แวร์เท่านั้น ในบริบทของระบบทหาร ซึ่งมีความซับซ้อนและสภาพแวดล้อมการทำงานที่ท้าทาย จำเป็นต้องพิจารณามาตรฐานเสริมเพิ่มเติมทั้งจากกลุ่ม MIL-STD และ ISO/IEC เพื่อครอบคลุมในทุกมิติของคุณภาพ ทั้งด้านกายภาพ ความปลอดภัย ความเชื่อถือได้ และความสามารถในการบำรุงรักษา

MIL-STD-498 [5] เป็นมาตรฐานของกระทรวงกลาโหมสหรัฐฯ ที่กำหนดกระบวนการพัฒนาซอฟต์แวร์และการจัดทำเอกสารอย่างเข้มงวด โดยให้ความสำคัญกับการตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability) และการควบคุมเวอร์ชัน (Version Control) ซึ่ง MSQA ได้นำแนวทางดังกล่าวมาเสริมในด้านการบำรุงรักษา (Maintainability) และความสามารถในการติดตั้ง (Installability) เพื่อให้แน่ใจว่าระบบสามารถปรับปรุงและดูแลได้ตลอดอายุการใช้งาน

MIL-STD-882 [6] เป็นมาตรฐานด้านความปลอดภัยของระบบ (System Safety) ที่เน้นการวิเคราะห์อันตราย (Hazard Analysis) การประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment) และการกำหนดมาตรการลดความเสี่ยง (Risk Mitigation) ตลอดวงจรชีวิตของระบบ MSQA ได้นำแนวทางนี้มาเสริมในมิติด้านความปลอดภัย (Safety) และความสอดคล้องกับข้อกำหนด (Compliance) โดยเน้นการประเมินระดับความรุนแรงและความถี่ของความเสี่ยง เพื่อนำไปสู่การวางแผนป้องกันหรือบรรเทาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในระบบที่ทำงานภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยงสูง เช่น ระบบอัตโนมัติทางทหารหรือระบบควบคุมในการกิจที่ต้องการความปลอดภัยสูง

MIL-STD-1397C [7] เป็นมาตรฐานที่กำหนดรูปแบบและโปรโตคอลสำหรับการสื่อสารทางดิจิทัลระหว่างระบบต่าง ๆ ภายในบริบททางทหาร โดยเฉพาะการเชื่อมต่อผ่านอินเทอร์เน็ตเพชของอุปกรณ์จากผู้ผลิตหลากหลาย เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบเรียลไทม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้ MSQA ได้นำแนวคิดจากมาตรฐานนี้มาใช้เพื่อสนับสนุน

การประเมินด้าน ความสามารถในการทำงานร่วมกัน (Interoperability) และ การบูรณาการระบบ (System Integration) โดยเน้นให้ซอฟต์แวร์สามารถสื่อสารและทำงานร่วมกับฮาร์ดแวร์หรือระบบอื่นได้แม้จะไม่ได้ควบคุมการออกแบบอินเตอร์เฟซโดยตรง ทั้งนี้เพื่อให้ระบบมีความยืดหยุ่นและสามารถปรับใช้ในบริบทภาคสนามที่หลากหลาย

MIL-STD-810 [8] เป็นมาตรฐานที่ครอบคลุมการทดสอบภายใต้สภาพแวดล้อมที่รุนแรง เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ฝุ่น การกระแทก และการสั่นสะเทือน การนำแนวทางนี้มาใช้ช่วยให้การประเมินด้านความทนทาน (Durability) ความน่าเชื่อถือ (Reliability) และความสอดคล้องกับภาคสนาม (Operational Compliance) ของระบบมีความสมจริงยิ่งขึ้น โดยมีตัวอย่างการประยุกต์ ได้แก่ การทดสอบอุณหภูมิ (Temperature Test) สำหรับการใช้งานในสภาพอากาศร้อนจัดหรือเย็นจัด การทดสอบแรงกระแทก (Shock Test) โดยจำลองแรงระเบิดหรือการตกหล่นของอุปกรณ์ และการทดสอบการสั่นสะเทือน (Vibration Test) ที่ประเมินประสิทธิภาพขณะติดตั้งบนพาหนะทางทหาร

MIL-STD-461 [9] เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) และความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMC) MSQA นำมาประยุกต์ใช้ในมิติด้านความปลอดภัย (Security) ความสามารถในการทำงานร่วมกัน (Compatibility) และความน่าเชื่อถือ (Reliability) โดยมีตัวอย่างการประยุกต์ ได้แก่ การทดสอบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Radiated Emissions) และการทดสอบภูมิคุ้มกันต่อคลื่นรบกวน (Radiated Susceptibility)

ISO/IEC 12207 [10] เป็นมาตรฐานสากลที่กำหนดกรอบกระบวนการวงจรชีวิตของซอฟต์แวร์ (Software Life Cycle Process Framework) โดยครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการเริ่มต้น เช่น การกำหนดความต้องการ (Requirement Definition) การวางแผน (Planning) การออกแบบและพัฒนา (Design and Implementation) ไปจนถึงกระบวนการบำรุงรักษา (Maintenance) การติดตั้ง (Deployment) และการยุติระบบ (Retirement)

MSQA ได้นำโครงสร้างและแนวทางจาก ISO/IEC 12207 มาใช้ในการจัดหมวดหมู่และตรวจสอบคุณภาพในแต่ละช่วงของการพัฒนา โดยเฉพาะในมิติของความสามารถในการบำรุงรักษา (Maintainability) และความสามารถในการจัดการกระบวนการ (Process Maturity) ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินว่าโครงการมีการวางโครงสร้างที่เป็นระบบหรือไม่ มีการควบคุมการเปลี่ยนแปลง และสามารถปรับปรุงหรือแก้ไขซอฟต์แวร์ได้ในระยะยาวหรือไม่

ISO/IEC 15504 [11] หรือที่เรียกว่า Software Process Improvement and Capability Determination (SPICE) เป็นมาตรฐานที่เน้นการวัดระดับความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Level) และให้กรอบสำหรับการปรับปรุงกระบวนการ พัฒนาซอฟต์แวร์อย่างต่อเนื่อง โดยมาตรฐานนี้มีการแบ่งระดับความสามารถของกระบวนการออกเป็น 6 ระดับ ตั้งแต่ “Incomplete Process” จนถึง “Optimizing Process” ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินว่ากระบวนการพัฒนามีความเป็นระบบและมีการควบคุมที่ดีเพียงใด ดังนั้น MSQA ได้นำแนวคิดนี้มาใช้เสริมในมิติด้าน ประสิทธิภาพ (Performance Efficiency) และ ความทนทาน (Durability) เพื่อให้การประเมินไม่ได้จำกัดเฉพาะตัวซอฟต์แวร์เท่านั้น แต่รวมถึงกระบวนการที่สร้างซอฟต์แวร์นั้นด้วย เช่น การจัดการทรัพยากร การวิเคราะห์ข้อผิดพลาด และการปรับปรุงกระบวนการอย่างต่อเนื่อง

ISO/IEC 27001 [12] เป็นมาตรฐานด้านการจัดการความปลอดภัยของข้อมูล (Information Security Management Systems – ISMS) ที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในระดับองค์กรและโครงการขนาดใหญ่ มาตรฐานนี้กำหนดข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันข้อมูล ได้แก่ ความลับ (Confidentiality) หมายถึง ข้อมูลไม่สามารถเข้าถึงโดยผู้ที่ไม่ได้รับอนุญาต ความสมบูรณ์ (Integrity) หมายถึง ข้อมูลถูกต้อง ไม่สามารถดัดแปลง และความพร้อมใช้งาน (Availability) หมายถึง ข้อมูลสามารถเข้าถึงได้เมื่อต้องการ ดังนั้น

MSQA ได้นำแนวทางจาก ISO/IEC 27001 มาเสริมในระบบที่เกี่ยวข้องกับการจัดเก็บและส่งข้อมูลในสภาพแวดล้อมทางทหาร เช่น การจัดการข้อมูลภารกิจหรือข้อมูลอาวุธ โดยเน้นการป้องกันข้อมูลสำคัญทั้งในเชิงเทคนิค (Technical Controls) และเชิงองค์กร (Organizational Controls)

ISO/IEC 29110 [13] เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับ องค์กรขนาดเล็ก (Very Small Entities - VSEs) ซึ่งมีบุคลากรไม่เกิน 25 คน และมีข้อจำกัดด้านทรัพยากร มาตรฐานนี้ให้แนวทางในการวางแผน พัฒนา และประเมินซอฟต์แวร์ในลักษณะที่เรียบง่ายแต่มีประสิทธิภาพ โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือหรือเอกสารที่ซับซ้อน แม้ว่า MSQA ได้ออกแบบให้ใช้ในระบบขนาดใหญ่ แต่หลักการบางประการจาก ISO/IEC 29110 เช่น การปรับกระบวนการให้เหมาะสมกับทรัพยากรที่มี (Tailoring) และการติดตามคุณภาพในระดับโครงการขนาดเล็ก สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในบริบทของระบบย่อย หรือโครงการเฉพาะกิจที่มีข้อจำกัดด้านกำลังคนและงบประมาณ เพื่อรักษามาตรฐานคุณภาพในระดับที่เหมาะสม

4. วิธีดำเนินการศึกษา

4.1 หลักการและแนวคิดในการพัฒนา MSQA

การพัฒนา Military Software Quality Assessment (MSQA) มีจุดมุ่งหมายเพื่อสร้างกรอบการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์ที่ตอบสนองต่อบริบทการใช้งานในระบบทางทหาร ซึ่งมีความซับซ้อนสูง ต้องการความน่าเชื่อถือ และความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย โดยมีหลักการสำคัญที่ใช้ในการออกแบบ MSQA ได้แก่

- 1) การอ้างอิงตามมาตรฐานสากล โดยใช้ ISO/IEC 25010 เป็นโครงสร้างหลักในการนิยามมิติด้านคุณภาพ (Quality Dimensions) และผนวกกับมาตรฐานอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น MIL-STD-810 MIL-STD-882 ISO/IEC12207 และ ISO/IEC 15504 เพื่อให้การประเมินครอบคลุมทั้งมิติด้าน

ซอฟต์แวร์ และความเหมาะสมทางยุทธวิธี

- 2) การออกแบบที่เหมาะสมกับบริบททางทหาร MSQA ได้ออกแบบให้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานกับโครงการต่าง ๆ ในภาครัฐหรือกองทัพ โดยเน้นประเด็นด้านความปลอดภัย (Safety) ความน่าเชื่อถือ (Reliability) การบำรุงรักษา (Maintainability) และการทำงานร่วมกับระบบเดิม (Legacy Integration) ซึ่งเป็นข้อกำหนดสำคัญในระบบปฏิบัติการของกองทัพ
- 3) การประเมินตามลักษณะงานจริง: MSQA ไม่ได้จำกัดเฉพาะการประเมินเชิงเทคนิคในซอฟต์แวร์เท่านั้น แต่รวมถึงปัจจัยด้านกระบวนการพัฒนา (Process Maturity) ความสอดคล้องตามมาตรฐาน (Compliance) และความสามารถในการดำเนินงานภายใต้ข้อจำกัดเชิงทรัพยากรและโครงสร้าง
- 4) การมีส่วนร่วมจากหลายฝ่าย (Stakeholder-Driven Design): กระบวนการพัฒนา MSQA ขับเคลื่อนโดยการระดมความคิดเห็นจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียหลายฝ่าย ไม่ว่าจะเป็นนักพัฒนาระบบ ผู้ใช้งานจริงในภาคสนาม และหน่วยงานบริหาร เพื่อให้แน่ใจว่าเกณฑ์การประเมินมีความครอบคลุม และตอบโจทย์การปฏิบัติงานจริง

หลักการและแนวคิดเหล่านี้ช่วยให้ MSQA เป็นกรอบการประเมินที่มีความชัดเจน รองรับการนำไปประยุกต์ใช้ได้ในโครงการต่าง ๆ และส่งเสริมให้เกิดมาตรฐานกลางในการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์สำหรับภาคความมั่นคงและระบบสำคัญอื่น ๆ

4.2 ขั้นตอนการพัฒนา MSQA

การพัฒนา MSQA เกิดขึ้นผ่านกระบวนการ อภิปราย และระดมความคิดร่วมกับผู้เกี่ยวข้องและผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ที่เกี่ยวข้องในภาคสนาม ทั้งนักพัฒนา ผู้ใช้งานจริง และผู้บริหาร เพื่อให้มั่นใจว่าเกณฑ์การประเมินที่กำหนดขึ้นมีความครอบคลุม ตรงตามความต้องการ และเหมาะสมกับบริบททางทหารอย่างแท้จริง

ในกระบวนการนี้ ยังได้นำระบบจริงที่มีอยู่ คือ ระบบ ASD มาใช้เป็นกรณีศึกษา เพื่อทดสอบและปรับใช้

MSQA โดยการวัดและประเมินประสิทธิภาพและคุณภาพของระบบเหล่านี้ตามมิติที่กำหนดไว้ ซึ่งช่วยให้ทีมพัฒนาเห็นภาพชัดเจนถึงข้อจำกัด ปัญหา และโอกาสในการปรับปรุงมาตรฐานประเมิน

ด้วยวิธีการนี้ MSQA จึงได้รับการออกแบบให้สามารถตอบสนองความต้องการใช้งานจริง และพร้อมนำไปใช้ในระบบทางทหารอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.3 มิติการประเมินในรอบ MSQA และหลักการเชิงแนวคิด

มาตรฐาน ISO/IEC 25010 กำหนดไว้ทั้งหมด 9 มิติในการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์ ขณะที่กรอบการประเมิน MSQA ได้นำเสนอ 7 มิติ (รายละเอียดจะมีการขยายความในบท 4.4) โดยไม่ได้เป็นการตัดทอนมิติโดยตรง แต่เป็นการจัดกลุ่มและรวมมิติที่มีความเกี่ยวข้องกันใน ISO/IEC 25010 เข้ากับข้อกำหนดจากมาตรฐานอื่น ๆ เพื่อให้ได้มิติที่กระชับ เหมาะสมกับบริบทของงานด้านการทหาร และช่วยให้กระบวนการประเมินมีความชัดเจนและปฏิบัติได้ง่ายขึ้น ความเชื่อมโยงระหว่างมิติใน MSQA กับ ISO/IEC 25010 และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง อ้างอิงตามตารางที่ 1

MSQA ออกแบบมาเพื่อให้กระบวนการประเมินเป็นระบบ มีความยืดหยุ่น และตรงกับข้อกำหนดเฉพาะของระบบทางทหาร โดยมีเหตุผลหลักของการออกแบบดังนี้

- 1) ความสามารถในการประเมินแบบแยกส่วนอย่างเป็นระบบ หมายถึง MSQA ออกแบบให้แต่ละมิติมีความเป็นอิสระในการประเมิน ช่วยให้สามารถดำเนินการประเมินแต่ละด้านแยกจากกันได้ตามบริบท เช่น การทดสอบประสิทธิภาพสามารถใช้เครื่องมือเชิงเทคนิคโดยไม่ต้องมีผู้ใช้เข้าร่วม ขณะที่การประเมิน User Interface ต้องอาศัยการทดลองใช้งานจริงกับผู้ปฏิบัติงาน การแยกมิติเช่นนี้ทำให้สามารถใช้ทรัพยากรได้อย่างเหมาะสม ควบคุมกระบวนการทดสอบได้ง่าย และลดความซับซ้อนในการจัดการทดสอบที่ต้องการความแม่นยำสูงภายใต้ข้อจำกัดด้านเวลาและทรัพยากรของภาคการทหาร

ตารางที่ 1 มิติการประเมินของ MSQA และความเกี่ยวข้องกับ ISO/IEC25010 และมาตรฐานอื่นๆ

