



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยเชิงนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น Journal of Engineering and Innovative Research Faculty of Engineering RMUTI KKC



ISSN : 2822-129X (Print)

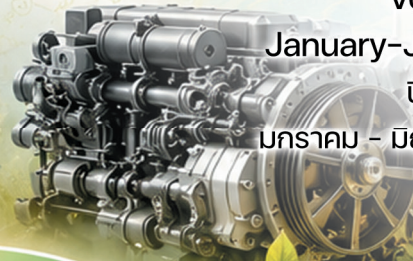
ISSN : 2985-0207 (Online)

Vol. 4 No. 1

January-June 2026

ปีที่ 4 ฉบับที่ 1

มกราคม - มิถุนายน 2569



BIO-OIL

นวัตกรรมทางวิศวกรรม เพื่ออนาคตที่ยั่งยืน

ENGINEERING INNOVATION
FOR A SUSTAINABLE FUTURE



AI VISION



AI



[https : pho3.tci-thaijo/index.php/JEIRKKC](https://pho3.tci-thaijo/index.php/JEIRKKC)

@eng.rmuti.kkc



เจ้าของ

งานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

นโยบายและขอบเขตการตีพิมพ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีวิทยาเขตขอนแก่น กำหนดออกวารสารฉบับออนไลน์รายหกเดือน ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม และจัดพิมพ์รูปเล่มรายปี ภายใต้ชื่อ “วารสารวิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยเชิงนวัตกรรม” เพื่อตีพิมพ์เผยแพร่บทความและงานวิจัยด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ นวัตกรรมและเทคโนโลยี รวมถึงงานวิจัยสหวิทยาการและสาขาอื่นที่เกี่ยวข้อง ซึ่งครอบคลุมเนื้อหาที่เป็นองค์ความรู้พื้นฐาน การประยุกต์ จนกระทั่งการนำไปใช้ประโยชน์ ทั้งในแง่ทฤษฎี การทดลอง การออกแบบหรือการพัฒนาอุปกรณ์ รวมถึงการจำลองการทำงานของระบบ หรือกระบวนการต่างๆ เป็นต้น บทความที่ได้รับการตีพิมพ์จะถูกกลั่นกรองโดยผู้ทรงคุณวุฒิแบบ double blind peer review โดยพิจารณาจากความคิดสร้างสรรค์ ความใหม่ คุณภาพของการเขียนบรรยายและผลการทดลองที่แสดงให้เห็นการค้นพบแบบมีนัยสำคัญ

วัตถุประสงค์และขอบเขตวารสาร

เพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ โดยวารสารรับพิจารณาตีพิมพ์บทความวิชาการและบทความวิจัยครอบคลุมอนุสาขาด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์บริสุทธิ์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ และเทคโนโลยี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคิดค้นสิ่งประดิษฐ์หรือนวัตกรรมใหม่ที่มีกระบวนการทำวิจัย วิเคราะห์และอภิปรายผลการทดสอบอย่างเป็นระบบ รวมทั้งงานวิจัยด้านนวัตกรรมการศึกษา หรือที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ศึกษาและวิศวกรรมศึกษา หรือสาขาอื่นที่เกี่ยวข้อง

สาขาวิชาที่เปิดรับผลงาน

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยเชิงนวัตกรรม เน้นรับบทความทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในกลุ่มสาขาวิชาดังนี้

1. กลุ่มสาขาวิศวกรรมศาสตร์

- 1.1 วิศวกรรมโยธา
- 1.2 วิศวกรรมเครื่องกล
- 1.3 วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์
- 1.4 วิศวกรรมเกษตรและแปรรูปอาหาร

- 1.5 วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์
- 1.6 วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์
- 1.7 วิศวกรรมอุตสาหการและโลจิสติกส์
- 1.8 วิศวกรรมระบบราง ขนส่งและยานยนต์

2. กลุ่มสาขาวิทยาศาสตร์

- 2.1 เคมี
- 2.2 คณิตศาสตร์
- 2.3 ฟิสิกส์
- 2.4 วัสดุศาสตร์
- 2.5 นาโนเทคโนโลยี

3. กลุ่มสาขาวิชาสหวิทยาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

4. กลุ่มสาขานวัตกรรมการศึกษา หรือที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์ศึกษาและวิศวกรรมศึกษา หรือสาขาอื่นที่เกี่ยวข้อง

ที่ปรึกษา

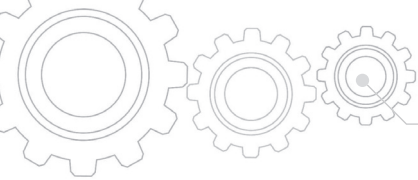
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประพันธ์ ยาวระ	รองอธิการบดีประจำวิทยาเขตขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นทยา กัมพลานนท์	ผู้ช่วยอธิการบดีประจำวิทยาเขตขอนแก่น
อาจารย์บุญกิจ อุ่นพิกุล	ผู้ช่วยอธิการบดีประจำวิทยาเขตขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภฤกษ์ ชามงคลประดิษฐ์	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิเรก จันทะคุณ	รองคณบดีฝ่ายพัฒนานักศึกษา
รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร แสงอรุณ	รองคณบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย
อาจารย์ ดร.ทศพล แจ่มน้อย	รองคณบดีฝ่ายบริหาร
อาจารย์ขุนแผน ปฏิมาประกร	รองคณบดีฝ่ายแผนและประกันคุณภาพการศึกษา
นางสาวรัชนิวัลย์ มุลสีละ	หัวหน้าสำนักงานคณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร แสงอรุณ	มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
------------------------------------	---------------------------

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.วิทยา เรืองพรวิสุทธิ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.วรรณ ใสยมวิบูล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ แสงสุระ	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.นาวิ กังวาลย์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดมรัตน์ ทิพวรรณ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมกฤช ปิติฤกษ์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ศาสตราจารย์ ดร.สุวัตร นานันท์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ตรีจุฑาภาพงศ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชณุ ทองเล็ก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี ระวิกุล

มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.ปณัสชัย เซษฐิโชติศักดิ์

มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิติกานต์ สมบูรณ์

มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉริยา เจียรศิริสมบูรณ์

มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหัสวรรษ ภูจิระ

มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

ผู้ประสานงาน

นางประวีณา เนื่องรินทร์

มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

การพิจารณาบทความ

ต้นฉบับบทความจะได้รับการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) ในสาขาวิชานั้น ๆ ไม่น้อยกว่า 3 ท่าน โดยเป็นการประเมินแบบอำพรางสองฝ่าย (Double Blind) และส่งผลการพิจารณาแก่ผู้เขียน เพื่อปรับปรุงแก้ไขบทความ หรือพิมพ์ต้นฉบับใหม่แล้วแต่กรณี เมื่อบทความผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิและกองบรรณาธิการแล้ว ผู้เขียนจะได้รับการตอบรับตีพิมพ์บทความในวารสาร

กำหนดเผยแพร่

จัดพิมพ์เผยแพร่ ปีละ 2 ฉบับ (วารสารราย 6 เดือน)

ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - มิถุนายน

ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม

ลิขสิทธิ์ งานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

150 หมู่ 6 ถนนศรีจันทร์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

อาคาร 50 ปี เทคนิค ไทย-เยอรมัน ขอนแก่น ชั้น 2 (ห้องแผนกงานวิชาการและวิจัย)

โทรศัพท์ 043-283700 กด 83120 โทรสาร 043-338870

E-mail : jeir.eng.rmuti@gmail.com

Website : <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/JEIRKKC>

พิมพ์ที่

โรงพิมพ์ คำคุณดี-ไซน์ 123 หมู่ 8 ตำบลน้ำพอง อำเภอน้ำพอง จังหวัดขอนแก่น 40140

เบอร์โทร 081-1472506, 089-7136877



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยเชิงนวัตกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 (มกราคม - มิถุนายน 2569)

บทบรรณาธิการ



ในยุคที่โลกกำลังก้าวเข้าสู่การเปลี่ยนผ่านทางเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว วิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรมได้กลายเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนา เศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน การบูรณาการองค์ความรู้จากหลากหลาย สาขา ไม่ว่าจะเป็นวิศวกรรม พลังงาน ปัญญาประดิษฐ์ วิทยาการข้อมูล และเทคโนโลยี ดิจิทัล ได้ก่อให้เกิดแนวทางใหม่ในการแก้ไขปัญหาที่มีความซับซ้อนและสร้างคุณค่าให้ กับภาคส่วนต่าง ๆ ของประเทศ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์และการวิจัยเชิงนวัตกรรม ปีที่ 4 ฉบับที่ 1 นำเสนอ ผลงานวิจัยที่สะท้อนบทบาทของงานวิจัยทางวิศวกรรมในการตอบสนองต่อความท้าทาย ของโลกยุคใหม่ ทั้งในมิติของความมั่นคงด้านพลังงาน การพัฒนาอุตสาหกรรมอัจฉริยะ การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคาดการณ์ และการพัฒนา ศักยภาพทรัพยากรมนุษย์ผ่านนวัตกรรมการศึกษา

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในฉบับนี้ครอบคลุมประเด็นสำคัญหลายด้าน ตั้งแต่ งานวิจัยด้านระบบไฟฟ้ากำลังที่มุ่งยกระดับความเชื่อถือได้ของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย เทคโนโลยีอินโน ไปจนถึงการพัฒนาพลังงานทางเลือกจากชีวมวลและวัสดุเหลือใช้ ทางการผลิตเพื่อสนับสนุนแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ขณะ

เดียวกัน ความก้าวหน้าของปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึกได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ทั้งในภาคการผลิตและการเฝ้าระวังข้อมูล ดิจิทัล สะท้อนให้เห็นศักยภาพของเทคโนโลยีอัจฉริยะในการเพิ่มประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และความปลอดภัยของระบบงาน ในอนาคต

นอกจากนี้ งานวิจัยด้านการวิเคราะห์ข้อมูลบรรยากาศเพื่อประมาณปริมาณน้ำฝน และการประยุกต์ใช้อินเทอร์เน็ตของ สรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) เพื่อพัฒนาทักษะการออกแบบนวัตกรรมของผู้เรียน ยังแสดงให้เห็นถึงบทบาทของ วิศวกรรมศาสตร์ในการเชื่อมโยงองค์ความรู้สู่การพัฒนาสังคมและคุณภาพชีวิตอย่างเป็นรูปธรรม อันสอดคล้องกับเป้าหมายการ พัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) และแนวทางการพัฒนาประเทศด้วยนวัตกรรมและเทคโนโลยี