มิติการประเมิน	มิติจาก ISO/IEC 25010	ความสัมพันธ์กับมาตรฐานอื่น
ประสิทธิภาพ (Performance)	- ประสิทธิภาพของระบบ (Performance Efficiency) ความน่าเชื่อถือ (Reliability) - รวมทั้งสองมิติ เนื่องจากในระบบทหาร ความน่าเชื่อถือถือเป็นส่วนหนึ่งของความสามารถในการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ	MIL-STD-498 (การตรวจสอบสมรรถนะของซอฟต์แวร์) ISO/IEC 12207 (การบริหารวงจรชีวิตซอฟต์แวร์), ISO/IEC 15504 (SPICE) (การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการซอฟต์แวร์)
ส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface)	-ความสามารถในการโต้ตอบ (Interaction Capability) ความเหมาะสมของฟังก์ชัน (Functional Suitability) -เน้นให้ส่วนติดต่อผู้ใช้ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานอย่างครบถ้วน ถูกต้อง และเหมาะสม รวมถึงง่ายต่อการเรียนรู้และฝึกใช้งาน	ISO/IEC 12207 (การออกแบบซอฟต์แวร์ที่ใช้งานง่าย) MIL-STD-498 (ข้อกำหนดด้านเอกสารและปัจจัยมนุษย์)
การทำงานร่วมกัน (Integration)	-ความเข้ากันได้ (Compatibility) ความเหมาะสมของฟังก์ชัน (Functional Suitability) -เน้นความเข้ากันได้และความเหมาะสมของฟังก์ชัน เพื่อให้ระบบทำงานร่วมกับส่วนอื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ	MIL-STD-1397C (โปรโตคอลการสื่อสารดิจิทัลของกองทัพ) ISO/IEC 12207 (การบริหารจัดการการรวมระบบซอฟต์แวร์) MIL-STD-461 (สามารถทำงานร่วมกับระบบที่มีข้อกำหนดด้าน EMI/EMC ได้อย่างเหมาะสม เช่น ซอฟต์แวร์ที่ควบคุมระบบเรดาร์หรือระบบสื่อสารที่ต้องทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนสูง)
ความทนทาน (Durability)	-ความน่าเชื่อถือ (Reliability) การบำรุงรักษา (Maintainability) ระบบต้องทำงานได้อย่างถูกต้องและเสถียรในระยะเวลาอันยาวนาน โดยลดโอกาสเกิดข้อผิดพลาดหรือความล้มเหลว และต้องง่ายต่อการบำรุงรักษาเพื่อรักษาประสิทธิภาพและความพร้อมใช้งานอย่างต่อเนื่อง	MIL-STD-882 (มาตรฐานการวิเคราะห์อันตรายและความปลอดภัยของระบบ) ISO/IEC 15504 (SPICE) (มาตรฐานด้านความน่าเชื่อถือของซอฟต์แวร์) MIL-STD-810 (ในบริบทของซอฟต์แวร์ที่ต้องทำงานร่วมกับระบบที่อาจได้รับผลกระทบจากสภาวะแวดล้อม เช่น ระบบในอากาศยานไร้คนขับ (UAV) หรืออุปกรณ์ภาคสนามที่ต้องเผชิญกับอุณหภูมิสุดขั้วและแรงสั่นสะเทือน)
การปฏิบัติตามข้อกำหนด (Compliance)	-ความปลอดภัย (Security) ความปลอดภัยของระบบ (Safety) ความเหมาะสมของฟังก์ชัน (Functional Suitability) -ระบบต้องมีมาตรการป้องกันข้อมูลและการใช้งานที่ผิดพลาด เพื่อป้องกันอันตรายต่อผู้ใช้หรือภารกิจ	ISO/IEC 27001 (มาตรฐานการบริหารความปลอดภัยของข้อมูล) MIL-STD-882 (มาตรฐานความปลอดภัยของระบบในงานทางทหาร)
การติดตั้งและใช้งาน (Deployment)	-ความเข้ากันได้ (Compatibility) ความยืดหยุ่น (Flexibility) -ระบบต้องสามารถติดตั้งและใช้งานได้ง่ายในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย โดยไม่กระทบระบบเดิม และปรับตัวได้ตามข้อจำกัดของพื้นที่หรือภารกิจ	ISO/IEC 12207 (กระบวนการติดตั้งซอฟต์แวร์), MIL-STD-498 (ข้อกำหนดการติดตั้งและตรวจสอบซอฟต์แวร์ในงานทางทหาร)
การบำรุงรักษา (Maintenance)	-การบำรุงรักษา (Maintainability) ความยืดหยุ่น (Flexibility) -ระบบควรตรวจสอบ แก้ไข และอัปเดตได้ง่าย เพื่อรองรับการใช้งานระยะยาว และปรับให้เหมาะสมกับภารกิจที่เปลี่ยนแปลงได้	ISO/IEC 12207 (การบริหารการบำรุงรักษาซอฟต์แวร์) MIL-STD-498 (การวางแผนและจัดการบำรุงรักษาซอฟต์แวร์เชิงโครงสร้าง) ISO/IEC 15504 (SPICE) (แนวทางการปรับปรุงซอฟต์แวร์อย่างต่อเนื่อง)

2) การลดความซ้ำซ้อนของมิติการประเมิน และการส่งเสริมความกระชับของเกณฑ์ หมายถึง MSQA ได้รวมมิติที่เกี่ยวข้องช่วยลดความซ้ำซ้อนในการประเมิน ทำให้ผู้ประเมินสามารถมุ่งเน้นกับประเด็นสำคัญและตัดสินใจได้รวดเร็วขึ้น ซึ่งเหมาะสมกับบริบทที่ต้องการความ

แม่นยำและเร็วในสถานการณ์ทางทหาร

3) ความสอดคล้องกับบริบทเฉพาะของระบบงานด้านความมั่นคง หมายถึง กรอบการประเมิน MSQA ได้รับการออกแบบให้สะท้อนความต้องการและข้อจำกัดเฉพาะของระบบที่ใช้ในภารกิจด้านความมั่นคง ซึ่งมีลักษณะเฉพาะ

แตกต่างจากระบบพลเรือนทั่วไป โดยระบบทหารจำเป็นต้องมีความน่าเชื่อถือสูง (High Reliability) และความปลอดภัยเชิงข้อมูลและการปฏิบัติขั้นสูง (High-level Security)

- 4) การเพิ่มมิติการประเมินที่สะท้อนบริบทภาคสนาม หมายถึง MSQA เพิ่มมิติ Deployment ซึ่งไม่รวมอยู่ใน ISO/IEC 25010 แต่ MSQA เพิ่มเข้ามาเพื่อสะท้อนความสำคัญของการติดตั้งและใช้งานในภาคสนามที่มีข้อจำกัดด้านเวลาและทรัพยากร เช่น การติดตั้งระบบในสถานที่ที่ยากลำบาก หรือภายใต้สภาวะวิกฤต
- 5) การเน้นการใช้งานจริงผ่านมิติของส่วนติดต่อผู้ใช้ หมายถึง ในบริบทของระบบงานด้านความมั่นคง ส่วนติดต่อผู้ใช้ ถือเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบ เนื่องจากผู้ใช้งานจำนวนมากมิได้มีพื้นฐานด้านเทคโนโลยีสารสนเทศโดยตรง จึงจำเป็นที่ระบบจะต้องออกแบบให้มีความง่ายในการเรียนรู้ และสามารถฝึกใช้งานได้อย่างรวดเร็ว ช่วยลดความเสี่ยงจากข้อผิดพลาด และเพิ่มความมั่นใจในการปฏิบัติงานของผู้ใช้ในสถานการณ์จริง ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพและความปลอดภัยของภารกิจ

กล่าวโดยสรุป การรวมและปรับแต่งมิติของ MSQA ช่วยให้กรอบประเมินนี้มีความเหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของซอฟต์แวร์ทางทหาร และทำให้การประเมินเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและครอบคลุมมากขึ้นในบริบทที่ต้องการความแม่นยำและรวดเร็ว

5. ผลการศึกษา

5.1 กรณีศึกษา

โครงการพัฒนาระบบซอฟต์แวร์สำหรับการถอดรหัสและแสดงผลข้อมูลเรดาร์ (ASD) ดำเนินการระหว่างปี พ.ศ. 2565 ถึง 2568 เพื่อปรับปรุงส่วนแสดงผลของระบบเรดาร์ให้มีความทันสมัย

โดยมีการเสนอกรอบ MSQA ควบคู่ไปด้วย เพื่อใช้ในการกำกับ ติดตาม และประเมินคุณภาพระบบตลอด

วงจรชีวิตของโครงการ และรายละเอียดของการวิจัยพัฒนาระบบ ASD มีดังนี้

ระบบเรดาร์แบบเก่าจำนวนมากประสบปัญหาด้านการบำรุงรักษา เนื่องจากเทคโนโลยีล้าสมัย ขาดแคลนอะไหล่ และมีข้อจำกัดในด้านประสิทธิภาพ โครงการนี้จึงได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อทดแทนส่วนประมวลผลของระบบเรดาร์เดิม โดยออกแบบให้ระบบ ASD แบบใหม่สามารถประมวลผลข้อมูลเรดาร์ได้แบบเรียลไทม์ มีความแม่นยำ ใช้งานง่าย และรองรับการจัดการข้อมูลแผนที่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับรู้สถานการณ์ทางอากาศ

เป้าหมายของโครงการคือการพัฒนา ระบบ ASD ที่ทันสมัย ใช้งานง่าย และดูแลรักษาง่าย เพื่อทดแทนระบบ ASD รุ่นเก่าในระบบเรดาร์ โดยยังคงสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์เดิม เช่น เสาอากาศ การพัฒนาระบบดำเนินการภายใต้มาตรฐานทางทหาร และใช้กรอบการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์สมัยใหม่

การประเมินในโครงการนี้มุ่งเน้นเฉพาะส่วนของชุดซอฟต์แวร์ที่ทำหน้าที่ประมวลผลและแสดงผลข้อมูล โดยไม่ครอบคลุมถึงส่วนของฮาร์ดแวร์อื่น ๆ ของระบบเรดาร์ เช่น เสาอากาศ รวมถึงเครือข่ายและระบบการสื่อสาร เนื่องจากระบบใช้โครงสร้างพื้นฐานเครือข่ายอินเทอร์เน็ตที่มีอยู่แล้วในการรับส่งข้อมูล

5.2 การนำไปใช้กับกรณีศึกษา

ในส่วนนี้จะอธิบายรายละเอียดของแต่ละมิติจากกรอบ MSQA ทั้ง 7 ด้าน พร้อมยกตัวอย่างจากกรณีศึกษาการพัฒนาระบบ ASD ซึ่งออกแบบมาโดยมีแนวคิดสำคัญคือ การแยกมิติการประเมินออกจากกันอย่างชัดเจน เพื่อให้สามารถทดสอบและตรวจสอบได้อย่างเป็นอิสระภายใต้บริบทที่แตกต่างกัน

5.2.1 ประสิทธิภาพ (Performance)

คำอธิบายแนวคิด: ประสิทธิภาพในที่นี้หมายถึงความสามารถของระบบในการตอบสนองต่อคำสั่งหรือเหตุการณ์อย่างรวดเร็วแม้ภายใต้ภาระงานที่สูง โดยรวมถึงประสิทธิภาพของการประมวลผลข้อมูล ความเร็วในการแสดงผล การจัดสรรทรัพยากร และความเสถียรของระบบ

วัตถุประสงค์: เพื่อให้มั่นใจว่าระบบสามารถปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ข้อจำกัดของเวลา ทรัพยากร และปริมาณข้อมูลที่มาก

บริบทการประเมิน: เน้นการประเมินในเชิงเทคนิค โดยผู้พัฒนาหรือผู้ทดสอบซอฟต์แวร์ โดยพิจารณาจากสถานการณ์ และวิเคราะห์การใช้ทรัพยากรระบบ เพื่อวัดความสามารถในการตอบสนองและความเสถียรของระบบ

แนวทางการประเมิน: ทดสอบการประมวลผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ภายใต้ภาระงานต่างๆ วิเคราะห์ความเร็วในการโหลดข้อมูลและแสดงผล ตรวจสอบอัตราการใช้ CPU หน่วยความจำ และทรัพยากรอื่นๆ สุดท้ายเปรียบเทียบกับ baseline หรือระบบเดิมที่ใช้งานอยู่

กรณีศึกษาระบบ ASD: การทดสอบภายใต้สถานการณ์ที่มีอากาศยานมากกว่า 200 ลำ ระบบสามารถแสดงผลได้แบบเรียลไทม์ โดยไม่มีอาการหน่วงหรือค้าง นอกจากนี้ ยังได้ดำเนินการทดสอบในรูปแบบต่างๆ ได้แก่

- 1) Load Test: จำลองการรับข้อมูลจำนวนมากต่อวินาที ระบบยังสามารถรักษาระยะเวลาแสดงผลเฉลี่ยไว้ที่ <200ms
- 2) Stress Test: เปิดระบบทำงานต่อเนื่อง 72 ชั่วโมงโดยไม่พบอาการล่มหรือ degrade
- 3) Latency Test: วัดเวลาตอบสนองเมื่อผู้ใช้สั่งงานพบว่าเวลาเฉลี่ยอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้
- 4) Field User Test: ผู้ใช้งานภาคสนามสามารถปฏิบัติงานตามภารกิจได้สำเร็จในเวลาที่เหมาะสม โดยไม่มีการเรียนรู้ซ้ำ และมีอัตราข้อผิดพลาดต่ำ

ผลจากการทดสอบเหล่านี้สะท้อนว่าระบบสามารถรักษาประสิทธิภาพได้แม้ภายใต้ภาระงานสูง และเหมาะสมกับการใช้งานจริงในสภาพแวดล้อมทางทหารที่มีข้อจำกัดด้านเวลาและความเสถียรของข้อมูล

5.2.2 ส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface)

คำอธิบายแนวคิด: ส่วนติดต่อผู้ใช้ที่ดีควรมีความชัดเจน ใช้งานง่าย สื่อความหมายตรงไปตรงมา โดยเฉพาะในระบบทหารที่ผู้ใช้งานมีเวลาเรียนรู้ระบบจำกัด การออกแบบ UI ที่ดีต้องคำนึงถึงการเรียนรู้ที่รวดเร็ว ความถูกต้อง และลดความผิดพลาดจากมนุษย์

วัตถุประสงค์: เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าใจและใช้งานระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องพึ่งพาผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทาง

บริบทการประเมิน: เน้นการประเมินจากผู้ใช้งานจริง โดยการใช้การสังเกต การเก็บข้อมูลเชิงพฤติกรรม และแบบสอบถาม เพื่อประเมินความง่ายในการเรียนรู้ ความเข้าใจในการใช้งาน และความพึงพอใจโดยรวม

แนวทางการประเมิน: การทดสอบกับผู้ใช้งานจริง (user testing) ประเมินเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้และใช้งาน วิเคราะห์ความถูกต้องในการใช้งานของผู้ปฏิบัติงาน และตรวจสอบความสม่ำเสมอของการออกแบบ UI

กรณีศึกษาระบบ ASD: อินเทอร์เฟซออกแบบให้ใช้งานได้ง่าย แม้เจ้าหน้าที่ที่ไม่มีความเชี่ยวชาญด้านเทคนิค โดยใช้สีที่มีความหมายและสอดคล้องยุทธวิธี ไอคอนที่สื่อความหมายและเป็นมาตรฐาน และฟอนต์ที่มีขนาดเหมาะสม ในการทดสอบกับผู้ใช้งานจริง ได้ใช้แบบสอบถาม User Experience Questionnaire (UEQ) และการสังเกตพฤติกรรมผู้ใช้งานร่วมด้วย พบว่าผู้ใช้งานสามารถเรียนรู้ระบบได้ภายในเวลาอันสั้น (<2 ชั่วโมง) มีอัตราความผิดพลาดต่ำ และสามารถใช้งานต่อเนื่องโดยไม่ต้องพึ่งผู้เชี่ยวชาญ ส่งผลให้ UI ได้รับความพึงพอใจสูงทั้งด้านความชัดเจน ความง่ายในการใช้งาน และความน่าเชื่อถือ

5.2.3 การบูรณาการ (Integration)

คำอธิบายแนวคิด: ระบบที่ดีต้องสามารถเชื่อมต่อและทำงานร่วมกับระบบอื่นๆ ที่มีอยู่เดิม เช่น เซนเซอร์ภายนอก ฐานข้อมูล หรือระบบควบคุมอื่น โดยไม่ต้องมีการแก้ไขโค้ดมาก

วัตถุประสงค์: เพื่อให้ระบบสามารถสานการ
ทำงานกับโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่แล้ว และลดความ
ยุ่งยากในการติดตั้งหรือแก้ไข