คณะบรรณาธิการเชื่อมั่นว่า ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในฉบับนี้จะเป็นแหล่งองค์ความรู้ที่มีคุณค่าสำหรับนักวิจัย คณาจารย์ นักศึกษา ตลอดจนผู้ปฏิบัติงานในภาคอุตสาหกรรม และจะเป็นอีกหนึ่งเวทีสำคัญในการส่งเสริมการแลกเปลี่ยนองค์ ความรู้ทางวิชาการ อันนำไปสู่การสร้างเครือข่ายความร่วมมือ การพัฒนางานวิจัยที่มีผลกระทบสูง และการสร้างนวัตกรรมที่ สามารถตอบโจทย์การพัฒนาประเทศและสังคมโลกในอนาคต

ในนามของกองบรรณาธิการ ขอขอบคุณผู้เขียนบทความ ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ และหน่วยงานต้นสังกัดทุกแห่ง ที่มีส่วนสำคัญในการรักษามาตรฐานคุณภาพทางวิชาการของวารสาร เราหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารวิศวกรรมศาสตร์และการ วิจัยเชิงนวัตกรรมจะยังคงเป็นเวทีเผยแพร่ผลงานวิจัยที่มีคุณภาพ และมีส่วนร่วมในการขับเคลื่อนองค์ความรู้ทางวิศวกรรมและ นวัตกรรมสู่ระดับชาติและนานาชาติอย่างต่อเนื่อง

รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร แสงอรุณ

บรรณาธิการ



สารบัญ

บทความ	หน้า
การปรับปรุงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนอนุภาคเหล็กด้วยอนุภาคนาโน TiO_2 : การวิเคราะห์เชิงทดลองและแบบจำลอง Weibull จิรพงศ์ จิตรีเชาว์, ภคพล นาเสถียร, ชินพัฒน์ สุริยะสกุลพงษ์ และ พิชัย เมืองประทุม	1
Investigation on the Performance and Exhaust Gas Emissions of Diesel Engine Fueled with Waste Rubber Bio-Oil Pongpisut Suwunnasopha and Chatcharin Sakkampang	12
ระบบปัญญาประดิษฐ์สำหรับการนับหลอดตายแวนอนบนรถเข็นโดยใช้โมเดลตรวจจับวัตถุ มนัสวี สิตาธรรม, นาฏนลิน จันลาเศษ และครรชิต ร่องไข	25
การจำแนกเว็บไซต์พนันออนไลน์จากภาพหน้าจอด้วย MobileNetV2 อมรเทพ สืบสาย และชัยพร เขมะภาคะพันธ์	35
การประมาณค่าปริมาณน้ำฝนจากปริมาณไอน้ำในอากาศของประเทศไทย Sayan Phokate	47
ผลการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ที่มีต่อความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมของนักศึกษาระดับปริญญาตรี ธนารักษ์ สารเถื่อนแก้ว	52

การปรับปรุงความทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนอนุภาคเหล็ก ด้วยอนุภาคนาโน TiO_2 : การวิเคราะห์เชิงทดลองและแบบจำลอง Weibull

Enhancing AC Breakdown Strength of Iron-Contaminated Transformer Oil Using TiO_2 Nanoparticles: Experimental Evaluation and Weibull Analysis

จิรพงศ์ จิตรีเชาว์, ภคพล นาเสถียร, ชินพัฒน์ สุริยะสกุลพงษ์ และ พิชัย เมืองประทุม*

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง (HVRU-RMUTI) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น 40000

*Corresponding Author: Pichai.mu@rmuti.ac.th

Received 3 December 2025; Received in revised form 13 January 2026; Accepted 16 January 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการปนเปื้อนอนุภาคเหล็กต่อค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Breakdown Voltage: BDV) ของน้ำมันหม้อแปลง และประเมินศักยภาพของอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ในการเพิ่มสมบัติฉนวน น้ำมันหม้อแปลงสี่ชุดถูกเตรียมตามมาตรฐาน ASTM D877 ได้แก่ น้ำมันปกติ น้ำมันผสม TiO_2 น้ำมันปนเปื้อนเหล็ก และน้ำมันปนเปื้อนเหล็กที่ผสม TiO_2 พร้อมทั้งวิเคราะห์ข้อมูล BDV ด้วยการแจกแจงแบบ Weibull สองพารามิเตอร์ ผลการทดลองพบว่า การเติม TiO_2 ที่ความเข้มข้น 0.01% ช่วยเพิ่มค่า BDV ได้ 11.99% (จาก 74.20 kV เป็น 83.10 kV) ในขณะที่การปนเปื้อนอนุภาคเหล็กทำให้ค่า BDV ลดลง 51.54% (เหลือ 35.47 kV) อย่างไรก็ตาม เมื่อเติม TiO_2 ในน้ำมันที่ปนเปื้อนเหล็ก ค่า BDV เพิ่มขึ้น 36.53% (เป็น 47.09 kV) แสดงให้เห็นถึงความสามารถของ TiO_2 ในการลดผลกระทบทางลบจากอนุภาคโลหะ ผลการวิเคราะห์ด้วย Weibull พบว่า ตัวอย่างที่ผสม TiO_2 มีค่า shape parameter และ scale parameter สูงที่สุด และทุกตัวอย่างมีค่า p-value มากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 สะท้อนถึงความสม่ำเสมอและความน่าเชื่อถือของข้อมูล BDV โดยสรุป อนุภาคนาโน TiO_2 มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้าและเสถียรภาพของสมบัติฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะปนเปื้อนอนุภาคเหล็ก ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้และยืดอายุการใช้งานของระบบฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้าในทางปฏิบัติได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: น้ำมันหม้อแปลง, อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์, อนุภาคเหล็ก, ค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

Abstract

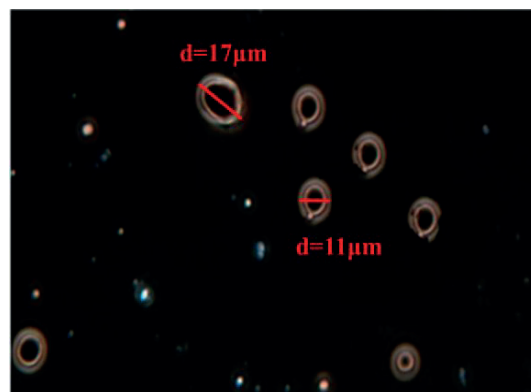
This study investigates the impact of iron particle contamination on the AC breakdown voltage (BDV) of transformer oil and evaluates the effectiveness of titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles in enhancing its dielectric strength. Four oil samples were prepared according to ASTM D877: conventional transformer oil, oil with 0.01% TiO_2 nanoparticles, iron-contaminated oil, and contaminated oil enhanced with TiO_2 . BDV data were further analyzed using the two-parameter Weibull distribution to assess reliability and failure probability. The experimental

results indicate that adding TiO_2 increases the BDV by 11.99% (from 74.20 kV to 83.10 kV). In contrast, iron contamination significantly reduces the BDV by 51.54% (down to 35.47 kV). However, incorporating TiO_2 into iron-contaminated oil improves the BDV by 36.53% (47.09 kV), demonstrating its capability to mitigate the detrimental effects of metallic impurities. The Weibull analysis shows that the TiO_2 -enhanced samples exhibit the highest shape and scale parameters, indicating superior insulation consistency and higher breakdown endurance. All samples achieved p-values greater than 0.05, confirming the suitability of the Weibull distribution and the statistical reliability of the BDV measurements. In conclusion, TiO_2 nanoparticles effectively improve both the dielectric performance and the reliability of transformer oil under normal and iron-contaminated conditions, offering a promising approach to enhancing insulation stability and extending the operational lifespan of power transformer systems.

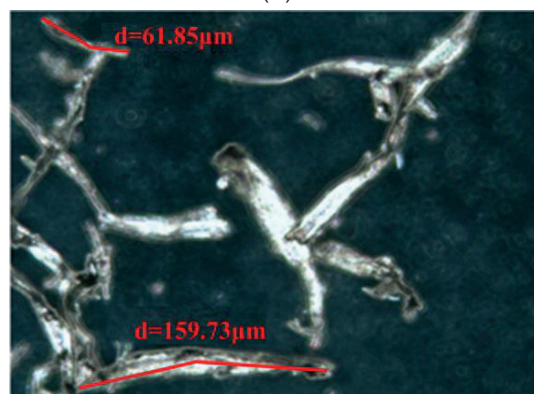
Keywords: Transformer oil, TiO_2 Nanoparticles, Iron particles, AC Breakdown voltage testing

บทนำ

ประสิทธิภาพการทำงานของน้ำมันหม้อแปลงมีความสำคัญอย่างมาก ต่อระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เนื่องจากทำหน้าที่เป็นทั้งฉนวนไฟฟ้าและช่วยระบายความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานอย่างต่อเนื่องของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยรักษาอุณหภูมิภายในให้คงที่ [1] ความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงอาจได้รับผลกระทบจากอนุภาคปนเปื้อน ซึ่งการมีอยู่ของอนุภาคปนเปื้อนในน้ำมันหม้อแปลงถือเป็นสาเหตุหลักประการหนึ่งที่ทำให้เกิดความล้มเหลวของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า และเมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลาอันยาวนาน ปริมาณอนุภาคปนเปื้อนจะเพิ่มขึ้นจากการเสื่อมสภาพของวัสดุหรือชิ้นส่วนภายใน ซึ่งส่งผลให้ค่าความเป็นฉนวนลดลงอย่างมีนัยสำคัญและเพิ่มความเสี่ยงต่อความล้มเหลวของประสิทธิภาพการทำงานของน้ำมันหม้อแปลงในหม้อแปลงระบบไฟฟ้าแรงสูง [2-3] สิ่งสกปรกที่ไม่ใช่อนุภาคโลหะ เช่น อนุภาคเซลลูโลส และฝุ่น สามารถปะปนเข้าไปในน้ำมันฉนวนได้ง่ายระหว่างกระบวนการผลิต หรือการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้า รวมถึงการปนเปื้อนจากอนุภาคโลหะ เช่น ทองแดง และเศษเหล็ก อาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของขดลวดตัวนำหรือโครงสร้างหม้อแปลงดังแสดงในรูปที่ 1



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 โครงสร้างของอนุภาคปนเปื้อน [2]
(ก) อนุภาคโลหะ (ข) อนุภาคเซลลูโลส

การวิจัยโดย Suyi และคณะ [4] ได้ดำเนินการทดสอบเกี่ยวกับค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนอนุภาคเซลล์ูลอส ผลการทดสอบพบว่าอนุภาคเซลล์ูลอสทำให้ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำลง เนื่องจากสนามไฟฟ้าส่งผลให้มีการเชื่อมกันของอนุภาคเซลล์ูลอสทำให้มีความสามารถในการเกิดสะพานของอนุภาคปนเปื้อนระหว่างหัวอิเล็กโทรด เมื่อสะพานก่อตัวขึ้นอาจทำหน้าที่เป็นเส้นทางนำไฟฟ้า เป็นสาเหตุทำให้เกิดการคายประจุบางส่วน และการทดลองโดย Kaizheng และคณะ [5] ได้ทดสอบน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนอนุภาคกลุ่มโลหะ คือ ชนิดอนุภาคทองแดงและอนุภาคเหล็ก ภายใต้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า ผลการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากผลกระทบรวมกันของประเภท ขนาด และความเข้มข้นของอนุภาค แสดงให้เห็นว่าสารอนุภาคปนเปื้อนมีผลเสียต่อความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง นอกจากนี้ยังมีรายงานจาก CIGRE อ้างถึงชนิดและขนาดของอนุภาคสารปนเปื้อน และระบุว่าอนุภาคสิ่งเจือปนในน้ำมันฉนวนจะเคลื่อนไปยังพื้นที่สนามไฟฟ้าสูง ซึ่งจะลดความเป็นฉนวนลงอย่างมาก [6]

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา นาโนเทคโนโลยีกลายเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจอย่างมากในวงการนักวิจัยโดยเฉพาะในด้านไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งการประยุกต์ใช้งานส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาฉนวนไฟฟ้าความน่าสนใจคือ นาโนเทคโนโลยีไม่ได้มีผลแค่ช่วยเสริมคุณสมบัติทางไฟฟ้าของน้ำมันฉนวนเท่านั้น แต่ยังเพิ่มความสามารถในการนำความร้อนได้อีกด้วย [7] ด้วยเหตุนี้จึงมีการศึกษาและพัฒนาวิธีการต่าง ๆ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้อุณหภูมิก่อนเป็นวัสดุฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า

เมื่อไม่นานมานี้มีการทดลองเกี่ยวกับน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โดยมีการใช้ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SPAN 80 เพื่อให้อนุภาคนาโนสามารถกระจายตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทดสอบดังกล่าวได้ทดสอบค่าความ

ทนทานต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และพบว่าค่าความทนทานต่อแรงดันเพิ่มขึ้น 21.2% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงปกติ [8] อย่างไรก็ตามจนถึงขณะนี้ยังขาดการศึกษาทางไฟฟ้าของกรณีการปนเปื้อนในน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมอนุภาคนาโนจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ควรศึกษาอย่างละเอียด เพื่อพัฒนาแนวทางในการยืดอายุและรักษาประสิทธิภาพในการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า

ในบทความนี้ได้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอนุภาคปนเปื้อนหลักที่กระทำต่อคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่เสริมประสิทธิภาพด้วยการผสมสารอนุภาคนาโน TiO_2 โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้า ด้วยการทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมีหัวอิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ ตามมาตรฐาน ASTM D877 และผลที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับระหว่างน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมสารอนุภาคปนเปื้อนหลัก น้ำมันหม้อแปลงที่ผสมสารอนุภาคนาโน TiO_2 และน้ำมันหม้อแปลงแบบปกติ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. น้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ในการทดสอบ มีคุณสมบัติเป็นไดอิเล็กทริกที่ดี มีความคงทนต่อการเกิดออกซิเดชันและให้การถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพตรงตามมาตรฐาน IEC 60296 [9] ก่อนการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงจะถูกกรองด้วยกระดาษกรองที่มีขนาดขนาด 50 ไมครอน เพื่อลดโอกาสจากสิ่งสกปรกแปลกปลอมอื่นๆ เช่น ฝุ่น ตะกอน ซึ่งจะส่งผลต่อความแม่นยำของผลการทดสอบ จากนั้นน้ำมันจะถูกนำไปอบในตู้อบสูญญากาศ (Vacuum Oven) เพื่อกำจัดความชื้นที่อาจตกค้างอยู่ในน้ำมัน เนื่องจากความชื้นมีผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการเป็นฉนวนของน้ำมัน การอบน้ำมันดำเนินการภายใต้อุณหภูมิ 60 °C ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดความชื้นโดยไม่ทำลายคุณสมบัติอื่นๆ ของน้ำมันหม้อแปลง นอกจากนี้ความดันในตู้อบจะถูกลดลงถึง -0.08 MPa หรือใกล้เคียงกับสูญญากาศสมบูรณ์ ซึ่งช่วยเร่งกระบวนการระเหยน้ำในน้ำมันโดยการอบนี้ใช้

เวลาทั้งหมด 24 ชั่วโมง เพื่อให้มั่นใจว่าความชื้นถูกกำจัดออกให้ได้มากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การกำจัดสิ่งแปลกปลอมในน้ำมันหม้อแปลง และควบคุมความชื้น

2. สารอนุภาคปนเปื้อนเหล็ก

จากรายงานของ CIGRE [6] การปนเปื้อนในน้ำมันหม้อแปลงถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ต่ำ กลาง และสูง โดยนักวิจัยบางกลุ่มได้ศึกษาผลกระทบของการปนเปื้อนเหล่านี้ที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้า และความร้อนของน้ำมันหม้อแปลง วิธีการหนึ่งที่ใช้เพื่อกำหนดความเข้มข้นของอนุภาคเหล็กที่ปนเปื้อน คือ การตรวจนับจำนวนอนุภาคเหล็กหรือการเพิ่มน้ำหนักอนุภาคเหล็กในรูปเปอร์เซ็นต์แบบเฉพาะเจาะจง

อย่างไรก็ตามวิธีที่นิยมใช้วิธีหนึ่ง คือ การเพิ่มอนุภาคเหล็กในสัดส่วนของน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของน้ำมัน (%mass per volume, m/v) [10] ในงานวิจัยนี้จึงเลือกปริมาณการปนเปื้อนสารอนุภาคเหล็กที่ 0.01% ของปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง โดยอนุภาคปนเปื้อนเหล็กดังกล่าวจัดหามาจาก Thermo Fisher Scientific Inc. (USA) [11] ซึ่งแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

3. สารอนุภาคนาโน

มีงานวิจัยจำนวนมากได้ผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เข้ากับน้ำมันหม้อแปลง และทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าการเพิ่มอนุภาคนาโน TiO_2 ลงในน้ำมันหม้อแปลงทำให้ค่าความฉนวนไฟฟ้าได้ดีกว่า และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าน้ำมันหม้อแปลงที่ไม่ผ่านการเสริมประสิทธิภาพด้วยอนุภาคนาโน TiO_2 [12]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของอนุภาคปนเปื้อนเหล็ก

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ชื่อเป็นทางการ	Iron Powder
สูตรโมเลกุล	Fe
ความบริสุทธิ์	99.5 %
ขนาด	20 μm
เกรดมาตรฐาน	ห้องปฏิบัติการ
สี	เทา
รูปร่าง	ผงแข็ง

ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อนุภาคนาโน TiO_2 ที่มีขนาด 40 นาโนเมตร (nm) ดังที่แสดงในตารางที่ 2 และมีปริมาณความเข้มข้น 0.01% ของปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งโครงสร้างผลึกของอนุภาคนี้นี้ คือ “อนาเทส” โครงสร้างนี้มีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของไทเทเนียมไดออกไซด์ [13]

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ชื่อเป็นทางการ	Titanium Dioxide Nano Powder
สูตรโมเลกุล	TiO_2
ความบริสุทธิ์	99.9%
ขนาด	40 nm
เกรดมาตรฐาน	ห้องปฏิบัติการ
ความหนาแน่น	3.89 g/cm^3
พื้นที่ผิวจำเพาะ	40 m^2/g
สี	ขาว
สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมผัส	100 (F/m)

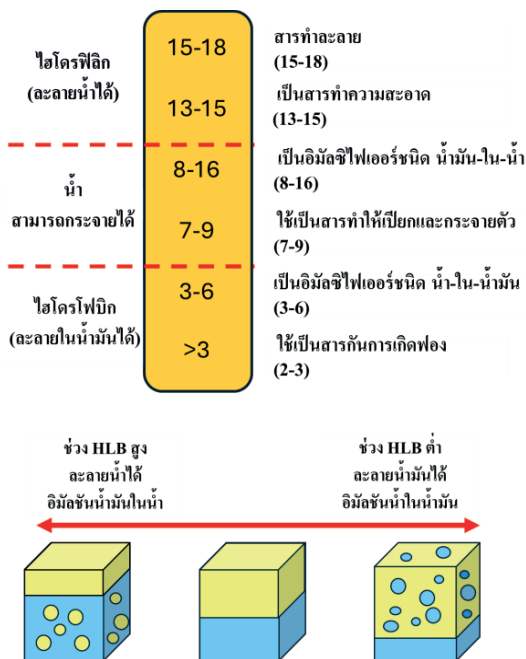
4. สารลดแรงตึงผิว

เนื่องด้วยน้ำมันหม้อแปลงซึ่งเป็นของเหลว และอนุภาคนาโนที่เป็นของแข็ง การรวมกันของ 2 สิ่งจึงเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อน เนื่องจากอนุภาคนาโนอาจจะไม่สามารถกระจายตัวในน้ำมันหม้อแปลงได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของน้ำมันหม้อแปลงไม่เต็มที่เท่าที่ควร หนึ่งในวิธีที่ใช้ในการแก้ไขปัญหา คือ การใช้ซิลิโคนไฟเบอร์ หรือ

สารลดแรงตึงผิวเป็นตัวเชื่อมระหว่างน้ำมันหม้อแปลงกับอนุภาคนาโน ซึ่งจะทำงานโดยมีส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ชอบน้ำมัน ซึ่งอัตราส่วนระหว่างทั้งสองสิ่งนี้จะบอกถึงคุณสมบัติการกระจายตัวของสารลดแรงตึงผิวตามที่แสดงในสมการที่ (1) โดยที่ HLB แทนอัตราส่วนของชอบน้ำต่อชอบน้ำมันและ M_h แทนน้ำหนักโมเลกุลของกลุ่มที่ชอบน้ำ M แสดงถึงน้ำหนักโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว [14]

$$HLB = 20 * \frac{M_h}{M} \quad (1)$$

นอกจากนี้ค่า HLB (Hydrophilic-Lipophilic Balance) ยังสามารถระบุคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งค่า HLB เหมาะสำหรับการใช้สารลดแรงตึงผิวในงานวิจัยนี้คือประเภทน้ำในน้ำมัน (W/O emulsions) โดยค่า HLB จะอยู่ในช่วง 3-6 ยิ่งสารลดแรงตึงผิวที่มีค่าใกล้เคียงกับ 3 จะมีความสามารถในการละลายน้ำมันได้มากกว่า [15]



รูปที่ 3 ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหรือน้ำ [14]

ดังนั้นในการศึกษาจึงได้เลือกใช้สารลดแรงตึงผิว SPAN 80 ที่ความเข้มข้น 90% ของปริมาณสารอนุภาคนาโน ซึ่งเป็นปริมาณที่ให้ค่าการทดสอบทาง