บริบทการประเมิน: เน้นการประเมินโดย
ผู้พัฒนาร่วมกับตัวแทนจากระบบอื่น โดยการเชื่อมต่อกับ
ระบบภายนอกหรือระบบเดิม วิเคราะห์การไหลของ
ข้อมูล ความถูกต้อง และความเร็วในการสื่อสาร เพื่อยืนยัน
ความสามารถในการทำงานร่วมกัน (interoperability)

แนวทางการประเมิน: การทดสอบเชื่อมต่อกับ
ระบบภายนอก (เช่น เซนเซอร์ ระบบสื่อสาร) วิเคราะห์
ความถูกต้องและความเร็วของการแลกเปลี่ยนข้อมูล
และตรวจสอบความสามารถในการใช้งานโปรโตคอล
มาตรฐาน

กรณีศึกษาระบบ ASD: ASD สามารถเชื่อมต่อกับ
เสาอากาศและฐานข้อมูลของระบบเดิมผ่าน
โปรโตคอล ASTERIX โดยไม่ต้องปรับแต่งซอฟต์แวร์เดิม
พร้อมแสดงข้อมูลแบบ real-time บนระบบใหม่

นอกจากนี้ ได้ดำเนินการทดสอบการรวมระบบอย่าง
ละเอียดเพื่อประเมินความสามารถในการทำงานร่วมกับ
ระบบเรดาร์ที่มีอยู่จริง โดยครอบคลุมการทดสอบดังนี้

- 1) การทดสอบความสามารถในการทำงานร่วมกัน
(Interoperability Testing): ตรวจสอบว่า ASD
สามารถโต้ตอบและรับส่งข้อมูลกับระบบเรดาร์
รุ่นเก่าและรุ่นใหม่ได้อย่างราบรื่น
- 2) การทดสอบการไหลของข้อมูล (Data Flow
Testing): จำลองสถานการณ์ข้อมูลเรดาร์ที่
หลากหลาย เพื่อตรวจสอบว่า ASD สามารถ
ประมวลผลและแสดงผลข้อมูลได้แบบเรียลไทม์
และถูกต้อง
- 3) การทดสอบการจัดการข้อผิดพลาด (Error
Handling Testing): ตรวจสอบว่าระบบสามารถ
จัดการกับข้อผิดพลาดในการรับ-ส่งข้อมูล เช่น
การตัดการเชื่อมต่อ หรือข้อมูลผิดพลาด ได้อย่าง
เหมาะสมโดยไม่กระทบต่อการปฏิบัติงานหรือทำ
ให้ระบบล่ม

ขั้นตอนการทดสอบเหล่านี้ช่วยยืนยันว่าสามารถรวม
ระบบเข้ากับโครงสร้างพื้นฐานระบบเรดาร์เดิมได้อย่างมี
ประสิทธิภาพและเสถียรภาพตามวัตถุประสงค์ของ
การบูรณาการ

5.2.4 ความทนทาน (Durability)

คำอธิบายแนวคิด: ระบบควรทำงานได้ต่อเนื่อง
แม้ในสถานะที่ไม่ปกติ เช่น การเชื่อมต่อขาด โหลดสูง
หรือฮาร์ดแวร์มีปัญหา และควรรองรับการซ่อมบำรุง
และการอัปเดตได้ง่าย

วัตถุประสงค์: เพื่อให้ระบบสามารถใช้งานใน
ภาคสนามได้อย่างต่อเนื่องและปลอดภัย

บริบทการประเมิน: การประเมินในมิตินี้
จำเป็นต้องดำเนินการร่วมกับผู้ใช้งานที่มีประสบการณ์ใน
ภาคสนาม เพื่อช่วยระบุเหตุการณ์ผิดปกติหรือ
สภาพแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นจริง ซึ่งผู้พัฒนาอาจไม่
สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า ตัวอย่างเช่น การใช้งานใน
สภาพอากาศที่ร้อนจัดหรือชื้นสูงผิดปกติ การปฏิบัติงาน
ภายใต้การสื่อสารที่มีสัญญาณรบกวน หรือเหตุการณ์ที่
ระบบต้องกู้คืนหลังจากเกิดความล้มเหลวเฉียบพลัน มิติ
นี้จึงมุ่งเน้นการจำลองสถานการณ์วิกฤต การทดสอบ
ความต่อเนื่องของระบบ และการประเมินความสามารถ
ในการฟื้นตัว เพื่อให้มั่นใจว่าระบบสามารถปฏิบัติงานได้
อย่างต่อเนื่องและเชื่อถือได้ภายใต้ข้อจำกัดของ
สภาพแวดล้อมทางทหาร

แนวทางการประเมิน: ทดสอบภายใต้
สถานการณ์ผิดปกติ เช่น ตัดไฟ ความล่าช้าในการ
สื่อสาร ตรวจสอบการทำงานของระบบสำรอง
ตรวจสอบความสามารถในการฟื้นฟูละเอียดเมื่อเกิด
ปัญหา

กรณีศึกษาระบบ ASD: การออกแบบโดย
คำนึงถึงความทนทานต่อสถานะผิดปกติและข้อจำกัดใน
ภาคสนาม โดยมีการดำเนินการทดสอบในสถานการณ์
จำลองที่หลากหลายเพื่อประเมินความสามารถในการ
ทำงานอย่างต่อเนื่อง ดังนี้

- 1) ระบบติดตั้งกลไกตรวจจับความผิดปกติที่
สามารถรีเซ็ตหรือบริการอัตโนมัติเมื่อพบการ
เชื่อมต่อขัดข้องหรือบริการล่ม ลดการพึ่งพาการ

แทรกแซงจากผู้ใช้

- 2) ระบบเปิดใช้งานอย่างต่อเนื่องนานกว่า 72 ชั่วโมงในโหมดทำงานจริง เพื่อประเมินความเสถียร พบว่าไม่มีเหตุขัดข้องหรือ downtime ที่กระทบภารกิจ
- 3) ระบบสามารถทนต่อจำลองสถานการณ์ เช่น ตัดไฟ เครือข่ายล่ม หรืออุปกรณ์บางส่วนล้มเหลว และตรวจสอบว่าระบบสามารถฟื้นฟูการทำงานภายในเวลาไม่เกิน 2 นาทีโดยไม่สูญเสียข้อมูลสำคัญ
- 4) การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ในสภาพแวดล้อมรุนแรง เช่น อุณหภูมิสูง ความชื้นเกินมาตรฐาน และแรงสั่นสะเทือน พบว่าส่วนประกอบหลักทำงานได้ตามปกติ และสามารถเปลี่ยนอะไหล่สำคัญ (CPU ทั้งเครื่อง หน้าจอ เม้าส์ หรือ คีย์บอร์ด) ได้ในเวลาไม่เกิน 5 นาทีโดยไม่ต้องอาศัยทีมซ่อมบำรุง

จากผลการทดสอบข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ระบบ ASD สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง มีความสามารถในการฟื้นตัวจากความล้มเหลว และรองรับการบำรุงรักษาในบริบทการใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพตามเป้าหมายด้านความทนทานที่กำหนดไว้ใน MSQA

5.2.5 การปฏิบัติตามข้อกำหนด (Compliance)

คำอธิบายแนวคิด: ระบบต้องสอดคล้องกับมาตรฐานด้านความปลอดภัย ความมั่นคง และข้อกำหนดทางกฎหมาย เช่น MIL-STD ISO/IEC27001 หรือกฎหมายเฉพาะด้าน

วัตถุประสงค์: เพื่อให้แน่ใจว่าระบบสามารถนำไปใช้งานในภารกิจจริงได้ โดยไม่ละเมิดข้อกำหนดหรือกฎหมายใดๆ

บริบทการประเมิน: การประเมินมิตินี้มักดำเนินการโดยหน่วยงานที่มีหน้าที่กำกับดูแลหรือผู้มีอำนาจรับรอง เช่น หน่วยรับรองมาตรฐานทางทหาร (เช่น กรมสื่อสารทหาร) หรือเจ้าหน้าที่ด้านความมั่นคงสารสนเทศ โดยใช้กระบวนการตรวจสอบเอกสาร ข้อกำหนดทางเทคนิค

และผลการทดสอบระบบ เพื่อประเมินความสอดคล้องกับมาตรฐานและกฎระเบียบเฉพาะด้านของกองทัพ ทั้งนี้การประเมินจะครอบคลุมทั้งด้านฟังก์ชัน การควบคุมความปลอดภัย การจัดการความเสี่ยง และการตรวจสอบย้อนหลัง เพื่อให้มั่นใจว่าระบบสามารถนำไปใช้งานจริงโดยไม่ละเมิดข้อกำหนดหรือกฎหมาย

แนวทางการประเมิน: ทดสอบการทำงานตามข้อกำหนดของแต่ละมาตรฐาน ตรวจสอบระบบควบคุมสิทธิ์ การเข้ารหัส และระบบ log ตรวจสอบเอกสารประกอบที่ยืนยันการทดสอบ

กรณีศึกษาระบบ ASD: การออกแบบให้มีการจำกัดสิทธิ์การเข้าถึงตามระดับ clearance อย่างเข้มงวด เพื่อป้องกันการเข้าถึงข้อมูลหรือฟังก์ชันที่ไม่เหมาะสม และเก็บ log การใช้งานอย่างละเอียดครบถ้วนตามมาตรฐาน MIL-STD-1530 และแนวทางของ ISO/IEC 27001 ซึ่งช่วยให้สามารถตรวจสอบและติดตามกิจกรรมต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ ระบบยังผ่านการทดสอบความสอดคล้องกับมาตรฐานทางทหารที่สำคัญ อาทิ MIL-STD-810 ที่ครอบคลุมการทดสอบด้านสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ความร้อน ความชื้น และแรงสั่นสะเทือน เพื่อรับประกันว่าระบบสามารถทำงานได้ในสภาวะที่รุนแรงและหลากหลาย รวมถึง MIL-STD-461 ที่ทดสอบด้านการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อป้องกันการรบกวนและรักษาความเสถียรของระบบในสนามรบ

ในส่วนของการปลอดภัยทางไซเบอร์ ระบบ ASD ได้ผ่านการทำ penetration testing อย่างเข้มข้น เพื่อประเมินจุดอ่อนและยืนยันว่ากลไกการเข้ารหัสข้อมูล รวมถึงระบบควบคุมสิทธิ์ สามารถป้องกันการโจมตีหรือการเข้าถึงข้อมูลโดยไม่ได้รับอนุญาตได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีการทดสอบระบบ log และ audit trail เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถตรวจสอบย้อนหลังได้ในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ผิดปกติ

การดำเนินการทดสอบเหล่านี้ช่วยให้มั่นใจว่า ระบบ ASD ไม่เพียงแต่ตอบสนองต่อข้อกำหนดด้านความปลอดภัยและมาตรฐานทางทหารเท่านั้น แต่ยังสามารถ

ปฏิบัติงานในการกิจจริงได้อย่างมั่นคงและน่าเชื่อถือ ภายใต้โปรโตคอลของกองทัพ ซึ่งทำให้ระบบได้รับการยอมรับและพร้อมใช้งานในสภาพแวดล้อมที่เข้มงวดและมีความเสี่ยงสูง

5.2.6 การติดตั้งและการใช้งาน (Deployment)

คำอธิบายแนวคิด: ระบบต้องสามารถติดตั้งได้อย่างรวดเร็วในพื้นที่ปฏิบัติการจริง โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาผู้เชี่ยวชาญ และไม่ส่งผลกระทบต่อระบบที่มีอยู่

วัตถุประสงค์: เพื่อให้ระบบสามารถใช้งานได้ทันทีหลังจากการติดตั้ง แม้ในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดเรื่องอุปกรณ์ เวลา หรือทรัพยากรบุคคล

บริบทการประเมิน: เน้นการประเมินโดยให้ผู้ปฏิบัติงานภาคสนาม หรือผู้แทนจากหน่วยงานที่มีหน้าที่บูรณาการระบบ เช่น ฝ่ายสื่อสารหรือฝ่ายโลจิสติกส์ทางทหาร การประเมินจะดำเนินในสภาพแวดล้อมจำลองหรือพื้นที่จริง เพื่อทดสอบความง่ายในการติดตั้ง ความรวดเร็วในการเริ่มใช้งาน และผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับระบบที่มีอยู่เดิม ทั้งนี้จะพิจารณาด้วยว่าในสถานการณ์เร่งด่วนหรือในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านอุปกรณ์และบุคลากร ระบบยังสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพหรือไม่

แนวทางการประเมิน: ทดสอบการติดตั้งในสภาพแวดล้อมจำลอง ประเมินเวลาที่ใช้ในการติดตั้ง และตรวจสอบเอกสารและคู่มือการติดตั้ง

กรณีศึกษาระบบ ASD: การติดตั้งแบบ container-based deployment ซึ่งหมายถึงการแพ็คเกจระบบและส่วนประกอบทั้งหมดไว้ใน "กล่อง" ซอฟต์แวร์ขนาดเล็กที่พร้อมใช้งาน ทำให้การติดตั้งและตั้งค่าระบบเป็นไปอย่างรวดเร็วและง่ายดาย สามารถทำได้ภายในเวลาไม่ถึง 30 นาทีบนเครื่องมาตรฐานทั่วไป โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านไอทีหรือระบบเครือข่าย นอกจากนี้ ระบบยังออกแบบให้สามารถทำงานร่วมกับระบบเดิมได้อย่างราบรื่นโดยไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานปกติในพื้นที่จริง

ในกระบวนการทดสอบการติดตั้งระบบ ASD ได้รับการประเมินในสภาพแวดล้อมจำลองและสภาพแวดล้อมจริง เพื่อวัดระยะเวลาการติดตั้งและตั้งค่า รวมถึง

รวบรวมความคิดเห็นจากผู้ใช้งานจริงเกี่ยวกับความชัดเจนของคู่มือการติดตั้ง ความง่ายในการปฏิบัติงาน และปัญหาที่พบระหว่างการติดตั้ง ผลการประเมินชี้ให้เห็นว่า ASD สามารถลดความซับซ้อนของกระบวนการติดตั้งได้อย่างมีนัยสำคัญ และทำให้ระบบพร้อมใช้งานได้อย่างรวดเร็ว แม้ในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดเรื่องทรัพยากรบุคคลหรืออุปกรณ์

นอกจากนี้ การใช้แพ็คเกจระบบยังช่วยให้การอัปเดตและบำรุงรักษาระบบในภายหลังเป็นไปอย่างรวดเร็วและไม่รบกวนการทำงานของระบบหลัก ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการระบบในภาคสนามได้อย่างดี

5.2.7. การบำรุงรักษา (Maintenance)

คำอธิบายแนวคิด: ระบบควรออกแบบให้สามารถตรวจสอบ แก้ไข และอัปเดตได้ง่าย เพื่อรองรับการดูแลรักษาระยะยาว และปรับปรุงตามการเปลี่ยนแปลงของภารกิจ

วัตถุประสงค์: เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและทันสมัยตลอดวงจรชีวิต

แนวทางการประเมิน: ตรวจสอบการรองรับการอัปเดตและการย้อนกลับเวอร์ชัน วิเคราะห์เครื่องมือและอินเทอร์เฟซสำหรับผู้ดูแลระบบ และตรวจสอบระบบแจ้งเตือนและบันทึกสถานะ

บริบทการประเมิน: การประเมินมิตินี้มักดำเนินการโดยผู้ดูแลระบบหรือหน่วยสนับสนุนทางเทคนิค เช่น ฝ่ายซ่อมบำรุง โดยอาจใช้การทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือการใช้งานจริงในระยะเวลาหนึ่ง เพื่อตรวจสอบความง่ายในการบำรุงรักษา ความรวดเร็วในการแก้ไขปัญหา และผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนส่วนประกอบหรือซอฟต์แวร์ภายใต้ข้อจำกัดของภาคสนาม

กรณีศึกษาระบบ ASD: การออกแบบให้รองรับการบำรุงรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพในระยะยาว โดยมีโมดูล health monitoring สำหรับตรวจสอบสถานะระบบและแจ้งเตือนอัตโนมัติเมื่อพบความผิดปกติ เช่น ความล้มเหลวของเซนเซอร์ การเชื่อมต่อขัดข้อง หรือทรัพยากรระบบไม่เพียงพอ นอกจากนี้ ASD ยังมี