ไฟฟ้าที่ดีที่สุด [8] โดยมีค่า HLB ที่ 4.3 เป็นอิมัลซิไฟเออร์น้ำในน้ำมันที่ไม่มีขั้ว นอกจากนี้ยังมีหลายงานวิจัยที่นำสารลดแรงตึงผิว SPAN 80 ร่วมกับสารอนุภาคนาโน [16-17]

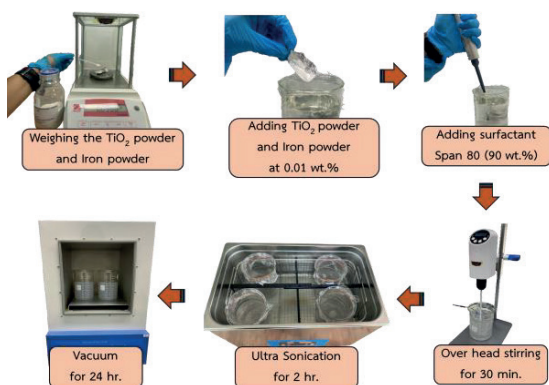
ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

1. การผสมสารอนุภาคในน้ำมันหม้อแปลง

หลังจากน้ำมันหม้อแปลงผ่านกระบวนการกรองสิ่งสกปรก และไล่ความชื้นแล้ว จากนั้นการเติมอนุภาคปนเปื้อนหลัก และอนุภาคนาโน TiO_2 ในปริมาณที่กำหนดไว้ที่ 0.01% ของปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง การชั่งน้ำหนักของอนุภาคนาโนจะดำเนินการด้วยเครื่องชั่งความละเอียดสูงที่มีความแม่นยำสูงถึง 4 ตำแหน่งทศนิยมเพื่อให้ได้ปริมาณสารที่แม่นยำที่สุด พร้อมทั้งเติมสารลดแรงตึงผิว SPAN 80 ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการกระจายตัวและการช่วยลดการเกาะกลุ่มของอนุภาคนาโนในน้ำมันหม้อแปลง โดยปริมาณของ SPAN 80 ถูกกำหนดที่ความเข้มข้น 90% ปริมาณสารอนุภาคนาโน กระบวนการผสมสารเริ่มต้นด้วยการเติมสารอนุภาคปนเปื้อนหลัก และสารอนุภาคนาโน TiO_2 ลงในน้ำมันหม้อแปลงภายใต้สภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นอย่างเข้มงวด จากนั้นน้ำมันจะถูกกวนด้วยเครื่องกวนสารแบบเพลตตั้ง (Overhead Stirrer) เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งช่วยให้สารอนุภาคทั้งหมดกระจายตัวในน้ำมันได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer) [18] และหลีกเลี่ยงอนุภาคปนเปื้อนหลักติดกับแท่งกวนสารแม่เหล็ก (Magnetic Bar) ซึ่งทำให้ปริมาณสารผิดเพี้ยนจากที่กำหนดไว้ที่ 0.01% ของปริมาตรน้ำมันหม้อแปลง หลังจากการกวนเบื้องต้นด้วยเครื่องกวนสารแบบเพลตตั้งเสร็จสิ้นแล้ว กระบวนการต่อไป คือการใช้คลื่นอัลตราโซนิก (Ultra Sonication) ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการช่วยกระจายตัวของอนุภาคนาโนให้เข้ากับน้ำมันหม้อแปลง โดยใช้เครื่องสร้างคลื่นอัลตราโซนิกที่ทำงานภายใต้อุณหภูมิ 60°C กระบวนการนี้ใช้เวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งจะช่วยให้อนุภาคนาโนมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในระดับนาโน หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการอบไล่ความชื้นในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C เป็นระยะเวลา 24

ชั่วโมงอีกครั้ง เพื่อกำจัดความชื้นที่อาจหลงเหลือในน้ำมัน ก่อนที่จะนำมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า เนื่องจากความชื้นที่อาจหลงเหลือในน้ำมันหม้อแปลงจะส่งผลเสียต่อคุณสมบัติฉนวน และอาจนำไปสู่ผลการทดสอบที่คลาดเคลื่อน

หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการทั้งหมด ตัวอย่างที่ได้ทั้งหมดจะพร้อมทำการทดสอบหาค่าความคงทนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยขั้นตอนและรายละเอียดทั้งหมดของกระบวนการนี้แสดงดังในรูปที่ 4



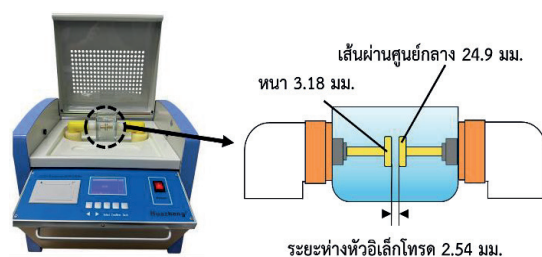
รูปที่ 4 ขั้นตอนการผสมสารอนุภาคในน้ำมันหม้อแปลง

2. การทดสอบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

การทดสอบนี้ถือเป็นวิธีที่สำคัญในการตรวจสอบคุณสมบัติฉนวนของน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาขีดจำกัดของน้ำมันในการทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับก่อนนำไปใช้งานจริง กระบวนการทดสอบนี้ช่วยประเมินความสามารถของน้ำมันในการป้องกันการเกิดการลัดวงจรไฟฟ้าภายใต้แรงดันสูง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบน้ำมันหม้อแปลงที่ปรับปรุงด้วยการเติมอนุภาคนาโน TiO_2 ซึ่งช่วยในการเสริมประสิทธิภาพความเป็นฉนวน และกรณีที่น้ำมันหม้อแปลงที่ถูกปนเปื้อนด้วยอนุภาคปนเปื้อนหลัก

การทดสอบดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดันเบรกดาวนรุ่น HZJQ-1 (Transformer Oil BDV Tester) ดังแสดงในรูปที่ 5 ที่ความถี่ 50 Hz พร้อมอิเล็กโทรดชนิด ระนาบ-ระนาบ มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.54 มิลลิเมตร เส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 24.9 มิลลิเมตร ความหนา 3.18 มิลลิเมตร และรัศมีขอบ 0.254 มิลลิเมตร แรงดันไฟฟ้าจะถูกเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 3 kV/s การดำเนินการเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM D877 [19] เพื่อให้แน่ใจว่าการกระจายตัวของอนุภาคปนเปื้อนหลักสามารถกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยตัวอย่างน้ำมันจะถูกกวนให้เข้ากันอย่างทั่วถึงเป็นเวลา 2 นาที โดยเครื่องกวน Overhead Stirrer ก่อนการทดสอบทุกครั้ง [20-21] สำหรับประเภทแต่ละตัวอย่างทดสอบทั้งหมดจะแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 5 เครื่องทดสอบค่าความคงทนต่อไฟฟ้ากระแสสลับและชุดทดสอบหัวอิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ

ตารางที่ 3 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

ลำดับ ตัวอย่าง	ประเภทของตัวอย่างทดสอบ	
	กรณี	รายละเอียด
1	ไม่ปนเปื้อน	Transformer Oil (TO)
2		TO + TiO_2
3	ปนเปื้อน	TO + Iron
4		TO + Iron + TiO_2

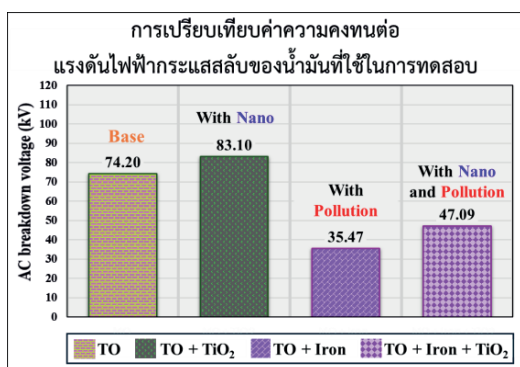
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

1. ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

จากผลการทดสอบ พบว่าน้ำมันหม้อแปลงที่มีการผสมอนุภาคนาโน TiO_2 มีความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสูงขึ้นที่ 11.99% (83.10 kV) เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงปกติที่มีการทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 74.20 kV โดยประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการเติมสารอนุภาคนาโน TiO_2 ร่วมกับสารลดแรงตึงผิว SPAN 80

ซึ่งช่วยให้สามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในน้ำมันหม้อแปลง การกระจายตัวนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้การป้องกันการลัดวงจรทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคนาโน TiO_2 มีผลโดยตรงต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในน้ำมันหม้อแปลงแล้ว อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านน้ำมันจะถูกหน่วงหรือชะลอการเคลื่อนที่ซึ่งส่งผลให้กระบวนการส่งผ่านอิเล็กตรอนในน้ำมันหม้อแปลงเกิดขึ้นได้ช้าลง [22]

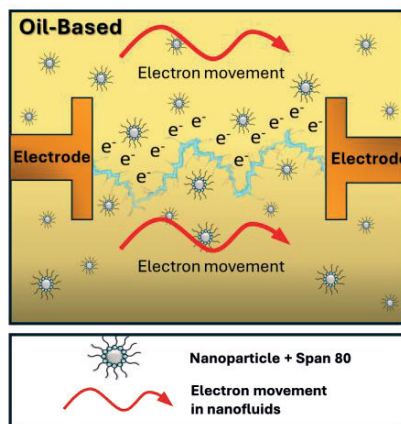
ในกรณีของน้ำมันหม้อแปลงปกติที่ปนเปื้อนด้วยอนุภาคเหล็ก ผลจากการทดสอบพบว่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับลดลงต่ำสุดที่ 35.47 kV คิดเป็น -51.54% เมื่อเทียบกับผลทดสอบในน้ำมันหม้อแปลงปกติ ในขณะที่น้ำมันหม้อแปลงที่ผสมอนุภาคนาโน TiO_2 และมีการปนเปื้อนด้วยอนุภาคเหล็ก มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 47.09 kV คิดเป็น -36.53% เมื่อเทียบกับผลทดสอบในน้ำมันหม้อแปลงปกติ ซึ่งจากผลทดสอบดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโน TiO_2 สามารถช่วยให้น้ำมันหม้อแปลงยังคงมีเสถียรภาพต่อค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแม้จะมีการปนเปื้อนด้วยอนุภาคเหล็ก ผลการทดสอบทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของน้ำมันที่ใช้ในการทดสอบ

อีกทั้งอนุภาคนาโน TiO_2 มีการเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian Motion) [23] ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบสุ่มที่ช่วยชะลอการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เป็นผลให้กระบวนการส่งผ่านอิเล็กตรอนเกิดขึ้นได้ช้าลง ทำให้การเกิดเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ (Streamer

Breakdown) ช้าลง และส่งผลให้ค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมสารอนุภาคนาโน TiO_2

ในขณะเดียวกันผลการทดสอบยังสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการนำไฟฟ้าแมกซ์เวลล์ [24] การนำไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนอนุภาคเหล็กสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2)

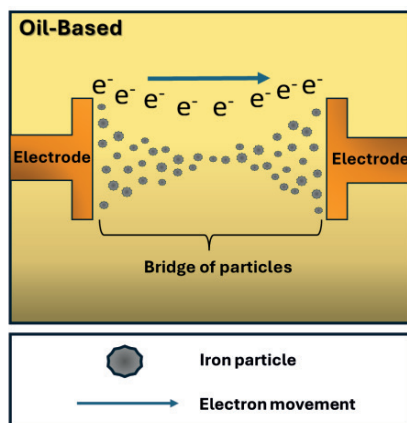
$$\gamma = \gamma_f \left[1 + \frac{3\phi}{(\alpha + 2)/(\alpha - 1) - \phi} \right] \quad (2)$$

โดยที่ γ และ γ_f คือค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนและไม่ปนเปื้อนตามลำดับ $\alpha = \gamma_p / \gamma_f$ คืออัตราส่วนค่าการนำไฟฟ้าของอนุภาคเซลล์โลสต่อน้ำมันหม้อแปลง และ ϕ คือปริมาณของอนุภาคเหล็กในน้ำมันที่ปนเปื้อน ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของเหล็กมีค่ามากกว่าน้ำมันมาก ดังนั้นจึงสามารถเขียนใหม่ให้ง่ายขึ้นได้ดังสมการที่ (3)

$$\gamma = \gamma_f [1 + 3\phi / (1 - \phi)] \quad (3)$$

ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนอนุภาคปนเปื้อนที่เพิ่มขึ้น จะเกิดฟองก๊าซมากขึ้นเมื่อเกิดความร้อน และความนำไฟฟ้าของน้ำมันทดสอบเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าความคงทนต่อไฟฟ้ากระแสสลับลดลงเมื่อจำนวนอนุภาคเหล็กเพิ่มขึ้น และการลดลงของค่าความคงทนต่อไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดขึ้น เมื่ออนุภาคเหล็กมีจำนวน

อนุภาคเพิ่มขึ้น ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง ตัวของอนุภาคเหล็กจะถูกเหนี่ยวนำเข้าหาหัวอิเล็กโทรดทำให้เกิดสะพานของอนุภาคบนแป้นระหว่างหัวอิเล็กโทรด [25] อนุภาคเหล่านี้ทำให้เกิดการคายประจุบางส่วนและเกิดการเบรกดาวน (Breakdown) ในที่สุดดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และการเกิดสะพานอนุภาค ในน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนอนุภาคเหล็ก

2. การวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วย Weibull

การศึกษาค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของตัวอย่างทดสอบ ได้รับการวิเคราะห์โดยใช้การแจกแจงแบบ Weibull Distribution เพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ Weibull แบบสองพารามิเตอร์เพื่อคำนวณค่าความน่าจะเป็นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4)

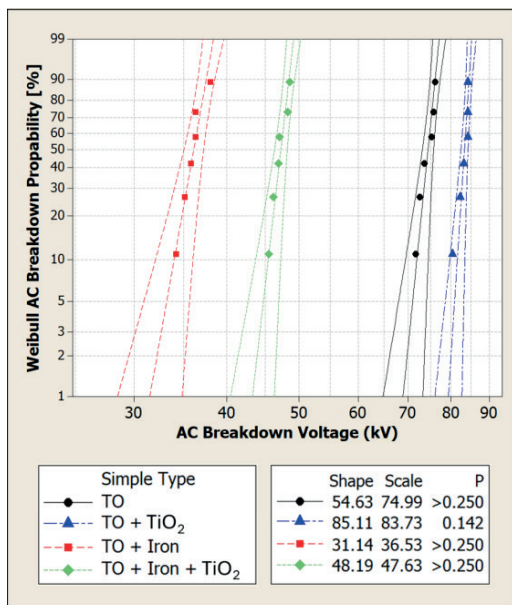
$$F(x) = 1 - e^{\left(-\frac{x}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (4)$$

ซึ่งกำหนดให้ $F(x)$ เป็นค่าความน่าจะเป็นสะสมของแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน นอกจากนี้ x คือแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน อีกทั้ง β คือพารามิเตอร์รูปร่าง (Shape Parameter) และ η คือพารามิเตอร์สเกล (Scale Parameter) ในกราฟ Weibull ค่าความน่าจะเป็น ρ ใช้เป็นตัวชี้วัดในการทดสอบความเหมาะสมในการกระจายตัวของข้อมูล [26]

จากการวิเคราะห์ด้วยการแจกแจง Weibull เมื่อพิจารณาจากค่า Shape Parameter (β) ซึ่งใช้บ่งบอกถึงความสม่ำเสมอของความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของฉนวน หากค่าสูง ผลทดสอบจะคงที่ไม่กระจาย โดยพบว่าน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมอนุภาคนาโน TiO_2 มีค่า Shape สูงสุด แสดงถึงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงและสม่ำเสมอที่สุด รองลงมาคือน้ำมันหม้อแปลงแบบปกติ ขณะที่การมีอนุภาคเหล็กปนเปื้อนในน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมและไม่ผสมอนุภาคนาโน TiO_2 ทำให้ค่า Shape ลดลง แสดงถึงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนไม่คงที่ ด้าน Scale Parameter (η) ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า พบว่าน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมอนุภาคนาโน TiO_2 มีค่า Scale สูงสุด แสดงถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดีที่สุด รองลงมาคือน้ำมันหม้อแปลงแบบปกติ น้ำมันหม้อแปลงผสมอนุภาคนาโน TiO_2 ที่ปนเปื้อนอนุภาคเหล็ก และน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนอนุภาคเหล็ก ตามลำดับ ในส่วนของ p-value (ρ) ใช้บ่งบอกถึงความเหมาะสมของการกระจายตัวของข้อมูล โดยทุกตัวอย่างทดสอบมีค่า $\rho > 0.250$ หมายถึงข้อมูลสามารถปรับเข้ากับ Weibull Distribution ได้ดี ยกเว้นน้ำมันหม้อแปลงที่ผสมอนุภาคนาโน TiO_2 มีค่าที่ 0.142 ซึ่งมีความมากกว่า 0.05 ถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ ไม่เบี่ยงเบนจากการแจกแจง Weibull มีความเหมาะสมในการอธิบายพฤติกรรมเบรกดาวนของน้ำมันทดสอบ [27] ดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 9

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ Weibull Distribution

ตัวอย่างทดสอบ	β	η	ρ
Transformer Oil (TO)	54.63	74.99	>0.250
TO + TiO_2	85.11	83.73	0.142
TO + Iron	31.14	36.53	>0.250
TO + Iron + TiO_2	48.19	47.63	>0.250



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับของตัวอย่างทดสอบ โดยใช้การวิเคราะห์ Weibull

สรุปผลการทดลอง

ผลการวิจัย พบว่าเมื่อผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ลงในน้ำมันหม้อแปลงจะช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านความเป็นฉนวนของน้ำมันได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในด้านของค่าความทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันหม้อแปลงแบบปกติ เนื่องจากอนุภาคนาโน TiO₂ สามารถชะลอการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ซึ่งผลดังกล่าวสามารถสังเกตได้ทั้งในสถานะที่น้ำมันไม่มีการปนเปื้อน และมีการปนเปื้อนด้วยอนุภาคเหล็ก อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่น้ำมันหม้อแปลงที่ผสมสารอนุภาคนาโน TiO₂ และมีการปนเปื้อนด้วยอนุภาคเหล็ก ค่าความทนแรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มที่ลดลงแต่ยังคงสูงกว่าน้ำมันหม้อแปลงที่ปนเปื้อนด้วยอนุภาคเหล็ก จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของอนุภาคนาโน TiO₂ ในการนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับฉนวนไฟฟ้าในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการดำเนินงาน การนำเสนอ และ

การเผยแพร่ผลงานวิจัยฉบับนี้และขอขอบคุณทีมวิจัยไฟฟ้าแรงสูง หน่วยวิจัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง (HVRU-RMUTI)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jiosseu, J. L., Mengounou, G. M., Nkouetcha, E. T., and Imano, A. M. (2023). Effect of ageing of monoesters and mineral oil on the propagation of creeping discharges, *Applied Journal of Electrostatics*, vol. 123, pp. 1-13.
- [2] Dan, M., Hao, J., Liao, R., Cheng, L., Zhang, J. and Li, F. (2019). Accumulation behaviors of different particles and effects on the breakdown properties of mineral oil under DC voltage, *Applied Journal of Energies*, vol. 12(12), pp. 1-15.
- [3] Saaidon, S., Chen, G. and Golosnoy, I. (2017). Influence of temperature variation of oil contamination on electrical performance of power transformer, *Applied Conf. IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, Manchester, United Kingdom, pp. 1-5.
- [4] Xia, S., Pan, C., Yao, Y., Zheng, Z., Qin, S., Tang, J. and Zhu, S. (2023). Bridging characteristics of cellulosic particles in flowing transformer oil, *Applied IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 30(3), pp. 1056–1065.
- [5] Wang, K., Wang, F., Li, J., Zhao, Q., Wen, G. and Zhang, T. (2018). Effect of metal particles on the electrical properties of mineral and natural ester oils, *Applied IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25(5), pp. 1621–1627.
- [6] CIGRE, (2000). *effect of particles on transformer dielectric strength*, Working Group 17 of Study Committee 12, pp. 6–42.



[7] Mansour, D. E. A., Shaalan, E. M., Ward, S. A., Dein, A. Z. El., Karaman, H. S. and Ahmed, H. M. (2019). Multiple nanoparticles for improvement of thermal and dielectric properties of oil nanofluids, *Applied IET Science, Measurement & Technology*, vol. 13(7), pp. 968–974.

[8] Suriyasakulpong, C. and Muangpratoom, P. (2024). Effect of span 80 surfactant in transformer oil based TiO_2 nanofluids on the electrical properties of lightning impulse voltage, *Applied Conf. International Electrical Engineering Congress (IEECON)*, Pattaya Chonburi, Thailand, pp. 1–4.

[9] IEC 60296. (2020). Fluids for electrotechnical applications – Mineral insulating oils for electrical equipment. *International Electrotechnical Commission (IEC)*, Geneva, Switzerland.

[10] Amin, N. A. M., Ishak, M. T. and Suhaimi, N. S. (2022). Cellulose Particles' Effect on the Electrical Field Distribution Between Palm Oil and Mineral Oil Insulation Systems, *Applied IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, Langkawi Kedah, Malaysia, pp. 464–468.

[11] Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, USA. (2006). URL: <https://www.thermofisher.com>, access on 25/10/2025

[12] Huang, M., Li, S., Zhang, L., Yao, Y., Lv, Y., Chen, Xi. and Pang, W. (2022). Improvement of breakdown and flashover properties against thermal aging of oil paper insulation through addition of TiO_2 nanoparticles, *Applied IET Generation,*

Transmission & Distribution, vol. 17(7), pp. 821–831.

[13] Inframat Advanced Materials LLC, Company information, 151 Progress Dr, Manchester, CT, USA. <http://www.advancedmaterials.us>, access on 25/10/2025

[14] Al-Yami, A. S., Vikrant, W., Abrar, A. S., and Hussain, A. B. (2018). Emulsifiers used in designing emulsion based drilling fluids. *Journal of Chemistry*, vol. 7(4), pp. 1–20.

[15] Pant, A., Jha, K. and Singh, M. (2019). Role of excipient's HLB values in microemulsion system, *Applied IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences*, vol. 14(2), pp. 1–6.

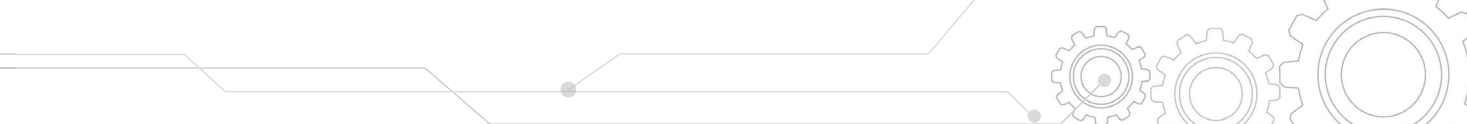
[16] Sima, W., Shi, J., Yang, Q., Huang, S., and Cao, X. (2015). Effects of conductivity and permittivity of nanoparticle on transformer oil insulation performance: experiment and theory, *Applied IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22(1), pp. 380–390.

[17] Atiya, E. G., Mansour, D. E. A., Khattab, R. M., and Azmy, A. M. (2015). Dispersion behavior and breakdown strength of transformer oil filled with TiO_2 nanoparticles, *Applied IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22(5), pp. 2463–2472.

[18] Saufi, M. A. and Mamat, H. (2022). Comparison of dispersion techniques of graphene nanoparticles in polyester oil, *Applied Materials Today: Proceedings*, vol. 66(5), pp. 2747–2751.

[19] ASTM D877-02. (2002). Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes.





[20] Cheng, L., Jiang, Y., Dan, M., Wen, H., Li, Y., Qin, W., and Hao, J. (2020). Effects of fiber and copper particles on conductivity and breakdown characteristics of natural ester and mineral oil under DC voltage, *Applied Energies*, vol. 13(7), pp. 1–16.

[21] Hao, J., Liao, R., Dan, M., Li, Y., Li, J., and Liao, Q. (2017). Comparative study on the dynamic migration of cellulose particles and its effect on the conductivity in natural ester and mineral oil under DC electrical field, *Applied IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11(9), pp. 2375–2383.

[22] Nor, S. F. M., Azis, N., Jasni, J., Ab Kadir, M. Z. A., Yunus, R., and Yaakub, Z. (2017). Investigation on the electrical properties of palm oil and coconut oil based TiO_2 nanofluids, *Applied IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24(6), pp. 3432–3442.

[23] Fernández, I., Valiente, R., Ortiz, F., Renedo, C. J., and Ortiz, A. (2020). Effect of TiO_2 and ZnO nanoparticles on the performance of dielectric nanofluids based on vegetable esters during their aging, *Applied Nanomaterials*, vol. 10(4), pp. 1–18.

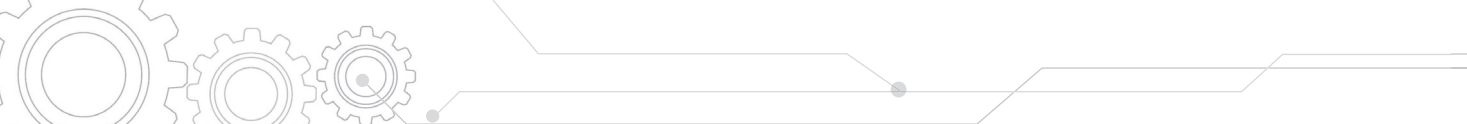
[24] Zhang, J., Li, J., Wang, Y., Li, Y., and Li, X. (2018). Breakdown voltage of transformer oil contaminated with iron particles at pulsating DC voltage, *Applied Electric Power Components and Systems*, vol. 46(11–12), pp. 1321–1329.

[25] Yao, Y., Su, Z., Pan, C., Xia, S., Yu, M., and Tang, J. (2023). Distributed characteristics of free metallic particles in flowing transformer oil under DC and AC voltages, *Applied IEEE Transactions on Dielectrics and*

Electrical Insulation, vol. 30(4), pp. 1441–1450.

[26] Jin, H. (2015). Dielectric Strength and Thermal Conductivity of Mineral Oil based Nanofluids, Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Amsterdam, the Netherlands

[27] Safari, M. A. M., Masseran, N., Majid, M. H. A., and Tajuddin, R. R. M. (2025). Robust estimation of the three-parameter Weibull distribution for addressing outliers in reliability analysis, *Applied Scientific Reports*, vol.15(1), pp. 1–14.



Investigation on the Performance and Exhaust Gas Emissions of Diesel Engine Fueled with Waste Rubber Bio-Oil

Pongpisut Suwunnasopha and Chatcharin Sakkampang*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan
Khon Kaen Campus, 150 Srichan road, Muang, Khon Kaen, 40000

*Corresponding Author: Chatcharin.sk@rmuti.ac.th

Received 26 November 2025; Received in revised form 19 January 2026; Accepted 20 January 2026

Abstract

This research investigated the performance and emission characteristics of a Kubota ET115 agricultural diesel engine by using waste rubber bio-oil from the pyrolysis process blended with diesel. The blended ratios of the fuels (waste rubber bio-oil: diesel) were 0:100, 5:95, 15:85, 25:75, and 35:65 by volume. For the investigation, a water brake dynamometer was used for evaluation. Following this, the experimental results showed that an increase in the proportion of waste rubber bio-oil resulted in a decrease in engine torque and power by approximately 2.74–15.74% and 2.96–15.74%, respectively. On the other hand, BSFC and BSEC increased by 39.18–66.67% and 39.91–62.70%, respectively. BTE decreased by 30.56–53.73%. In terms of emissions, the findings showed that CO₂ and soot emissions had decreased by 0.89%–6.48% and 1.22%–36.13%, respectively. However, there was a significant increase in CO and NO_x emissions, where CO rose by 8.87–66.21% and NO_x by 28.57–123.97%. However, this investigation provides evidence supporting the valorization of waste rubber bio-oil into an alternative fuel.

Keywords: Alternative Energy, Bio-Oil, Performance, Emissions, Waste Rubber Bio-Oil

1. Introduction

The reliance on diesel engines in the agricultural sector has increasingly contributed to fuel consumption and environmental impact growth [1-2]. This situation, Thailand's national energy policy aims to promote reducing the use of fossil energy and switching to alternative energy, achieving a share of no less than 36% by 2037 [3-4]. Previous studies have used of agricultural crops for conversion to

alternative energy sources, including palm oil, sugarcane, cassava, etc. [5-6]. In addition to these crops, it has been studied that rubber cup lump can be used to produce oil fuel by the pyrolysis process [7]. This process converts biomass or organic waste into biofuels under anaerobic conditions. One of the products obtained from this process is a liquid fuel called pyrolysis oil, which belongs to the group of bio-oils that can be used to



replace fossil fuels [8]. Therefore, rubber is another motivating alternative.

From an economic outlook, Rubber is a major economic crop that plays a significant role in Thailand [9]. The price of cup lump rubber fluctuates according to domestic and international market conditions. From early November 2023 to 2025, the price changed as follows: it averaged 45 baht/kg in 2023, rose to 58 baht/kg in 2024, then decreased to approximately 51 baht/kg in 2025 [10]. Such variations have led to the accumulation of excess or waste rubber cup lumps at certain times, which cannot be sold commercially, presenting an opportunity to use these raw materials to produce biofuels.

Although bio-oil is an energy source that can replace fossil fuels, it still has limitations in its chemical properties, such as a low heating value, high water, soot and oxygen content, as well as chemical instability due to its numerous organic constituents. Therefore, it cannot be used directly in engines in the long term. It must be blended with gasoline or diesel fuel first [11-12]. However, previous research reported that blending bio-oil derived from rubber pyrolysis with diesel at an appropriate ratio can maintain the smooth operation of agricultural diesel engines [7]. This reflects not only an approach to agricultural waste management but also an alternative to reduce fuel costs for farmers and promote a sustainable circular economy, thereby enhancing the country's long-term energy security.

Based on these concepts, the researchers are interested in studying the performance

and exhaust gas composition of small diesel engines powered by bio-oil pyrolyzed from waste rubber cup lumps without engine modification. In order to perform the analysis of the effects of different fuel blends on engine performance. Most previous research has focused on fuels from other plants, and the performance of rubber has not been studied in depth. The results of this study are expected to contribute to engineering understanding of the potential of bio-oil from waste rubber cup lumps as a renewable fuel and serve as a guideline for efficient and sustainable future usability.

2. Materials and methods

2.1 Test fuels

In this study, the properties of bio-oil derived from waste rubber cup lump were analyzed based on the data reported by Youngpattana et al. [7], Which has been produced the oil through a fast pyrolysis process conducted at a temperature of 500 °C. The obtained data were used to calculate the properties of the blended fuels according to the mixing rule. The viscosity of the blended fuel was determined using the logarithmic mixing rule, as expressed in equation (1), where P_{mix} represent the viscosity of the fuel blend, V_i represent the volumetric fraction of each component, and P_i are the viscosity of each individual fuel.

$$\ln(P_{mix}) = \sum (V_i \times \ln(P_i)) \quad (1)$$

The properties of the blended fuels were calculated using the Linear Mixing Rule as expressed in equation (2), where P_{mix}

represent the property of the mixture, V_i are the volumetric fraction of the fuel, and P_i are the corresponding property of that fuel.

$$P_{mix} = \sum (V_i \times P_i) \quad (2)$$

When comparing the properties of bio-oil derived from waste rubber cup lump with those of diesel fuel according to the Department of Energy Business specification titled “Characteristics and Quality of Diesel Fuel B.E. 2567 (2024)” [13] and ASTM standards, the summarized results are presented in the Table. 1. To assess the suitability of such fuels for use in diesel engines, the abbreviation “RB” is used to represent waste rubber cup lump bio-oil blend, with the number following indicating the blending ratio with diesel fuel. This bio-oil has a lower cetane number, cause prolonged ignition delay, which could lead to incomplete combustion and more CO

emissions. Additionally, the lower heating value of bio-oil results in reduced energy release during combustion, directly impacting engine torque and braking power. Although the viscosity of bio-oil is lower than diesel fuel, allowing for better atomization, these characteristics are expected to influence combustion temperature, thermal efficiency, and exhaust emission characteristics, particularly regarding NO_x and soot formation [14].