อินเทอร์เน็ตสำหรับผู้ดูแลระบบที่สามารถจัดการกับการอัปเดตซอฟต์แวร์ (patch management) และการย้อนกลับเวอร์ชัน (rollback) ได้อย่างสะดวก

จากการทดสอบการบำรุงรักษาในสถานการณ์จำลอง ทีมพัฒนาสามารถอัปเดตซอฟต์แวร์โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบหลัก และเมื่อจำลองการเปลี่ยนฮาร์ดแวร์หรืออุปกรณ์เชื่อมต่อ ระบบสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงและปรับตัวได้โดยไม่ต้องตั้งค่าใหม่ทั้งหมด คู่มือการดูแลระบบมีความชัดเจน ครอบคลุมขั้นตอนการบำรุงรักษา ทั้งในส่วนของการซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ ช่วยให้เจ้าหน้าที่ที่ไม่ใช่ผู้พัฒนาสามารถดูแลระบบได้อย่างมั่นใจ

5.3 ข้อดีที่ได้รับจากการประยุกต์ใช้กรอบ MSQA

การประยุกต์ใช้กรอบการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์ MSQA กับระบบ ASD ช่วยส่งเสริมการดำเนินโครงการให้มีความเป็นระบบและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการวางแผนที่มีเป้าหมายชัดเจน MSQA ช่วยให้สามารถระบุคุณลักษณะด้านคุณภาพที่สำคัญ เช่น ความทนทาน การบำรุงรักษา และความสามารถในการทำงานร่วมกับระบบอื่น ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานในการกำหนดเกณฑ์และแนวทางการทดสอบตั้งแต่ระยะแรกของการพัฒนา ทั้งยังมีการจัดทำเอกสารเกณฑ์การประเมินในแต่ละมิติเพื่อใช้ประกอบการหารือกับหน่วยผู้ใช้งาน ทำให้สามารถลดระยะเวลาในการกำหนดข้อกำหนดระบบ เมื่อเปรียบเทียบกับโครงการพัฒนาอื่นก่อนหน้า

กรอบ MSQA ยังช่วยลดความเสี่ยงในการดำเนินโครงการด้วยแนวทางการประเมินที่มีโครงสร้างชัดเจน โดยสามารถระบุจุดอ่อนหรือความไม่สอดคล้องได้ตั้งแต่ต้น ตัวอย่างเช่น การตรวจพบปัญหาด้านการบูรณาการระบบ (integration) ในช่วงต้นของโครงการ ทำให้สามารถวางแผนเปลี่ยนสายสัญญาณเดิมให้สามารถทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์สมัยใหม่ได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้ต้องมีการปรับแผนด้านการเชื่อมต่อและการแปลงหัวต่อใหม่ตั้งแต่ระยะแรก

ด้านการสื่อสารและการตรวจสอบย้อนกลับ MSQA ช่วยให้การประสานงานระหว่างทีมพัฒนาและผู้ใช้งานภาคสนามมีความราบรื่นมากยิ่งขึ้น เนื่องจากมีเกณฑ์ที่ชัดเจนในการประเมินคุณภาพ ช่วยให้การออกแบบระบบตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมและข้อกำหนดภารกิจได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งการใช้แบบฟอร์มตรวจสอบ (checklist) และเอกสารบันทึกผลตามกรอบ MSQA ยังช่วยให้สามารถติดตามสถานะของแต่ละมิติการทดสอบได้อย่างโปร่งใส และสามารถตรวจสอบย้อนหลังได้โดยสะดวก

นอกจากนี้ MSQA ยังเอื้อต่อการทดสอบที่ครอบคลุมและสามารถวัดผลได้จริงในสภาพแวดล้อมการใช้งานที่หลากหลาย โดยการทดสอบในแต่ละมิติได้รวม การรองรับภาระงานสูง (Stress Test) การทำงานต่อเนื่องเมื่อเกิดความล้มเหลว (Failover Test) การใช้งานของผู้ใช้ (Usability Test) และความสอดคล้องตามข้อกำหนดหรือมาตรฐาน (Compliance Test) ช่วยให้สามารถประเมินระบบได้อย่างรอบด้านและลึกซึ้ง สอดคล้องกับข้อจำกัดและลักษณะเฉพาะของบริบทภาคสนามอย่างแท้จริง

5.4 ข้อสังเกตเบื้องต้น

จากการประยุกต์ใช้กรอบการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์ MSQA ในโครงการพัฒนาระบบซอฟต์แวร์ทางทหาร พบว่ากรอบดังกล่าวสามารถสนับสนุนการดำเนินงานได้อย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะในบริบทที่มีข้อจำกัดด้านเวลา ทรัพยากร และบุคลากร อย่างไรก็ตาม การประเมินภาคสนามสะท้อนข้อจำกัดบางประการที่ควรนำไปพิจารณาเพื่อปรับปรุงกรอบ MSQA ให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น อาทิ มิติบางด้าน เช่น Deployment และ Durability อาจต้องมีความต้องการประเมินที่ยืดหยุ่นมากขึ้น เพื่อให้สามารถรองรับเทคโนโลยีใหม่หรือระบบเฉพาะทางที่ไม่สอดคล้องกับแนวทางการประเมินแบบเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งการประเมินในกรณีศึกษาครอบคลุมเฉพาะซอฟต์แวร์ เนื่องจากฮาร์ดแวร์ยังคงมีความหลากหลายตามบริบทการใช้งานจริง ซึ่งทำให้การกำหนดเกณฑ์การประเมินในบางด้าน เช่น ความทนทาน

ของอุปกรณ์ หรือการติดตั้งเฉพาะรุ่น ไม่สามารถกำหนดเป็นมาตรฐานกลางได้อย่างเหมาะสม

นอกจากนี้ การขาดช่องทางสำหรับให้ผู้ใช้งานหรือผู้ปฏิบัติงานภาคสนามสะท้อนข้อจำกัดหรือสภาพการณ์จริงกลับเข้าสู่กระบวนการประเมิน อาจส่งผลให้ผลการประเมินขาดความครอบคลุมต่อบริบทเฉพาะของการใช้งาน ขณะที่ความสำเร็จของกระบวนการประเมินยังคงขึ้นอยู่กับระดับความร่วมมือระหว่างผู้พัฒนา ผู้ประเมิน และผู้ใช้งานปลายทาง ซึ่งการส่งเสริมให้เกิดการมีส่วนร่วมของทุกฝ่ายตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดกระบวนการจะช่วยให้การประเมินมีประสิทธิภาพ และสะท้อนข้อเท็จจริงของการใช้งานได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

ข้อสังเกตเหล่านี้สามารถใช้เป็นแนวทางปรับปรุง MSQA ให้มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น และรองรับความหลากหลายของบริบทการใช้งานจริงกับต้นแบบระบบซอฟต์แวร์ได้ดียิ่งขึ้นในอนาคต

6. สรุปผลและอภิปรายผล

บทความนี้ได้นำเสนอกรอบการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์ MSQA ที่ออกแบบให้เหมาะสมกับระบบซอฟต์แวร์ในบริบททางทหาร โดยผสมผสานแนวคิดจากมาตรฐาน ISO/IEC 25010 และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ครอบคลุมประเด็นสำคัญทั้งด้านความปลอดภัย ความทนทาน การบำรุงรักษา และความสามารถในการติดตั้งใช้งานจริง

กรอบ MSQA ช่วยให้ผู้สามารถประเมินได้อย่างเป็นระบบ มีความยืดหยุ่นต่อบริบทเฉพาะ และรองรับความต้องการเฉพาะด้านของระบบทางทหาร กรณีศึกษาที่นำเสนอแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ MSQA ในการสนับสนุนการพัฒนาและทดสอบระบบจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยจากการทดลองใช้ MSQA กับระบบแสดงผลเรดาร์ พบว่าระบบสามารถผ่านเกณฑ์การประเมินทั้ง 7 มิติ เช่น ประสิทธิภาพการทำงานที่ตอบสนองภารกิจในสภาพแวดล้อมจริง ความสามารถในการบูรณาการกับระบบเดิม และความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ท้าทาย การประเมินช่วยให้ทีมพัฒนาวางแผนเชิงระบบและจัดลำดับความสำคัญของคุณภาพตั้งแต่ระยะแรก ลดความเสี่ยงและเวลาการแก้ไขซ้ำ

นอกจากนี้ MSQA ยังส่งเสริมการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพระหว่างผู้พัฒนาและผู้ใช้งาน ทำให้การรับมือและตรวจสอบระบบเป็นไปอย่างราบรื่น

ผลลัพธ์เหล่านี้สะท้อนว่ากรอบ MSQA สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในองค์กรที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร ความเสี่ยงสูง และต้องการการควบคุมคุณภาพอย่างเป็นระบบและโปร่งใสตลอดวงจรชีวิตของระบบ ซึ่งทำให้ MSQA เป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการต่อยอดและใช้งานในภาคส่วนอื่นที่มีข้อกำหนดเข้มงวด เช่น ระบบทางทหาร หรือระบบสำคัญเชิงยุทธศาสตร์

7. ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ

แม้ว่ากรอบการประเมิน MSQA จะได้รับการออกแบบให้ครอบคลุมประเด็นสำคัญของซอฟต์แวร์ทางทหาร และมีความยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้กับบริบทที่หลากหลาย แต่อย่างไรก็ตาม จากการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ยังพบข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณาเพิ่มเติม ดังนี้

- 1) การประเมินกรอบ MSQA ในงานวิจัยนี้ดำเนินการเฉพาะกับระบบแสดงผลข้อมูลเรดาร์เพียงระบบเดียว คือ ระบบ ASD ซึ่งแม้จะเป็นระบบที่มีการใช้งานจริงในภาคสนาม แต่ยังไม่สามารถสะท้อนความหลากหลายหรือความซับซ้อนของซอฟต์แวร์ทางการทหารประเภทอื่น เช่น ระบบควบคุมอาวุธ ระบบสื่อสาร หรือระบบสนับสนุนการตัดสินใจ
- 2) ระบบทางทหารบางประเภทอาจมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากระบบ ASD เช่น ระบบที่ต้องทำงานร่วมกับฮาร์ดแวร์เฉพาะทาง หรือระบบควบคุมที่มีข้อกำหนดด้านความปลอดภัยและความมั่นคงในระดับสูง ซึ่งระบบเหล่านี้อาจต้องการเกณฑ์หรือวิธีการประเมินที่มีความเฉพาะเจาะจงมากกว่าที่ระบุไว้ในกรอบ MSQA
- 3) การใช้งานกรอบ MSQA อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องอาศัยความเข้าใจร่วมกันจากผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง เช่น วิศวกร ผู้ประเมิน และผู้ใช้งานปลายทาง จึงอาจต้องมีการจัดทำคู่มือแนวทางการใช้งานที่ชัดเจน รวมถึงการฝึกอบรม

เพื่อสร้างความตระหนักรู้และส่งเสริมการยอมรับ

จากข้อจำกัดที่พบเหล่านี้ จึงควรมีการพัฒนาและปรับปรุง MSQA ให้สามารถตอบสนองความต้องการของระบบเฉพาะทางได้มากขึ้น รวมถึงสนับสนุนการใช้งานในสถานการณ์จริงที่มีข้อจำกัดแตกต่างกัน เพื่อให้กรอบนี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์ทางการทหารได้อย่างครบถ้วนและยั่งยืนในระยะยาว

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) รหัสโครงการ N23A671094

9. บรรณานุกรม

- [1] Toropin, K. (2022, September 20). *Sailors' medical discharges halted for almost a week due to computer glitch*. Military.com. Retrieved from <http://www.military.com/daily-news/2022/09/20/sailors-medical-discharges-halted-almost-week-due-computer-glitch.html> on March 10, 2025
- [2] Cluley, G. (2023, April 18). *Army helicopter crash blamed on skipped software patch*. Bitdefender. Retrieved from <http://www.bitdefender.com/en-us/blog/hotforsecurity/army-helicopter-crash-blamed-on-skipped-software-patch> on March 10, 2025
- [3] International Organization for Standardization. (2011). *ISO/IEC 25010:2011 - Systems and software engineering - Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) - Quality model*. Retrieved from <http://cdn.Standards.iten.ai/samples/35733/2ca18b477b7845a5b8cae39d6de0c098/ISO-IEC-25010-2011.pdf>
- [4] International Organization for Standardization. (n.d.). *ISO/IEC 25010*. Retrieved from <http://iso25000.com/index.php/en/iso-25000-standards/iso-25010> on March 10, 2025
- [5] Department of Defense. (1994). *MIL-STD-498: Software development and documentation*. Retrieved from <http://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA282003.pdf> on March 10, 2025
- [6] Department of Defense. (2000). *MIL-STD-882: System safety*.
- [7] Department of Defense. (1999). *MIL-STD-1397C: Digital communication protocols for military systems*. Retrieved from http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1300-1399/MIL-STD-1397C_554/ on March 10, 2025
- [8] International Organization for Standardization. (2017). *ISO/IEC/IEEE 12207: Systems and software engineering - Software life cycle processes*. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/document/8100771> on March 10, 2025
- [9] International Organization for Standardization. (2003). *ISO/IEC 15504: Information technology - Process assessment*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/63712.html> on March 10, 2025
- [10] International Organization for Standardization. (2013). *ISO/IEC 27001: Information security management systems - Requirements*. Retrieved from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:27001:ed-1:v1:en> on March 10, 2025
- [11] International Organization for Standardization. (2011). *ISO/IEC 29110: Systems and software engineering*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/85337.html> on March 10, 2025
- [12] Department of Defense. (2019). *MIL-STD-810: Environmental testing*. Retrieved from <https://ebindustries.com/wp-content/uploads/2021/11/MIL-STD-810.pdf> on March 10, 2025
- [13] Department of Defense. (2015). *MIL-STD-461: Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment*. Retrieved from https://quicksearch.dla.mil/qsDocDetails.aspx?ident_number=35789 on March 10, 2025
- [14] Wagner, S., Felderer, M., & Fernández, D. M. (2017). Quality requirements in industrial practice - an empirical study. *Requirements Engineering*, 22(3), 331-355.
- [15] Alnanih, R., Ormandjieva, O., & Radhakrishnan, T. (2014). A Systematic Approach for Evaluating Software Quality Using ISO/IEC 25010. *Procedia Computer Science*, 37, 337-344.

การพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหุ่นยนต์ในกองทัพไทย : ความท้าทายและโอกาส The Development and Application of Robotics Technology in the Royal Thai Armed Forces : Challenges and Opportunities

ธัญวารีย์ อมรภูวดล¹, อรณิชา คงวุฒิ²,
พัฒนศรีบุญ เลหาไพบุณย์³, วุฒิรงค์ คงวุฒิ^{4*}
Thanwaree Amornpoovadol¹, Ornnicha Kongwut²
Phatsaran Laohhapaiboon³, Wuttirong Kongwut^{4*}

¹โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

¹The Demonstration School of Kanchanaburi Rajabhat University

²สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

²Department of Physics Faculty of Science and Technology

Kanchanaburi Rajabhat University

³บุญพาวาสนาสง 84 เขตบางแค กรุงเทพมหานคร

³Boonpawassanasong 84 Bangkae Bangkok

⁴ศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศกองทัพอากาศ กรุงเทพมหานคร

⁴Research and Development Centre for Space and Aeronautical Science and Technology,
Royal Thai Air Force, Bangkok

*Corresponding Author. E-mail: wuttirong_k@rtaf.mi.th

(Received: June 23, 2024, Revised: July 21, 2024, Accepted: July 31, 2024)

บทคัดย่อ: บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสถานการณ์ การพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหุ่นยนต์ในกองทัพต่างประเทศ และวิเคราะห์ความท้าทายและโอกาสในการนำเทคโนโลยีหุ่นยนต์มาใช้ในกองทัพไทย ผลการศึกษาพบว่าประเทศมหาอำนาจทางการทหารให้ความสำคัญกับการพัฒนาหุ่นยนต์ทางทหารอย่างต่อเนื่อง และมีการนำหุ่นยนต์ไปใช้ในการภารกิจที่หลากหลาย ขณะที่กองทัพไทยอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนาและประยุกต์ใช้หุ่นยนต์ในกิจการทางทหาร โดยมีความท้าทายด้านงบประมาณ เทคโนโลยี และความพร้อมของบุคลากร อย่างไรก็ตามกองทัพไทยมีความพยายามผลักดันการวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์ ผ่านความร่วมมือกับสถาบันวิจัยและมหาวิทยาลัย รวมถึงการจัดหาหุ่นยนต์จากต่างประเทศ การศึกษานี้มีข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการส่งเสริมการพัฒนาและการประยุกต์ใช้หุ่นยนต์ในกองทัพไทย ได้แก่ การกำหนดนโยบายและแผนแม่บทที่ชัดเจน การจัดสรรงบประมาณ การส่งเสริมความร่วมมือกับภาคการศึกษาและอุตสาหกรรม การพัฒนาบุคลากร และการจัดตั้งหน่วยงานกลาง ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการลงทุนพัฒนาเทคโนโลยีหุ่นยนต์อย่างเป็นระบบและต่อเนื่อง จะช่วยเพิ่มขีดความสามารถของกองทัพไทย ลดการสูญเสียกำลังพล และวางรากฐานของอุตสาหกรรมป้องกันประเทศในระยะยาว

คำสำคัญ: หุ่นยนต์ทางทหาร เทคโนโลยีทางการทหาร กองทัพไทย

Abstract: This article aims to examine the development and application of robotics technology in foreign military forces and analyze the challenges and opportunities for implementing robotics technology in the Royal Thai Armed Forces. The study finds that military superpowers have been continuously investing in the development of military robots and deploying them in various missions. The Royal Thai Armed Forces is in the initial stage of developing and applying robotics technology in military affairs, facing challenges in budget, technology, and personnel readiness. However, the Royal Thai Armed Forces has been pushing for research and development of robots through collaboration with research institutes and universities, as well as acquiring robots from abroad. This study offers policy recommendations to promote the development and application of robotics in the Royal Thai Armed Forces, including establishing clear policies and master plans, allocating budgets, fostering collaboration with the education and industrial sectors, developing personnel, and establishing a central agency. The findings suggest that systematic and continuous investment in robotics technology will enhance the capabilities of the Royal Thai Armed Forces, reduce personnel losses, and lay the foundation for the long-term defense industry.

Keywords: Military robots, Military technology, Royal Thai Armed Forces

1. บทนำ

ในยุคที่เทคโนโลยีก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว การนำนวัตกรรมด้านหุ่นยนต์มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนากองทัพให้ทันสมัยนั้น ถือเป็นสิ่งสำคัญและหลีกเลี่ยงไม่ได้ หุ่นยนต์ได้เข้ามามีบทบาทในการปฏิวัติรูปแบบการทำการสงครามสมัยใหม่อย่างมาก โดยเฉพาะในกองทัพประเทศมหาอำนาจอย่างสหรัฐอเมริกา จีน และรัสเซีย ที่ต่างก็ทุ่มงบประมาณจำนวนมหาศาลเพื่อการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีหุ่นยนต์ทางทหาร ยกตัวอย่างเช่น ในปีงบประมาณ 2020 กระทรวงกลาโหมสหรัฐฯ ได้จัดสรรงบประมาณกว่า 3.7 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ สำหรับโครงการวิจัยและจัดซื้อยานพาหนะไร้คนขับและหุ่นยนต์ทางทหาร ซึ่งเพิ่มขึ้นถึง 28% จากปีงบประมาณ 2019 [1] สะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญที่สหรัฐฯ ให้ความสำคัญกับการพัฒนาขีดความสามารถหุ่นยนต์เพื่อสร้างความได้เปรียบในการทำสงครามยุคใหม่ ในขณะเดียวกัน จีนก็เร่งพัฒนาหุ่นยนต์และปัญญาประดิษฐ์ในการทหารอย่างจริงจัง โดยรัฐบาลจีนได้ประกาศแผนยุทธศาสตร์การพัฒนาอุตสาหกรรมหุ่นยนต์ ฉบับปี 2016-2020 ตั้งเป้าให้การผลิตหุ่นยนต์ในประเทศเติบโตกว่า 20% ต่อปี และผลักดันให้จีนก้าวขึ้นเป็นประเทศผู้นำด้านหุ่นยนต์ของ

โลกภายในปี 2025 [2] หุ่นยนต์ทหารถือเป็นหนึ่งในประเภทหุ่นยนต์สำคัญตามแผนยุทธศาสตร์นี้ด้วยประเทศไทยในฐานะประเทศที่มีศักยภาพและกำลังเติบโตในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ กองทัพไทยจึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับการปรับตัวและพัฒนาขีดความสามารถของกำลังพลให้พร้อมเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงของสงครามสมัยใหม่ การนำเทคโนโลยีด้านหุ่นยนต์มาประยุกต์ใช้ในการฝึก ปฏิบัติการ และสนับสนุนการเตรียมความพร้อมทางทหารจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และลดความเสี่ยงต่อชีวิตกำลังพลได้อย่างมาก อย่างไรก็ตาม หากพิจารณางบประมาณด้านการป้องกันประเทศของไทยในปี 2020 ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 7,300 ล้านเหรียญสหรัฐฯ หรือคิดเป็น 1.4% ของ GDP [3] ยังถือว่ามีความล่าช้าจำกัดเมื่อเทียบกับประเทศมหาอำนาจ ดังนั้นการลงทุนในเทคโนโลยีหุ่นยนต์ของกองทัพไทย จึงต้องมีการจัดลำดับความสำคัญและเลือกประเภทหุ่นยนต์ที่เหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศ ภารกิจ และบริบทของสงครามที่สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ด้านความมั่นคงของไทยเป็นหลักในบทความนี้ ผู้เขียนจะขอเสนอภาพรวมของการพัฒนาและการใช้หุ่นยนต์ในสงครามของประเทศชั้นนำ เปรียบเทียบกับสถานการณ์ของไทยในปัจจุบัน พร้อมทั้งเสนอแนวทางและโอกาสในการส่งเสริมการ

ประยุกต์ใช้หุ่นยนต์ที่เหมาะสมกับบริบทของกองทัพไทย เพื่อเตรียมพร้อมรับมือกับความท้าทายทางด้านความมั่นคงในอนาคต

2. ภาพรวมการใช้หุ่นยนต์ในกองทัพต่างประเทศ

ปัจจุบันหลายประเทศชั้นนำได้นำหุ่นยนต์ และระบบอัตโนมัติมาใช้ในกิจการทางทหารอย่างกว้างขวาง โดยหุ่นยนต์ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการภารกิจที่หลากหลาย ตั้งแต่การลาดตระเวน การเก็บกู้วัตถุระเบิด ไปจนถึงการสู้รบในสนามรบ ซึ่งช่วยเพิ่มขีดความสามารถให้กับกำลังพล และลดการสูญเสียชีวิตได้อย่างมาก สหรัฐอเมริกาเป็นประเทศผู้นำในการพัฒนาและใช้หุ่นยนต์ทางทหาร โดยกองทัพสหรัฐฯ มีหุ่นยนต์ประจำการอยู่หลายประเภทโดยในปี 2023 กองทัพสหรัฐฯ มีอากาศยานไร้คนขับประจำการกว่า 11,000 ลำ และยานภาคพื้นดินไร้คนขับมากกว่า 12,000 หน่วย การใช้หุ่นยนต์ในกิจการทางทหารของสหรัฐฯ ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่น ในปฏิบัติการ Operation Inherent Resolve ในอิรัก อากาศยานไร้คนขับ MQ-9 Reaper ได้ปฏิบัติการกิจเฝ้าตรวจและโจมตีมากกว่า 24,000 ชั่วโมงบิน ช่วยลดความเสี่ยงต่อชีวิตนักบินอย่างมีนัยสำคัญ [4] และมีการเพิ่ม อากาศยานไร้คนขับ (UAV) อย่าง MQ-9 Reaper ซึ่งถูกใช้ในการกิจการลาดตระเวนและโจมตีทางอากาศ ยานภาคพื้นดินไร้คนขับ (UGV) เช่น PackBot ที่ใช้สำรวจและเก็บกู้วัตถุระเบิด รวมถึงหุ่นยนต์ลำเลียงสัมภาระอย่าง BigDog ที่ช่วยแบ่งเบาภาระของทหารในสนาม [5] จีนก็กำลังเร่งพัฒนาหุ่นยนต์ทางการทหารเช่นกัน โดยบริษัท Norinco ผู้ผลิตยุทธโธปกรณ์รายใหญ่ของจีน ได้เปิดตัวหุ่นยนต์สู้รบ (Combat robot) อย่าง “Leifeng” ซึ่งติดอาวุธปืนกลและจรวดนำวิถี สามารถปฏิบัติการได้ในสภาพภูมิประเทศที่ยากลำบาก [6]

นอกจากนี้ กองทัพจีนยังมีการพัฒนาโดรน ขนาดเล็กแบบ “หุ่นยนต์ฝูง” (Swarm robots) ที่สามารถปฏิบัติการเป็นกลุ่มก้อนและโจมตีเป้าหมายพร้อมกันจำนวนมาก ส่วนรัสเซียเองก็มีการพัฒนาหุ่นยนต์ เพื่อใช้ในสงครามเช่นกัน อย่างเช่นหุ่นยนต์ Uran-9 ซึ่งเป็น

ยานรบหุ้มเกราะไร้คนขับ ติดตั้งปืนกลอัตโนมัติ 30 มม. และอาวุธปล่อยนำวิถี สามารถปฏิบัติการได้ทั้งแบบอัตโนมัติและควบคุมระยะไกล โดยได้ถูกนำไปใช้งานจริงในสงครามซีเรีย เพื่อสนับสนุนกองกำลังรัสเซีย [7] ขณะที่อิสราเอลก็เป็นผู้บุกเบิกอีกชาติหนึ่ง ในการใช้หุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติในกองทัพ โดยมีการใช้อากาศยานไร้คนขับและหุ่นยนต์สำรวจทางภาคพื้นดินหลายทศวรรษแล้ว ระบบ Guardium UGV เป็นหุ่นยนต์ลาดตระเวนติดอาวุธปืนกลที่ใช้เฝ้าระวังพื้นที่ชายแดน ส่วนหุ่นยนต์กู้ระเบิด เช่น Micro Tactical Ground Robot (MTGR) ก็ถูกใช้ค้นหาและทำลายกับระเบิดในพื้นที่เสี่ยงอันตราย [8]

การใช้หุ่นยนต์ในกองทัพสมัยใหม่นั้นมีประโยชน์และข้อได้เปรียบหลายประการ [9] ได้แก่

1. ลดการสูญเสียชีวิตของกำลังพล: หุ่นยนต์สามารถเข้าไปปฏิบัติการในพื้นที่อันตรายแทนมนุษย์ได้ เช่น การเก็บกู้ระเบิด การลาดตระเวนในพื้นที่เสี่ยง ช่วยลดความเสี่ยงต่อชีวิตทหาร

2. เพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำ: หุ่นยนต์สามารถปฏิบัติการได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เหนื่อยล้า มีความแม่นยำสูงกว่ามนุษย์ในบางภารกิจ เช่น การตรวจจับและเล็งเป้าหมาย

3. ขยายขีดความสามารถในการปฏิบัติการ: หุ่นยนต์ช่วยให้ทหารสามารถปฏิบัติการได้ในพื้นที่ห่างไกล สภาพแวดล้อมที่เป็นอันตราย หรือในสถานการณ์ที่มีความเสี่ยงสูง เช่น การสำรวจพื้นที่ปนเปื้อนรังสี

4. เชื่อมต่อเครือข่ายทางทหารและส่งข้อมูลได้แบบเรียลไทม์: หุ่นยนต์สามารถถ่ายทอดข้อมูลภาพ เสียง และข้อมูลตำแหน่งได้แบบเรียลไทม์ ผ่านระบบเครือข่ายทางทหารช่วยให้ผู้บัญชาการมีข้อมูลที่ครบถ้วนและทันสถานการณ์ในการตัดสินใจ

5. คุ่มค่าในระยะยาว: แม้จะมีต้นทุนสูงในช่วงแรก แต่เมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในการฝึกและดูแลกำลังพลจำนวนมากแล้ว การลงทุนในหุ่นยนต์จะให้ความคุ้มค่ามากกว่าในระยะยาว

นอกจากนี้ ศักยภาพของหุ่นยนต์ทางทหารยังสามารถเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อนำไปประกอบเข้ากับเทคโนโลยีอื่น ๆ โดยเฉพาะปัญญาประดิษฐ์ (AI) และอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) การผสมผสานเทคโนโลยี

เหล่านี้สามารถยกระดับความสามารถของหุ่นยนต์ในการตัดสินใจอัตโนมัติ การวิเคราะห์สถานการณ์แบบเรียลไทม์ และการทำงานร่วมกันเป็นเครือข่าย ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติภารกิจทางทหารได้อย่างมีนัยสำคัญจะเห็นได้ว่า ประเทศมหาอำนาจทั้งหลายต่างก็ให้ความสำคัญกับการวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ทางการทหาร โดยมีการใช้หุ่นยนต์หลายประเภทในภารกิจที่หลากหลาย ช่วยเพิ่มขีดความสามารถ ประสิทธิภาพ และความปลอดภัยให้กับกำลังพลได้เป็นอย่างดี นับเป็นการปฏิวัติวิธีการทำสงครามรูปแบบใหม่อย่างแท้จริง

3. สถานการณ์การพัฒนาและใช้งานหุ่นยนต์ในกองทัพไทยปัจจุบัน

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา กองทัพไทยเริ่มให้ความสนใจกับการนำเทคโนโลยีหุ่นยนต์มาประยุกต์ใช้ในการทหารมากขึ้น โดยมีความร่วมมือกับหน่วยงานวิจัยทั้งภาครัฐและเอกชนในการพัฒนาหุ่นยนต์ เพื่อใช้ในภารกิจด้านความมั่นคง อย่างไรก็ตาม เมื่อเทียบกับกองทัพประเทศชั้นนำแล้ว การพัฒนาและใช้งานหุ่นยนต์ในกองทัพไทยยังอยู่ในขั้นเริ่มต้น และยังมีข้อจำกัดทั้งด้านงบประมาณและเทคโนโลยี หนึ่งในหน่วยงานที่มีบทบาทสำคัญในการวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์ทางทหารของไทย คือ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) ซึ่งเป็นหน่วยงานวิจัยภายใต้กระทรวงกลาโหม สทป. มีผลงานวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์ทางทหารหลายโครงการ เช่น

- รถยนต์สำรวจไร้คนขับขนาดเล็ก (Mini-UGV) เป็นยานยนต์ขนาดเล็กติดกล้องและเซ็นเซอร์ สำหรับใช้ลาดตระเวนพื้นที่เสี่ยงภัย สามารถควบคุมระยะไกลผ่านสัญญาณวิทยุ มีระยะปฏิบัติการไกลสุด 1 กิโลเมตร [10]

- อากาศยานไร้คนขับ TUAV (Tactical Unmanned Aerial Vehicle) เป็นโดรนสำรวจทางยุทธวิธีพัฒนาโดย สทป. ร่วมกับบริษัท RV Connex สามารถถ่ายภาพทางอากาศความละเอียดสูง และรับส่งภาพเคลื่อนไหวแบบเรียลไทม์ผ่านสถานีควบคุมภาคพื้น มีพิสัยการบินไกลถึง 150 กิโลเมตร [2]

นอกจากนี้ กองทัพไทยยังมีการจัดหาหุ่นยนต์จากต่างประเทศด้วย อาทิ กองทัพบกไทยได้จัดซื้อหุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด AMROB (Autonomous Mobile Robot) จากบริษัท Milrem Robotics ของเอสโตเนีย จำนวน 5 ชุด เพื่อใช้ในพื้นที่จังหวัดชายแดนใต้ โดย AMROB เป็นหุ่นยนต์ขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา สามารถตรวจสอบวัตถุต้องสงสัยและทำลายระเบิดในพื้นที่จำกัด [11] พร้อมมีกรณีศึกษาการนำหุ่นยนต์มาใช้ในภารกิจของกองทัพไทยได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในพื้นที่เสี่ยงภัย ตัวอย่างเช่น ในปี 2022 หุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด AMROB ได้ถูกนำไปใช้ในพื้นที่จังหวัดชายแดนภาคใต้ สามารถตรวจพบและเก็บกู้วัตถุระเบิดได้มากกว่า 30 ครั้ง โดยไม่มีการสูญเสียกำลังพลความสำเร็จนี้ไม่เพียงแต่ช่วยรักษาชีวิตของเจ้าหน้าที่แต่ยังเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาความปลอดภัยในพื้นที่อีกด้วย กองทัพอากาศไทยเองก็มีแผนการจัดหาอากาศยานไร้คนขับ สำหรับภารกิจลาดตระเวนและเฝ้าตรวจการณ์ทางอากาศ โดยอยู่ระหว่างการประเมินข้อเสนอจากบริษัทผู้ผลิตโดรนชั้นนำจากหลายประเทศเพื่อเลือกรุ่นที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานด้านการข่าวกรองทางอากาศของไทยมากที่สุด [12]