2.2 Test engine

A Kubota ET 115 was a small four-stroke diesel engine, which is a single-cylinder, water-cooled, and swirl chamber type [15]. This engine was used in the study without modification. The test engine’s technical information is shown in the following Table. 2, the engine is connected to a water brake dynamometer, which is shown in Figure 1.

Table 1 Properties of fuel comparison according to the ASTM standards.

Fuel Type	Fuel properties				
	Flash Point (°C) ASTM D93	Viscosity (cSt) ASTM D445	Density @ 15.6 °C (g/cm ³) ASTM D1298	Cetane Index ASTM D976	Heating Value (MJ/kg) ASTM D240
Diesel	64.00	3.39	0.85	56.99	47.47
Waste Rubber Cup Lump Oil	28.50	1.32	0.85	30.88	40.60
RB5	58.42	3.23	0.85	55.68	47.12
RB15	55.27	2.94	0.85	53.07	46.43
RB25	52.12	2.67	0.85	50.46	45.75
RB35	48.98	2.43	0.85	47.85	45.06

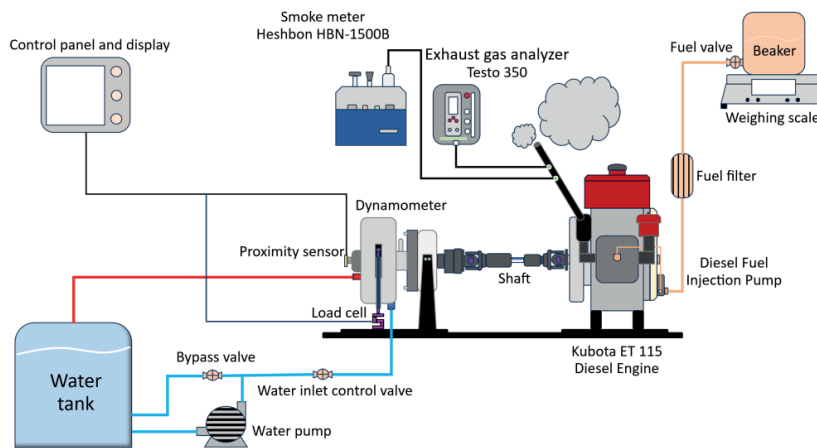


Figure. 1 Schematic diagram of the experimental setup.

Table 2 Technical information of the engine

Details	Technical Information
Model	Kubota ET 115
Engine type	Horizontal water cooled 4-stroke 1 cylinder
Combustion type	Swirl chamber
Cylinder width × stroke	94×92 mm
Cylinder volume	624 cm ³
Maximum horsepower	11.50 hp at 2400 rpm
Continuous horsepower	10.50 hp at 2400 rpm
Maximum torque	34.32 Nm at 1800 rpm
Compression ratio	21:1
Fuel consumption	210 g/hp-h

2.3 Test procedure

2.3.1 Performance testing

Engine performance and emissions tests were conducted over a five-speed range from 800 to 2400 rpm. These tests were performed at 80%, 90%, and 100% throttle

positions, due to average the engine load at the maximum throttle position of the fuel pump valve that similar testing has been performed in previous study [16]. The test apparatus details, as shown in Table 3, included a Stuska Dyno water brake dynamometer and a Zega S-Beam strain gauge load cell that margin of error from the actual measurement is $\pm 1\%$. The load cell receives force from the engine via a driveshaft connected to the flywheel. Fuel consumption was measured during the engine performance tests. The mass of fuel consumed in 5 minutes was measured with a digital scale Tiny FEH-5000. Brake specific fuel consumption (BSFC) was then calculated as the mass of fuel consumed per unit of brake power produced, expressed in kilograms per kilowatt hour (kg/kWh) according to equation (3). This allows direct comparison of engine efficiency for each fuel type, where $\dot{m}_f$ represents fuel flow rate in kg/h, and P_B represents engine brake power in watt (W).

$$Bsfc = \frac{\dot{m}_f}{P_B} \quad (3)$$

Table 3 Details of the engine performance and emission instruments.

Dynamometer set		
Instruments	Ranges	Accuracy
Load cell Zega	1-100 kg	±0.02 %FS
Proximity Sensor	0.80-35.00 mm	Repeatability ±0.10 mm
Scale Tiny FEH-5000	1-5000 g	±1 g
Exhaust gas analyzer, Testo 350		
Gas type	Ranges	Accuracy
CO	0–10,000 ppm	±10 ppm < 200 ppm
CO ₂	0–50 vol. %	±0.30% < 25 vol. %
NO _x	0–500 ppm	±5 ppm < 100 ppm
Smoke meter, Heshbon HBN-1500B		
Ranges		Accuracy
0-100%		±1%

From engine performance testing, energy efficiency should be evaluated by brake specific energy consumption (BSEC), by considering the heating value of the fuel as well. In calculating BSFC, the unit is kilogram per kilowatt hour (kg/kWh). The heating value of the fuel is in megajoules per kilogram (MJ/kg), resulting in BSEC in megajoules per kilowatt hour (MJ/kWh), as specified in equation (4). The BSEC value represents the amount of energy from the fuel the engine uses to produce per unit of mechanical energy. When comparing the efficiency of alternative fuels with various energy properties, a low BSEC value is crucial because it shows that the engine can use the fuel's energy more effectively [17].

$$Bsec = Bsf \times HeatingValue \quad (4)$$

Brake Thermal Efficiency (BTE), which reflects the proportion of energy from the fuel that is converted to mechanical power of the engine [18], is shown in equation (5), where P_B is the engine power in kW and $\dot{m}_f$ represents the fuel mass flow rate expressed in (kg/h).

$$BTE = \frac{P_B \times 3600}{\dot{m}_f \times HeatingValue} \times 100 \quad (5)$$

2.3.2 Exhaust gas emissions testing

The exhaust gas composition emitted from the engine during testing was measured using a TESTO 350 exhaust gas analyzer. The probe was installed at the exhaust pipe outlet to measure the concentrations of carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), as shown in the technical specifications presented in Table 3. Subsequently, the pollutant concentrations obtained from the TESTO 350 in volumetric terms (parts per million, ppm) were converted into mass-specific emissions per unit of energy output (g/kWh). This conversion could not be achieved solely through mathematical unit transformation but required several additional parameters, including the measured exhaust gas content, exhaust gas mass flow rate, engine power output, molecular weights of each pollutant species, average molecular weight of the exhaust gas, as well as exhaust gas temperature and pressure during measurement [19]. Onward, the calculation procedure is as follows: the mass concentration (mg/m³) was first determined according to Equation (6), where MW represents the molecular weight of the

gas ($\text{NO}_x = 44 \text{ g/mol}$, $\text{CO} = 28 \text{ g/mol}$, $\text{CO}_2 = 44 \text{ g/mol}$), P denotes the exhaust gas pressure, 0.0821 is the universal gas constant, and T indicates the exhaust gas temperature in °K.

$$\text{mg} / \text{m}^3 = \frac{\text{ppm} \times \text{MW} \times p}{0.0821 \times T} \quad (6)$$

The mass flow rate was then calculated using equation (7), where *ExhaustFlowRate* expressed in cubic meters per hour (m^3/h).

$$\text{Mass Flow} = \frac{\text{mg} / \text{m}^3 \times \text{Exhaust Flow Rate}}{1000} \quad (7)$$

For the calculation of the mass-based emission rate per unit of engine power output (g/kWh), equation (8) applied, where the emission rate is determined from the ratio of the mass flow rate of the exhaust gases to the engine power, P_b expressed in kilowatts (kW).

$$\text{Emission} = \frac{\text{Mass Flow}}{P_b} \quad (8)$$

The measurement of black smoke opacity or soot was conducted while the engine operated under load at a speed of 1,600 rpm. The exhaust gas opacity, expressed as smoke opacity, was measured using a Heshbon HBN-1500B smoke meter. The results are presented in Table 3 on the previous pages.

3. Experimental results and discussion

During the engine performance and emissions tests, the environmental conditions at the test site were continuously monitored and recorded, including an air temperature of approximately 32.24 °C, a relative humidity of approximately 57.32 %, and an atmospheric pressure of approximately 990.99 hPa, as measured by the BME 280 weather station module. The

results of the performance test and exhaust gas composition of a small diesel engine using bio-oil from waste rubber cup lumps will be presented in sequence in the following sections.

3.1 Analysis of the engine performance

This test evaluated engine performance in terms of brake torque, brake power, brake specific fuel and energy consumption, and brake thermal efficiency. The test results revealed that the engine using bio-oil blend had lower torque and brake power compared to diesel. These were mainly due to the lower heating value of the bio-oil, resulting in less energy combustion. Furthermore, the specific fuel consumption of the bio-oil blend was higher than that of diesel, indicating a decrease in energy efficiency from BSEC and BTE assessments compared to using standard diesel.

3.1.1 Torque

Figure 2 shows the torque variation of the engine running on different fuel blends. It was found that the torque decreased with increasing bio-oil concentration. On average, the engine running on waste rubber cup lump oil had slightly lower torque than a diesel. For low blending ratios, the torque

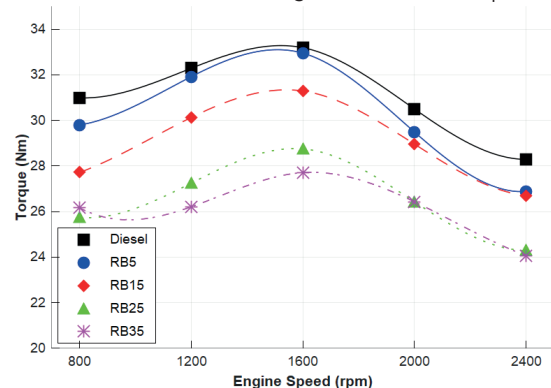


Figure 2 Torque of the engine by using mixed fuel at different rates

variation was not significant, but there was a clear change when the bio-oil concentration was increased.

The test results showed that the RB5 and RB15 blends provided engine torque values close to those of standard diesel. The maximum torque of the diesel was 33.19 Nm at 1,600 rpm, while the RB5 blend had a maximum torque of 32.95 Nm at the same speed. There is an occurrence of incomplete combustion, which was found due to the physical characteristics of the oil, that are low viscosity, low cetane number, and low heating value, which comparable to previous research [20].

3.1.2 Brake power

Figure. 3 shows the variation of brake power with respect to engine speed for bio-oil blends. The test results showed that engine brake power decreased with increasing bio-oil concentration, which was due to the decreased heating value of the blend between bio-oil and standard diesel.