การพัฒนาหุ่นยนต์ทางทหารของกองทัพไทยสอดคล้องกับ “ยุทธศาสตร์การป้องกันประเทศ กระทรวงกลาโหม พ.ศ. 2560 - 2579” ซึ่งจัดทำโดยสำนักนโยบายและแผนกลาโหม โดยยุทธศาสตร์นี้ได้กล่าวถึงการพัฒนากิจการอุตสาหกรรมป้องกันประเทศเพื่อการพึ่งพาตนเอง โดยให้ความสำคัญกับ AI และ Robotics เป็นพิเศษ การลงทุนในเทคโนโลยีหุ่นยนต์จึงถือเป็นการดำเนินการที่สอดคล้องกับวิสัยทัศน์ระยะยาวของกระทรวงกลาโหมในการเสริมสร้างขีดความสามารถในการป้องกันประเทศ [13] จะเห็นได้ว่า แม้สถานการณ์การพัฒนาและใช้งานหุ่นยนต์ในกองทัพไทย จะยังไม่ก้าวหน้าเท่ากองทัพประเทศมหาอำนาจ แต่กองทัพไทยก็ได้ตระหนักถึงความสำคัญ และประโยชน์ของเทคโนโลยีหุ่นยนต์ทางการทหาร จึงมีความพยายามผลักดันให้เกิดการวิจัยพัฒนาภายในประเทศ การจัดหา

หุ่นยนต์จากต่างชาติ รวมถึงส่งเสริมความร่วมมือกับภาคเอกชนในอุตสาหกรรมหุ่นยนต์ และปัญญาประดิษฐ์ เพื่อยกระดับขีดความสามารถด้านนี้ ให้ทัดเทียมกับต่างประเทศให้ได้มากขึ้นในอนาคต

4. วิเคราะห์ความท้าทายและโอกาสของกองทัพไทยในการพัฒนาและประยุกต์ใช้หุ่นยนต์

การนำเทคโนโลยีหุ่นยนต์มาประยุกต์ใช้ในกองทัพไทยนั้น แม้จะมีประโยชน์และความจำเป็นอย่างยิ่ง แต่ก็มาพร้อมกับความท้าทายหลายประการที่ต้องเผชิญ อาทิ

1. ความท้าทายด้านงบประมาณและ

การลงทุน: การวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์ทางทหารที่ทันสมัยนั้น มักต้องใช้เงินลงทุนสูงในการวิจัย ออกแบบ สร้างต้นแบบ และทดสอบ ซึ่งอาจเป็นข้อจำกัดสำหรับกองทัพไทย ที่มีงบประมาณไม่มากนัก โดยในปีงบประมาณ 2564 กระทรวงกลาโหมได้รับจัดสรรงบประมาณรวม 223,464 ล้านบาท [14] ซึ่งส่วนใหญ่ต้องใช้ในการจัดหายุทโธปกรณ์ บุคลากร และการฝึก ทำให้เหลืองบประมาณสำหรับการลงทุนในเทคโนโลยีหุ่นยนต์ค่อนข้างจำกัด

2. ความจำเป็นในการพัฒนาบุคลากร: หุ่นยนต์ทางทหารสมัยใหม่นั้น มีความซับซ้อนสูง จำเป็นต้องอาศัยบุคลากรที่มีความรู้ ความเชี่ยวชาญ เฉพาะทาง ทั้งในด้านการควบคุมระบบ ซอฟต์แวร์ และการซ่อมบำรุง กองทัพไทยจึงต้องให้ความสำคัญ กับการพัฒนาบุคลากรควบคู่ไปกับการจัดหาเทคโนโลยี ผ่านการฝึกอบรม การส่งกำลังพลไปศึกษาต่อในสาขาที่เกี่ยวข้อง ทั้งในและต่างประเทศ รวมถึงการสร้างความร่วมมือกับสถาบันการศึกษาและภาคอุตสาหกรรมเพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้ด้านหุ่นยนต์

3. การพัฒนาเทคโนโลยีภายในประเทศ: การพึ่งพาการนำเข้าหุ่นยนต์ทางทหารจากต่างประเทศเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ และอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงด้านการพึ่งพาทางเทคโนโลยีในระยะยาว กองทัพไทยจึงควรส่งเสริมให้เกิดการวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์ขึ้นเองภายในประเทศด้วย โดยอาศัยความร่วมมือจากหน่วยงานวิจัยของรัฐ เช่น สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) กับมหาวิทยาลัยและภาคเอกชนที่มีศักยภาพ

เพื่อสร้างฐานองค์ความรู้และกำลังการผลิตในประเทศให้แข็งแกร่ง ลดการพึ่งพาจากต่างชาติในระยะยาว

การนำหุ่นยนต์มาใช้ในกองทัพไทยก็มาพร้อมกับโอกาสที่สำคัญ [15-16] ได้แก่

1. โอกาสในการเพิ่มขีดความสามารถทางทหาร: การมีหุ่นยนต์ที่ทันสมัยจะช่วยเสริมขีดความสามารถให้กองทัพไทยในหลายด้าน เช่น การลาดตระเวนระยะไกล การเก็บกู้วัตถุระเบิด การสนับสนุนทางอากาศ การขนส่งสิ่งอุปกรณ์ และการสู้รบทางยุทธวิธี ช่วยให้กองทัพไทยมีความพร้อมและความสะดวกได้เปรียบในการป้องกันประเทศมากยิ่งขึ้น

2. โอกาสในการลดการสูญเสียกำลังพล: หุ่นยนต์สามารถเข้าไปปฏิบัติภารกิจในพื้นที่เสี่ยงอันตรายแทนกำลังพลได้ เช่น การลาดตระเวนในพื้นที่ที่อาจมีกับระเบิด หรือการสำรวจพื้นที่ปนเปื้อนหลังเหตุการณ์ทางเคมี ชีวะ รังสี และนิวเคลียร์ ช่วยป้องกันหรือลดความเสียหายที่ กำลังพลจะได้รับอันตรายหรือเสียชีวิตในหน้าที่

3. โอกาสในการกระตุ้นนวัตกรรมภายในประเทศ: ความต้องการใช้งานหุ่นยนต์ในกองทัพจะสร้างความต้องการและกระตุ้นให้เกิดการพัฒนา นวัตกรรมหุ่นยนต์ และปัญญาประดิษฐ์ภายในประเทศ ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของอุตสาหกรรมหุ่นยนต์ภายในประเทศ มีการลงทุนด้านการวิจัยและพัฒนาจากภาคเอกชนเพิ่มขึ้น นำไปสู่การสร้างนวัตกรรม สร้างงาน และยกระดับความสามารถการแข่งขันของประเทศในระยะยาวได้ ดังนั้น แม้การพัฒนาและประยุกต์ใช้หุ่นยนต์ในกองทัพไทย จะเผชิญกับความท้าทายด้านงบประมาณ กำลังพล และการพัฒนาเทคโนโลยีก็ตาม แต่ก็ถือเป็นการลงทุนที่คุ้มค่า หากมองถึงประโยชน์ในด้านการเพิ่มขีดความสามารถทางทหาร การรักษาชีวิตกำลังพล และการสร้างนวัตกรรมภายในประเทศที่จะตามมา ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยสู่อนาคต [17] จากตารางข้างต้น จะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์และกำลังพลต่างก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน หุ่นยนต์มีความได้เปรียบในเรื่องของความปลอดภัย ความแม่นยำ ความปลอดภัย และอายุการใช้งานที่ยาวนาน ในขณะที่กำลังพลมีข้อได้เปรียบด้านความยืดหยุ่น การตัดสินใจ การเรียนรู้ และความคุ้มค่าด้านค่าใช้จ่ายในระยะสั้น [18-19]

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบความสามารถในการทำงาน
และข้อดีข้อเสียของหุ่นยนต์และกำลังพล
สามารถสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

คุณลักษณะ	หุ่นยนต์	กำลังพล
ความอดทน	สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยไม่เหน็ดเหนื่อย	มีข้อจำกัดด้านความอดทนและต้องการพักผ่อน
ความแม่นยำ	มีความแม่นยำและเที่ยงตรงสูง โดยเฉพาะในงานที่ต้องอาศัยการคำนวณ	อาจเกิดความผิดพลาดจากความเหนื่อยล้าหรือความไม่มีสมาธิได้
ความยืดหยุ่น	ถูกโปรแกรมมาเพื่อทำงานเฉพาะด้าน ปรับตัวต่อสถานการณ์ใหม่ได้ยาก	มีความยืดหยุ่นและปรับตัวเข้ากับสถานการณ์ต่าง ๆ ได้ดีกว่า
การตัดสินใจ	ตัดสินใจบนพื้นฐานของข้อมูลและกฎที่กำหนดไว้เท่านั้น	สามารถใช้ดุลยพินิจและประสบการณ์ในการตัดสินใจแก้ปัญหาเฉพาะหน้าได้
การเรียนรู้	ต้องอาศัยการเขียนโปรแกรมหรือป้อนข้อมูลฝึกฝนจำนวนมากเข้าไป	สามารถเรียนรู้ได้ด้วยตนเองจากประสบการณ์และคำแนะนำ
ความปลอดภัย	สามารถทำงานในพื้นที่เสี่ยงอันตรายได้ โดยไม่เป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์	การปฏิบัติงานในพื้นที่อันตรายอาจนำไปสู่การบาดเจ็บหรือเสียชีวิตได้
การซ่อมบำรุง	มีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและอะไหล่ทดแทนสูง ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้าน	ต้องการการฝึกฝนและดูแลสวัสดิภาพ แต่สามารถทำได้ง่ายและต้นทุนต่ำกว่า
ค่าใช้จ่าย	มีค่าใช้จ่ายในการจัดหาและพัฒนาสูง แต่สามารถใช้งานได้นานในระยะเวลา	ค่าใช้จ่ายในการสรรหา ฝึกอบรม และดูแลน้อยกว่าในระยะสั้น
อายุการใช้งาน	สามารถใช้งานได้นานหลายปี ตราบเท่าที่ยังได้รับการบำรุงรักษาที่เหมาะสม	มีอายุการใช้งานที่จำกัดและประสิทธิภาพลดลงตามวัย
ผลกระทบจากภัยคุกคาม	ไม่มีความเครียด ความกลัว หรือได้รับผลกระทบทางจิตจากการทำงาน	อาจได้รับผลกระทบทางจิตจากความเครียด ความกลัว และบาดเจ็บเลวร้ายจากการปฏิบัติหน้าที่

หุ่นยนต์และมนุษย์ก็สามารถทำงานเคียงข้างกันและเสริมประสิทธิภาพซึ่งกันและกันได้ โดยมอบหมายงานที่เหมาะสมให้แก่แต่ละฝ่ายตามความถนัด เช่น ให้หุ่นยนต์ทำหน้าที่ในพื้นที่อันตรายหรืองานที่ต้องการความแม่นยำสูง ในขณะที่มนุษย์สามารถทำหน้าที่ในการควบคุมกำกับ ให้คำปรึกษา และตัดสินใจในภาพรวม การผสมผสานการทำงานระหว่างหุ่นยนต์และมนุษย์ จึงน่าจะเป็นแนวทางที่ก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการปฏิบัติการทางทหารในอนาคต [20-21]

5. ยุทธศาสตร์ในการส่งเสริมการใช้หุ่นยนต์ในกองทัพไทย

เพื่อให้กองทัพไทยสามารถพัฒนาและนำเทคโนโลยีหุ่นยนต์มาประยุกต์ใช้ในการเสริมสร้างขีดความสามารถการป้องกันประเทศได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน จึงควรกำหนดยุทธศาสตร์ในการส่งเสริมการใช้หุ่นยนต์ในกองทัพไทย ดังนี้

1. กำหนดนโยบายและแผนแม่บทระยะยาวสำหรับการพัฒนาและนำหุ่นยนต์มาใช้ในการกิจด้านความมั่นคง

- จัดทำแผนยุทธศาสตร์ด้านเทคโนโลยีหุ่นยนต์ทาง

ทหาร โดยระบุเป้าหมาย ขอบเขต และแนวทางการพัฒนาในระยะ 5-10 ปี ให้สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ชาติ และนโยบายด้านความมั่นคง

- กำหนดลำดับความสำคัญของประเภทหุ่นยนต์ที่ต้องการพัฒนา โดยพิจารณาถึงสภาพภูมิประเทศ ลักษณะภัยคุกคาม และบทบาทภารกิจของกองทัพไทย

- ส่งเสริมให้มีการนำหุ่นยนต์ไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น ISR (Intelligence, Surveillance and Reconnaissance), EOD (Explosive Ordnance Disposal), Combat Support, Logistics เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน

2. จัดสรรงบประมาณสำหรับการวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์ทางทหารภายในประเทศ

- สนับสนุนงบประมาณแก่สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.) ในการวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์ทางทหารให้มากขึ้น เพื่อสร้างต้นแบบที่เหมาะสมกับการใช้งานของกองทัพไทย

- ส่งเสริมให้เหล่าทัพจัดสรรงบประมาณ ในการวิจัยและจัดหาหุ่นยนต์ ที่สอดคล้องกับความต้องการเฉพาะทางของแต่ละเหล่าทัพ

- สร้างแรงจูงใจให้ภาคเอกชนลงทุน

ในการวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์ทางทหาร

มากขึ้น เช่น การให้สิทธิประโยชน์ทางภาษี เป็นต้น

3. ส่งเสริมความร่วมมือกับหน่วยงานภาครัฐ เอกชน และสถาบันการศึกษา เพื่อพัฒนาขีดความสามารถด้านหุ่นยนต์และปัญญาประดิษฐ์

- สร้างความร่วมมือกับกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (อว.) ในการพัฒนาเทคโนโลยีหุ่นยนต์ทั้งด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์

- ผลักดันให้เกิดความร่วมมือระหว่างสถาบันวิจัยด้านป้องกันประเทศ (สทป. ศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการบิน

กรมวิทยาศาสตร์ทหารบก ฯลฯ) กับมหาวิทยาลัยชั้นนำในการพัฒนางานวิจัยและผลิตบุคลากรด้านหุ่นยนต์และปัญญาประดิษฐ์

- สนับสนุนให้เกิดกลุ่มอุตสาหกรรมหุ่นยนต์เพื่อความมั่นคง (Robotic Cluster for Security) ที่มีความ

เชี่ยวชาญเฉพาะด้าน สามารถพัฒนาและผลิตหุ่นยนต์ให้ตอบสนองความต้องการของกองทัพ

4. จัดตั้งหน่วยหรือศูนย์ความเป็นเลิศ

ด้านหุ่นยนต์ทางทหาร เพื่อวิจัย ทดสอบ และฝึกอบรม

- จัดตั้ง “ศูนย์ความเป็นเลิศด้านหุ่นยนต์ทางทหาร” (Center of Excellence for Military Robotics) เพื่อเป็นหน่วยงานกลางในการผลักดันงานวิจัย การพัฒนา การทดสอบ การฝึกอบรม และการใช้งานหุ่นยนต์ในกองทัพไทย

- มุ่งผลิตองค์ความรู้ใหม่ด้านระบบหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติทางทหาร ผ่านความร่วมมือกับนักวิจัยและผู้เชี่ยวชาญชั้นนำของประเทศ

- พัฒนาขีดความสามารถในการเลือกใช้ ปรับแต่ง ปฏิบัติการ และบำรุงรักษาระบบหุ่นยนต์ของกำลังพลให้ทันสมัยอยู่เสมอ โดยจัดหลักสูตรการฝึกอบรมที่มีคุณภาพ

- เป็นศูนย์ทดสอบมาตรฐานหุ่นยนต์ทางทหาร เพื่อให้มั่นใจว่าหุ่นยนต์ที่นำมาใช้งาน

มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และเป็นไปตามข้อกำหนดที่วางไว้

5. กำหนดระบบการประเมินผลและติดตามความก้าวหน้า

เพื่อให้การพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหุ่นยนต์ในกองทัพไทยเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถวัดผลได้อย่างเป็นรูปธรรม จำเป็นต้องมีระบบการประเมินผลและติดตามความก้าวหน้าที่ชัดเจน โดยมีแนวทางดังนี้

- จัดทำตัวชี้วัดประสิทธิภาพ (Key Performance Indicators - KPIs) สำหรับการใช้งานหุ่นยนต์ในแต่ละประเภทภารกิจ เช่น อัตราความสำเร็จของภารกิจ, ระยะเวลาในการปฏิบัติงาน, อัตราการลดการสูญเสียกำลังพล และประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากร เป็นต้น การกำหนด KPIs ที่ชัดเจนจะช่วยให้สามารถวัดผลการดำเนินงานได้อย่างเป็นระบบ

- พัฒนาระบบการรายงานและติดตามผลการปฏิบัติงานของหุ่นยนต์แบบ real-time โดยใช้เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) และ Big Data Analysis ระบบนี้จะช่วยให้ผู้บังคับบัญชาสามารถติดตามสถานะ

และประสิทธิภาพการทำงานของหุ่นยนต์ได้ตลอดเวลา ทำให้สามารถตัดสินใจและแก้ไขปัญหาได้อย่างทันท่วงที

- จัดให้มีการประเมินผลการใช้งานหุ่นยนต์เป็นประจำทุก 6 เดือน โดยคณะกรรมการที่ประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญจากทั้งภายในและภายนอกกองทัพ การประเมินนี้ควรครอบคลุมทั้งด้านประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน, ความคุ้มค่าในการลงทุน, ผลกระทบต่อการปฏิบัติการกิจโดยรวม และความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

- วิเคราะห์ข้อมูลจากการใช้งานจริงเพื่อนำมาปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพของหุ่นยนต์อย่างต่อเนื่อง โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลขั้นสูง เช่น Machine Learning เพื่อคาดการณ์แนวโน้มและปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

- จัดทำรายงานประจำปีเกี่ยวกับความก้าวหน้าในการพัฒนาและใช้งานหุ่นยนต์ในกองทัพ เพื่อนำเสนอต่อผู้บังคับบัญชาระดับสูงและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง รายงานนี้ควรระบุถึงความสำเร็จ, ปัญหาและอุปสรรค, บทเรียนที่ได้รับ, และแผนการพัฒนาในอนาคต

การกำหนดระบบการประเมินผลและติดตามความก้าวหน้าอย่างเป็นระบบนี้ จะช่วยให้กองทัพไทยสามารถพัฒนาและปรับปรุงการใช้หุ่นยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีนี้ได้อย่างคุ้มค่าและยั่งยืน นอกจากนี้ ยังเป็นการสร้างความโปร่งใสและความน่าเชื่อถือในการดำเนินโครงการ ซึ่งจะช่วยสนับสนุนการจัดสรรงบประมาณและทรัพยากรในอนาคตอีกด้วย

6. ส่งเสริมความร่วมมือระหว่างประเทศในการพัฒนาเทคโนโลยีหุ่นยนต์ทางทหาร

การสร้างความร่วมมือกับต่างประเทศเป็นกลยุทธ์สำคัญในการยกระดับขีดความสามารถด้านหุ่นยนต์ทางทหารของไทย โดยมีแนวทางดังนี้

- จัดทำข้อตกลงความร่วมมือ (Memorandum of Understanding - MOU) ด้านการวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์ทางทหารกับประเทศพันธมิตรที่มีความก้าวหน้าในด้านนี้ เช่น สหรัฐอเมริกา อิสราเอล หรือเกาหลีใต้ เพื่อแลกเปลี่ยนความรู้ เทคโนโลยี และประสบการณ์

- ส่งเสริมการเข้าร่วมโครงการวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์ทางทหารระดับนานาชาติ เช่น โครงการภายใต้กรอบความร่วมมือของอาเซียน หรือโครงการวิจัย

ร่วมกับพันธมิตรทางทหารในภูมิภาค เพื่อแบ่งปันทรัพยากรและลดต้นทุนในการพัฒนา

- จัดส่งบุคลากรไปฝึกอบรมและศึกษาดูงานในต่างประเทศที่มีความเชี่ยวชาญด้านหุ่นยนต์ทางทหาร เพื่อนำความรู้และประสบการณ์มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาหุ่นยนต์ของกองทัพไทย

- เชิญผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศมาเป็นที่ปรึกษาในโครงการพัฒนาหุ่นยนต์ทางทหารของไทย เพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีและแนวปฏิบัติที่ดี (Best Practices)

- สร้างความร่วมมือกับบริษัทผู้ผลิตหุ่นยนต์ทางทหารชั้นนำของโลก ในลักษณะการร่วมทุนหรือการถ่ายทอดเทคโนโลยี เพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมหุ่นยนต์ทางทหารภายในประเทศ

- เข้าร่วมการฝึกซ้อมทางทหารระหว่างประเทศที่มีการใช้หุ่นยนต์ เพื่อแลกเปลี่ยนประสบการณ์และเรียนรู้แนวทางการปฏิบัติงานร่วมกันระหว่างกำลังพลและหุ่นยนต์

- ส่งเสริมการเข้าร่วมและจัดการประชุมวิชาการนานาชาติด้านหุ่นยนต์ทางทหาร เพื่อติดตามความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและสร้างเครือข่ายความร่วมมือกับนักวิจัยและผู้เชี่ยวชาญจากทั่วโลก

การส่งเสริมความร่วมมือระหว่างประเทศเหล่านี้ จะช่วยให้กองทัพไทยสามารถเร่งพัฒนาขีดความสามารถด้านหุ่นยนต์ทางทหารได้อย่างรวดเร็ว ลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศในระยะยาว และสร้างโอกาสในการพัฒนาอุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยให้ก้าวหน้าทัดเทียมนานาชาติ

7. พัฒนาศูนย์การเรียนรู้ที่มีความเชี่ยวชาญด้านหุ่นยนต์

การพัฒนาศูนย์การเรียนรู้เป็นปัจจัยสำคัญในการขับเคลื่อนการใช้เทคโนโลยีหุ่นยนต์ในกองทัพอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีแนวทางดังนี้:

- จัดตั้งหลักสูตรเฉพาะทางด้านหุ่นยนต์และปัญญาประดิษฐ์ในสถาบันการศึกษาทางทหาร เช่น โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า โรงเรียนนายเรือ และโรงเรียนนายเรืออากาศ เพื่อสร้างบุคลากรรุ่นใหม่ที่มีความรู้พื้นฐานด้านหุ่นยนต์ตั้งแต่ระดับการศึกษา

- พัฒนาหลักสูตรฝึกอบรมระยะสั้นและระยะยาว

สำหรับกำลังพลปัจจุบัน ครอบคลุมทั้งด้านการใช้งาน การบำรุงรักษา และการพัฒนาหุ่นยนต์ โดยแบ่งเป็นระดับต่างๆ ตั้งแต่ระดับพื้นฐานจนถึงระดับผู้เชี่ยวชาญ

- สร้างความร่วมมือกับสถาบัน การศึกษาชั้นนำทั้งในและต่างประเทศ เพื่อส่งกำลังพลไปศึกษาต่อในระดับปริญญาโทและปริญญาเอกด้านวิศวกรรมหุ่นยนต์ ปัญญาประดิษฐ์ และสาขาที่เกี่ยวข้อง

- จัดตั้งโครงการแลกเปลี่ยนบุคลากรกับกองทัพพันธมิตรที่มีความก้าวหน้าด้านหุ่นยนต์ เพื่อเรียนรู้แนวทางปฏิบัติที่ดีและเทคโนโลยีล่าสุด

- สร้างระบบ mentoring โดยให้ผู้เชี่ยวชาญด้านหุ่นยนต์ทั้งจากภายในและภายนอกกองทัพเป็นที่ปรึกษาให้กับกำลังพลรุ่นใหม่

- จัดการแข่งขันนวัตกรรมหุ่นยนต์ทางทหารภายในกองทัพ เพื่อกระตุ้นให้เกิดการเรียนรู้และพัฒนาทักษะอย่างต่อเนื่อง

- พัฒนาระบบการรับรองมาตรฐานวิชาชีพด้านหุ่นยนต์ทางทหาร เพื่อสร้างแรงจูงใจในการพัฒนาตนเองของกำลังพล

- จัดทำแผนพัฒนาสายอาชีพ (Career Path) สำหรับบุคลากรด้านหุ่นยนต์ในกองทัพ เพื่อให้มีความก้าวหน้าในหน้าที่การงานที่ชัดเจน

- ส่งเสริมการทำวิจัยและพัฒนานวัตกรรมด้านหุ่นยนต์โดยกำลังพลของกองทัพ ผ่านการให้ทุนวิจัยและการสนับสนุนทรัพยากรที่จำเป็น

- จัดตั้งชุมชนแห่งการเรียนรู้ (Community of Practice) ด้านหุ่นยนต์ทางทหารภายในกองทัพ เพื่อแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ระหว่างผู้ปฏิบัติงาน

การพัฒนาศูนย์การเรียนรู้เป็นระบบและต่อเนื่องเหล่านี้ จะช่วยสร้างฐานกำลังพลที่มีความเชี่ยวชาญด้านหุ่นยนต์ให้กับกองทัพไทย ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหุ่นยนต์อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืนในระยะยาวการกำหนดยุทธศาสตร์ที่ชัดเจนในการส่งเสริมการใช้หุ่นยนต์ในกองทัพไทย โดยครอบคลุมตั้งแต่การวางนโยบายในระดับสูง การจัดสรรทรัพยากร การสร้างความร่วมมือ

กับทุกภาคส่วน ไปจนถึงการสร้างศูนย์ความเป็นเลิศเฉพาะทาง จะช่วยให้กองทัพไทยสามารถพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหุ่นยนต์อย่างเป็นรูปธรรมยกระดับขีดความสามารถในการปฏิบัติการกิจ ลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ สร้างกำลังพลที่เชี่ยวชาญ และวางรากฐานที่มั่นคงให้แก่อุตสาหกรรมป้องกันประเทศของไทยในระยะยาว

6. อภิปรายผล

มุมมองของผู้เขียนถึงทิศทางและการเตรียมพร้อมของกองทัพไทย เพื่อรับมือกับการเปลี่ยนแปลงในอนาคต จากการศึกษาถึงสถานการณ์การพัฒนาและใช้งานหุ่นยนต์ในกองทัพต่างประเทศ รวมถึงการวิเคราะห์ถึงความท้าทายและโอกาสของกองทัพไทย ผู้เขียนมีความเห็นว่า กองทัพไทยควรเร่งดำเนินการเชิงรุกในการปรับตัวและเตรียมความพร้อมรับมือกับการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีทางการทหารในอนาคต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการประยุกต์ใช้หุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ เพื่อรักษาขีดความสามารถในการป้องกันประเทศ ให้ทัดเทียมกับประเทศอื่น ๆ ในภูมิภาคในระยะสั้น กองทัพไทยควรมุ่งเน้นการจัดหาหุ่นยนต์ประเภทที่มีความจำเป็นเร่งด่วน เช่น อากาศยานไร้คนขับสำหรับภารกิจลาดตระเวน หุ่นยนต์กู้ระเบิดสำหรับใช้ในพื้นที่สามจังหวัดชายแดนภาคใต้ หรือหุ่นยนต์ลำเลียงสัมภาระสนับสนุนหน่วยทหารในถิ่นทุรกันดาร ควบคู่ไปกับการฝึกอบรมและสร้างความคุ้นเคยให้กับกำลังพล ให้สามารถปฏิบัติงานร่วมกับหุ่นยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาจอาศัยการจัดซื้อจากต่างประเทศในระยะแรก พร้อมส่งเสริมการถ่ายทอดเทคโนโลยีมาพัฒนาต่อยอดภายในประเทศ ในขณะเดียวกัน กองทัพไทยควรวางแผนระยะยาวในการสร้างขีดความสามารถด้านหุ่นยนต์และปัญญาประดิษฐ์อย่างยั่งยืน โดยจัดทำแผนแม่บทและแนวทางปฏิบัติที่ชัดเจน พร้อมจัดสรรงบประมาณ สนับสนุนอย่างเหมาะสม เสริมสร้างความร่วมมือระหว่างเหล่าทัพ สถาบันการศึกษา และภาคเอกชน เร่งสร้างบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน รวมถึงสนับสนุนอุตสาหกรรมหุ่นยนต์ภายในประเทศให้สามารถตอบสนองความต้องการของ

กองทัพได้ในอนาคต การมีกรอบยุทธศาสตร์ที่ชัดเจนและการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จะทำให้กองทัพไทยสามารถลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างชาติ และสร้างความมั่นคงให้กับประเทศในระยะยาว การพัฒนาและนำหุ่นยนต์มาใช้ในกองทัพไม่ใช่เรื่องง่าย จำเป็นต้องอาศัยความร่วมมือจากทุกภาคส่วนอย่างจริงจัง รัฐบาลและผู้บัญชาการระดับสูงของกองทัพจะต้องให้ความสำคัญ ผลักดันเชิงนโยบาย และสนับสนุนอย่างต่อเนื่อง ขณะเดียวกันก็ต้องมีการปรับกระบวนการทัศน์และวัฒนธรรมองค์กร ให้พร้อมรับกับการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยี และส่งเสริมบรรยากาศของการเรียนรู้และนวัตกรรมในหน่วยงาน มิเช่นนั้นแล้ว การนำหุ่นยนต์มาใช้อาจไม่บรรลุผลอย่างเต็มประสิทธิภาพและไม่คุ้มค่ากับการลงทุน

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนเห็นว่า การเตรียมความพร้อมของกองทัพไทยเพื่อรับมือกับการเปลี่ยนแปลงในอนาคต โดยเฉพาะด้านเทคโนโลยีหุ่นยนต์และปัญญาประดิษฐ์นั้น เป็นสิ่งที่ต้องดำเนินการอย่างรอบด้าน ทั้งในมิติของการพัฒนาเทคโนโลยี การสร้างกำลังพล การปรับปรุงกระบวนการทำงาน การสร้างความร่วมมือกับพันธมิตรทุกภาคส่วน รวมถึงการปรับเปลี่ยนกรอบความคิดขององค์กรให้พร้อมรับกับความท้าทายรูปแบบใหม่ หากกองทัพไทยสามารถกำหนดทิศทางที่ชัดเจน ดำเนินการได้อย่างบูรณาการ ต่อเนื่อง และทันท่วงที ก็จะสามารถยกระดับขีดความสามารถในการป้องกันประเทศ รวมถึงเพิ่มอำนาจต่อรองในเวทีนานาชาติ ท่ามกลางการแข่งขันทางเทคโนโลยีที่เข้มข้นมากขึ้นในอนาคต อันจะนำไปสู่ความมั่นคงและความมั่งคั่งของประเทศไทยในระยะยาวได้อย่างแน่นอน

7. บทสรุป

จากการศึกษาถึงสถานการณ์การพัฒนาและใช้งานเทคโนโลยีหุ่นยนต์ในกองทัพต่างประเทศ รวมถึงการวิเคราะห์ความท้าทายและโอกาสของกองทัพไทยในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ สามารถสรุปได้ว่า เทคโนโลยีหุ่นยนต์ได้กลายเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถของกองทัพสมัยใหม่ไปแล้ว โดยประเทศมหาอำนาจทางการทหาร ต่างให้ความสำคัญและลงทุนด้านการวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์ทางทหารอย่างต่อเนื่อง

เพื่อสร้างความได้เปรียบทางยุทธศาสตร์ในการทำสงครามยุคใหม่สำหรับกองทัพไทย การนำเทคโนโลยีหุ่นยนต์มาประยุกต์ใช้จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติการกิจด้านการป้องกันประเทศในหลากหลายมิติ ทั้งการลาดตระเวน การเก็บกู้วัตถุระเบิด การสนับสนุนการรบ รวมถึงการปฏิบัติการในพื้นที่ห่างไกล ทุรกันดาร หรือเสี่ยงอันตราย อย่างไรก็ตาม การพัฒนาหุ่นยนต์ทางทหารในบริบทของไทยยังคงมีความท้าทายอยู่มาก ทั้งในแง่ของงบประมาณ บุคลากร เทคโนโลยี ตลอดจนกรอบนโยบายที่ชัดเจน

ดังนั้น กองทัพไทยจึงจำเป็นต้องกำหนดยุทธศาสตร์การพัฒนาเทคโนโลยีหุ่นยนต์อย่างเป็นระบบและสอดคล้องกับทรัพยากรที่มี โดยมุ่งเน้นพัฒนาหุ่นยนต์ประเภทที่จะเกิดประโยชน์สูงสุดต่อการปฏิบัติการกิจเฉพาะด้าน ส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีในประเทศควบคู่กับความร่วมมือระหว่างประเทศ พัฒนาศักยภาพของกำลังพลให้พร้อมปรับตัวต่อการทำงานร่วมกับหุ่นยนต์ รวมถึงผลักดันความร่วมมือกับภาคการศึกษาและอุตสาหกรรม ในการสร้างฐานองค์ความรู้และนวัตกรรมด้านหุ่นยนต์ภายในประเทศ การลงทุนอย่างจริงจังและต่อเนื่องในการพัฒนาเทคโนโลยีหุ่นยนต์ จะช่วยให้กองทัพไทยสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการป้องกันประเทศ ลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากภายนอก พร้อมทั้งสร้างรากฐานอุตสาหกรรมป้องกันประเทศที่เข้มแข็งได้ในอนาคต ซึ่งจะเป็นการสร้างความสำเร็จเปรียบเทียบกับประเทศไทย ท่ามกลางบริบทความมั่นคงที่ท้าทายในยุคปัจจุบันและอนาคต

8. บรรณานุกรม

- [1] H. Tanmay, "Military Robots Market by Application." *Military Robots Market Analysis*. (2023).
- [2] P. Patikom, "จีนเร่งพัฒนาระดับอุตสาหกรรมหุ่นยนต์." (2560). ที่มา <https://www.brandage.com/article/342>, 18 18 ธันวาคม, 2566
- [3] P. Temyarnsin, "การศึกษาการจัดสรรงบประมาณด้านการป้องกันประเทศ." สำนักงานงบประมาณของรัฐสภา สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร. (2565).
- [4] J. Schneider, "Unscorable at 12: Technically Correct, but Misses the Mark." *Security Studies*, 32(3), 568–574. (2023). <https://doi.org/10.1080/09636412.2023.2225782>
- [5] M.R. Folse, "The United States Marine Corps. In Military History." (2020). Source <https://doi.org/10.1093/obo/9780199791279-0190>, 18 December, (2023)
- [6] A.H. Pratama, "Understanding Defense Cooperation Between Indonesia-China Through State Owned Enterprise (Norinco and Indonesia's Government)." *GLOBAL INSIGHT JOURNAL*, 5(1), 1-14. (2020).
- [7] G.E. Loeb, "Developing Intelligent Robots that Grasp Affordance." *Frontiers in Robotics and AI*, 9, 951293. (2022).
- [8] V.C. Silva, "What is the Effect of a Slant Shape in the Design of a UGV Delivery Robot? - UGV Robots and the Effect of Shape on the Perceived Safety." *IASDR : Life-Changing Design*. (2023). <https://doi.org/10.21606/iasdr.2023.287>
- [9] J., Heinerman, E., Haasdijk & A.E., Eiben, "Importance of Parameter Settings on the Benefits of Robot-to-Robot Learning in Evolutionary Robotics." *Frontiers in Robotics and AI*, 6, 10. (2019). <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00010>
- [10] T.H. Lin, S. Ng, & S. Sebo, "Benefits of an Interactive Robot Character in Immersive Puzzle Games." In *2022 IEEE 31st International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*. (2022).
- [11] Aagth., "หุ่นยนต์ทหาร." (2018). ที่มา <https://aagth1.blogspot.com/2018/10/blog-post.html>.
- [12] กองทัพบก. "DS2022: ATIL เปิดตัวอากาศยานไร้คนขับ 3 รุ่น พร้อมสนับสนุนกองทัพไทยและให้ไทยเป็นฐานการผลิตเพื่อส่งออก." (2022). ที่มา <https://thaiarmedforce.com/2022/08/29/ds2022-atil-unveil-the-uav-portfolio/>
- [13] สำนักนโยบายและแผนกลาโหม. (2560). ยุทธศาสตร์การป้องกันประเทศ กระทรวงกลาโหม พ.ศ. 2590 - 2579. กรุงเทพฯ: กระทรวงกลาโหม
- [14] สำนักงบประมาณกลาโหม, "รายงานประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564". (2564). ที่มา <https://dl.parliament.go.th/handle/20.500.13072/600666>
- [15] ธนรัฐ ธนะสมบูรณ์, "แนวโน้มเทคโนโลยียานรบทางทหาร

- ปี ค.ศ. 2021 - 2030". รายงานวิเคราะห์เทคโนโลยี
ป้องกันประเทศ, (2567) ที่มา <https://dspace.dti.or.th/jspui/bitstream/123456789/3812/1/64-Q3%20P.02-33%20แนวโน้มเทคโนโลยียานรบทางทหาร%20ปี%20ค.ศ.%202021-2030.pdf>
- [16] ฝ่ายวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ, “แนวโน้มเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ด้านความมั่นคงและการป้องกันประเทศ.” สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. ม.ป.ป. (2567). ที่มา <https://dtd.dti.or.th/xmlui/handle/123456789/442>
- [17] ฝ่ายวิเคราะห์เทคโนโลยีป้องกันประเทศ. “การวิเคราะห์ขีดความสามารถเทคโนโลยีในงาน Defence Services Asia 2018.” สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. ม.ป.ป. (2561). ที่มา https://www.dti.or.th/page_bx.0.php?cid=24&cno=5590
- [18] V. Mungmungkhun, “จับตามหาอำนาจพัฒนายานยนต์รบไร้คนขับ.” สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. ม.ป.ป. (2563). ที่มา <https://dtd.dti.or.th/xmlui/handle/123456789/1518>
- [19] Z., Henkel, K.B., Henkel, & C.L. Bethel, “Wizards in the Middle: An Approach to Comparing Humans and Robots.” In *2022 IEEE 31st International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*. (2022). <https://doi.org/10.1109/ro-man53752.2022.9900655>
- [20] K. Mamak, “Robots as humans.” In *Robotics, AI and Criminal Law*. (2023). <https://doi.org/10.4324/9781003331100-3>
- [21] S. Byun, M. O. Tokhi, M.I. Ferreira, M.F. Silva & K. Goher, “Value-Sharing Between Humans and Robots-Proceedings of the Seventh International Conference on Robot Ehtics and Standards.” (2022). <https://doi.org/10.13180/icres.2022.18-19.07>

นโยบายการตีพิมพ์

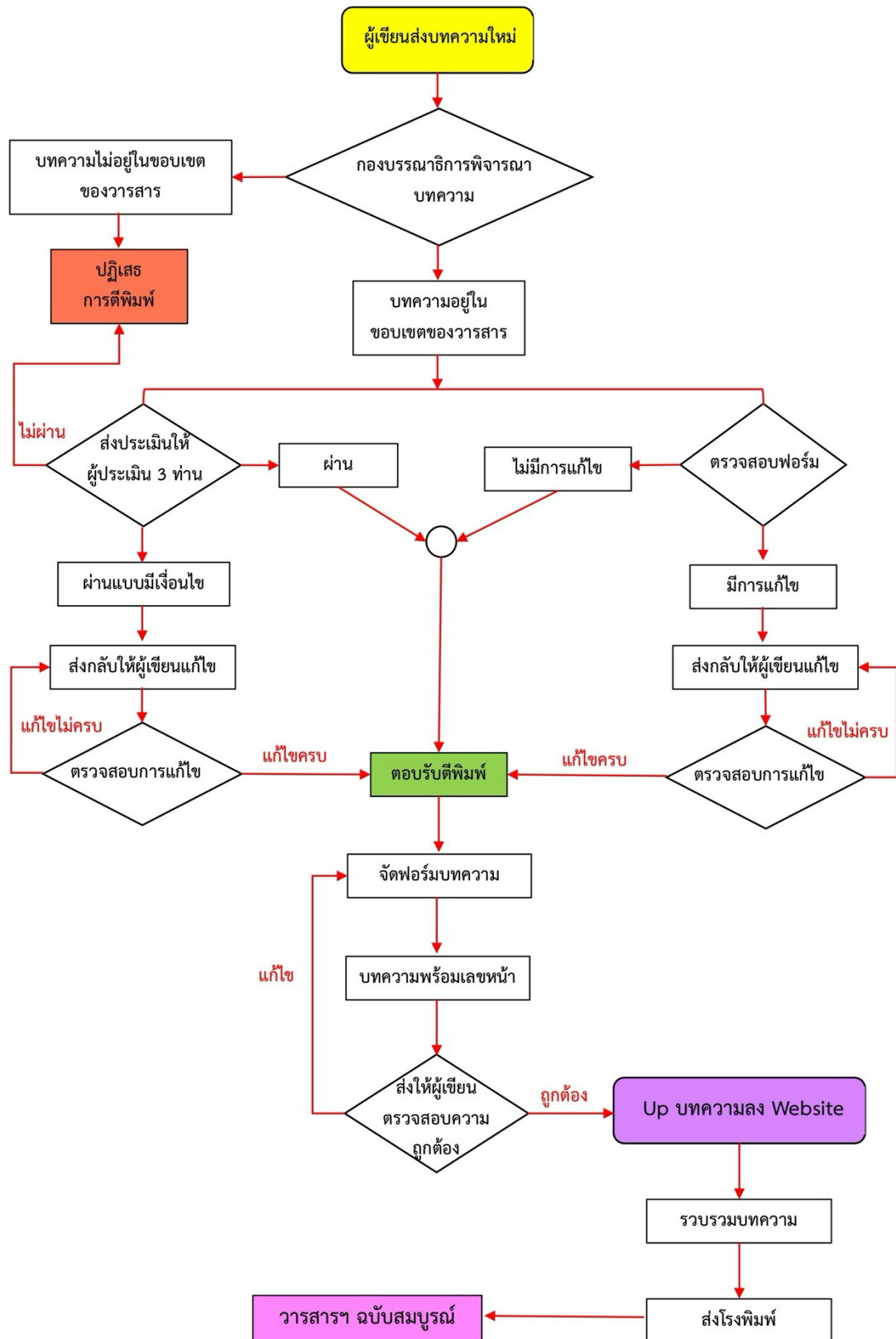
ผู้เขียน (Authors) ดำเนินการเตรียมบทความเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ตามคำแนะนำและจริยธรรมการตีพิมพ์ (Publication ethics) ของวารสารทุกประการ รวมทั้งจะต้องดำเนินการจัดรูปแบบบทความให้ตรงตามฟอร์มบทความ (Article format) สำหรับการตีพิมพ์สำหรับบทความที่ขอลงตีพิมพ์ต้องเป็นองค์ความรู้ใหม่ และอยู่ในขอบเขตการตีพิมพ์ของวารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า โดยเนื้อหาของบทความจะต้องมีสาระที่น่าสนใจ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ไม่เคยถูกนำไปตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารอื่นใดมาก่อน และไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นใด บทความต้นฉบับสามารถส่งได้ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ สามารถเขียนได้ในรูปแบบความวิจัย และบทความวิชาการ

การส่งบทความต้นฉบับ (Manuscript submission) ให้ส่งในระบบเท่านั้น โดยให้ส่งบทความในระบบในรูปแบบ word และ pdf เมื่อกองบรรณาธิการได้รับบทความต้นฉบับที่ส่งเข้ามาในระบบแล้ว จะดำเนินการตรวจสอบเนื้อหา ขอบเขตของบทความ และตรวจสอบการคัดลอกผลงาน (Plagiarism) ในกรณีที่บทความผ่านการตรวจสอบเบื้องต้นจะดำเนินการส่งบทความให้ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ (Peer review) ที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาของบทความ กระบวนการประเมินเป็นแบบการตรวจสอบแบบปกปิดสองฝ่าย (Double-blind peer review) โดยบทความต้องผ่านการประเมินและได้รับการตอบรับจากผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความอย่างน้อย 2 ท่าน จากทั้งหมด 3 ท่าน และ/หรือผ่านการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็นรายกรณี สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับอย่างมีเงื่อนไข ผู้เขียนบทความต้องดำเนินการแก้ไขให้เสร็จสมบูรณ์ภายในระยะเวลาที่กองบรรณาธิการระบุ โดยแยกการแก้ไขออกเป็นการส่งต้นฉบับแก้ไข (Manuscript revision) และการตอบกลับผู้ตรวจ (Response reviewer) ในการนี้กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการพิจารณาตัดสินการตีพิมพ์บทความของวารสารเป็นลำดับสุดท้าย

หลังจากบทความได้รับการตอบรับ (Accepted) เพื่อลงตีพิมพ์ ผู้เขียนต้องตรวจสอบความถูกต้องและความสมบูรณ์ ทั้งคำถูกคำผิด ตาราง รูปภาพ สมการ และอื่น ๆ ก่อนการตีพิมพ์ (Publication) บทความที่ได้รับการยอมรับให้ตีพิมพ์จะถูกเผยแพร่ทั้งในแบบรูปแบบออนไลน์ (Online) บนเว็บไซต์ของวารสาร และรูปเล่ม (Print) ทางกองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์การแก้ไขหลังการตีพิมพ์แล้ว รวมทั้งผลงานที่รับการตีพิมพ์ทุกบทความ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

ผลงานที่รับการตีพิมพ์ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสารวิชาการ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

กระบวนการพิจารณาบทความของวารสารวิชาการ
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า



วารสารวิชาการ
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

บทความวิจัย

- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพื้นที่จัดเก็บในแพลตฟอร์มบิกดาต้า
เกียรติศักดิ์ อุทัยศรี วรภัทร ไพร์เกรง ทศพล พันธุ์กำแหง วีรพงศ์ ตื่นเจริญ และ ณรงค์ ภูมิสุข
- การวิเคราะห์การไหลเวียนของอากาศและฝุ่นละอองขนาดเล็กผ่านแผงเกล็ดบังแดดภายในช่องว่างอากาศด้วย
แบบจำลอง CFD
วินัย หมั่นคติธรรม และ รัฐศักดิ์ พรหมมาศ
- การทำนายระยะการแอ่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้าน
ปล่อยอิสระ ด้วยการวิเคราะห์แบบกดย่อย
กุลกรรพย์ ผ่องศรีสุข ปิยะพันธ์ ธรรมปัญญา และ พงษ์นุกร ไทยะ
- การพัฒนาอาคารกองบัญชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าในจักรวาลเสมือนเพื่อเป็นสื่อการเรียนรู้วิชา
วิศวกรรมป้องกันประเทศด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน
ปรเมศวร์ กุมารบุญ สิริภพ แสงทองคำ พติเมศ หนังสือน้อย อาศิส บุญยะประภัศร และ ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ
- การเสียบรูปของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่มีขอบสองด้านตรงข้ามรองรับแบบยึดแน่นและอีกสองด้านปล่อยอิสระ
กุลกรรพย์ ผ่องศรีสุข ปิยะพันธ์ ธรรมปัญญา และ พงษ์นุกร ไทยะ
- การศึกษาและพัฒนาวิธีการและอุปกรณ์ในการลดอุณหภูมิน้ำดื่มจากปฏิกิริยาเคมีเพื่อใช้ในการฝึกภาคสนาม
ภักทริยา ตันทิกุล
- การประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียชุมชนและแนวทางการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่:
กรณีศึกษาเมืองพัทยา
วรพต พงษ์พาลี อภิเสฏฐกร สุวรรณสะอาด และ มณีนรัตน์ เข็มขาว
- แนวทางการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์สำหรับการประยุกต์ใช้ทางการทหาร
สุทธิชัย รอดแก้ว ภูวนา ปาปิยะวรรณ กิ่งกาญจน์ สุขคนากิบาล และ วรวัฒน์ เขียวสวัสดิ์

บทความวิชาการ

- การพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหุ่นยนต์ในกองทัพไทย: ความท้าทายและโอกาส
ธัญวารีย์ อมรภูวดล อรณิชา คงวุฒิ พัฒน์ศรีบุญย เลหาไพบูลย์ และ วุฒิรงค์ คงวุฒิ