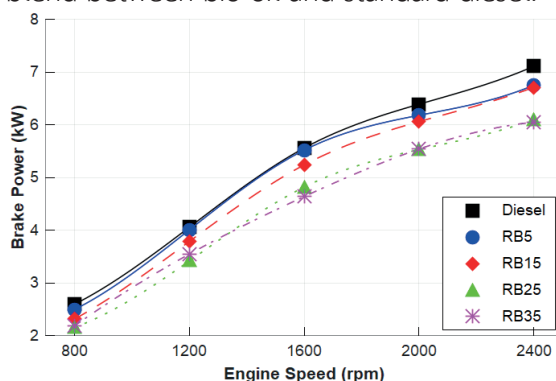


Figure 3 Brake power of the engine by using mixed fuel at different rates.

The test results indicated that the maximum brake power of the engine using standard diesel fuel was 7.11 kW at 2,400 rpm, while the engine using RB5 blend had a maximum brake power of 6.75 kW at the

same rpm, which was slightly lower than the maximum brake power of standard diesel fuel by approximately 5.19%. For RB15, RB25, and RB35 blends, the maximum brake power decreased by 5.78%, 15.29%, and 16.11%, respectively. The reduction in brake power in the low concentration blend ratios, which is consistent with previous research [21], which are related to the behavior of torque.

3.1.3 Brake specific fuel consumption

Figure. 4 shows the study results of the variation of specific fuel consumption (BSFC) with engine speed when using bio-oil in different blend proportions. The tendency of BSFC to decrease with increasing engine speed was found in all tested conditions. The engine showed the highest BSFC value at the speed range of 800–1,200 rpm. And the test found that diesel gave the lowest BSFC values of 0.33 kg/kWh at 2400 rpm, while RB35 had the highest BSFC value of 1.32 kg/kWh at 800 rpm. For the blended oil,

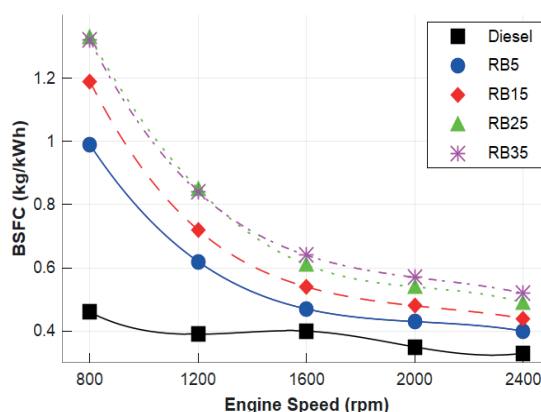


Figure 4 Brake specific fuel consumption of the engine by using mixed fuel at different rates that explained that this phenomenon is due to the lower heating value of bio-oil, resulting in a higher fuel consumption rate to maintain the energy level.

the average BSFC was higher than that of diesel by 39.18 (RB5), 52.83 (RB15), 64.35 (RB25), and 66.67 (RB35), respectively. This is consistent with the research reference [22].

3.1.4 Brake specific energy consumption

Figure 5 shows the trend of brake specific energy consumption (BSEC) values with respect to engine speed for bio-oil blends. The analysis results indicate that diesel has the lowest BSEC value in all speed ranges, following its higher energy efficiency than the blends [23]. The BSEC value tends to be highest at low engine speeds in all blends, especially for RB25 and RB35 blends, which give the highest BSEC values of 60.72 and 71.28 MJ/kWh at 800 rpm, respectively, and the average BSEC of standard diesel and RP35 is significantly different by 62.70%. With the behavior of BSEC is consistent with BSFC. However, as the engine speed increases, the BSEC of the blends decreases and tends to approach the BSEC of standard diesel.

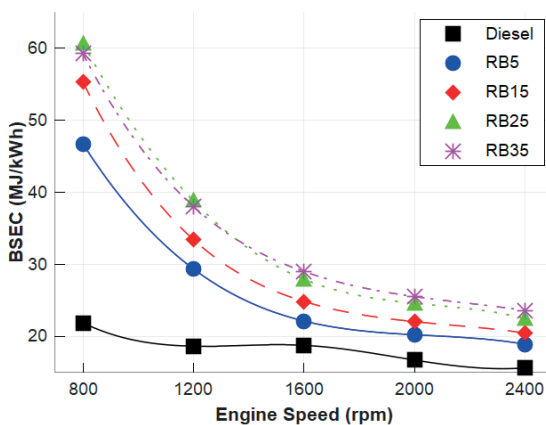


Figure 5 Brake Specific energy consumption of the engine by using mixed fuel at different rates.

3.1.5 Brake thermal efficiency

Figure 6 shows the variation of Brake Thermal Efficiency (BTE) with engine speed for bio-oil blends. The evaluation results showed that BTE decreased with increasing bio-oil concentration, which was due to the decreased heating value indicating the engine's ability to convert thermal energy from fuel combustion into work [24]. The average BTE of the engine using standard diesel was 19.88%, while the engine using RB5 blend had an average BTE of 14.61%, which was approximately 30.56% lower than the average BTE of the diesel, and tends to increase with the concentration of bio-oil. For RB15, RB25, and RB35 blends, the BTE decreased by 40.90%, 51.49%, and 53.73%, respectively. This indicates that the engine converts less heat energy from the fuel into mechanical work than diesel.

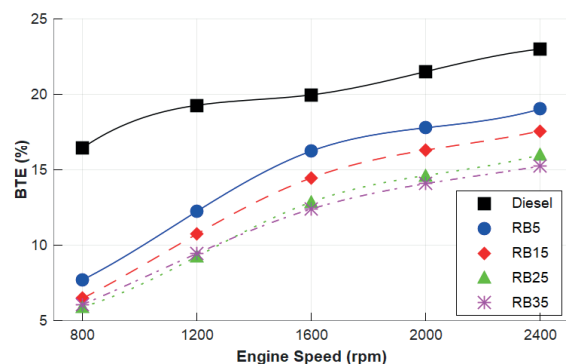


Figure 6 Brake thermal efficiency of the engine by using mixed fuel at different rates.

3.2 Analysis of exhaust emissions

The emission analysis results showed that the use of bio-oil blends significantly affected diesel engine emissions. The bio-oil blends were found to produce lower CO₂ emissions than standard diesel. Conversely, the use of bio-oil blends produced higher CO

and NO_x emissions than diesel, which may be due to the higher combustion temperature and the reduced of cetane number. In terms of soot, a lower trends.

3.2.1 Carbon dioxide emissions

Carbon dioxide emissions (CO₂) are a common outcome of the combustion process of all fuel types. However, the results showed decrease in CO₂ emissions when using higher ratios of bio-oil. This can be explained by the higher intramolecular oxygen content of bio-oil than diesel, resulting in higher combustion temperatures and lower carbon emissions in the form of CO₂ compared to diesel [25]. On average, the use of bio-oil in proportions of RB5, RB15, RB25, and RB35 resulted in CO₂ emissions reductions in average of 0.89, 2.44, 3.42, and 6.48%, respectively, as shown in Figure 7.

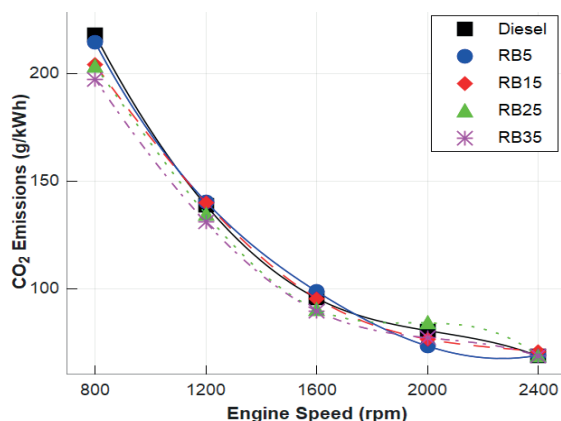


Figure 7 Effect of CO₂ from the engine by using mixed fuel at different rates.

3.2.2 Carbon monoxide emissions

The results showed that the carbon monoxide (CO) emissions of diesel engines had an increasing trend when the blending percentage was increased in average by 8.87%, 23.64%, and 43.55% for RB5, RB15, and RB25, respectively, especially at the

RB35 ratio, which gave the highest increment of CO emission of 66.21% compared to the standard diesel, as shown in Figure. 8. This case can be explained by the increased oxygen content in the combustion process resulting in incomplete oxidation of carbon molecules, and the change of physical properties of the blended fuel, such as the reduced cetane number and heating value, which is consistent with the indication from the previous research [26] that indicated the relationship between the oxygen (O₂) composition of the fuel and the CO formation under incomplete combustion conditions.

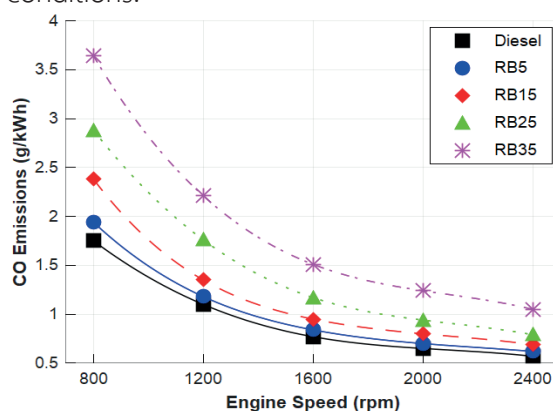


Figure 8 Effect of CO from the engine by using mixed fuel at different rates.

3.2.3 Nitric oxide emissions

The test results showed the increase in nitric oxide (NO_x) emissions with all bio-oil blend proportions, with the NO_x contents increasing by 28.57, 66.67, 95.53, and 123.97% for RB5, RB15, RB25, and RB35 blends, respectively, as shown in Figure 9. This increase was directly related to the high oxygen content of the biofuels and the higher combustion temperature. The NO_x generation mechanism was explained by the Zeldovich Mechanism, in which nitrogen in

the air reacts with oxygen to form NO_x . This result is consistent with the previous research [27].

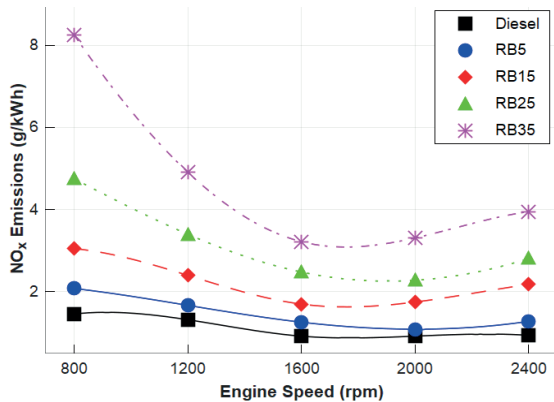


Fig. 9 Effect of NO_x from the engine by using mixed fuel at different rates.

3.2.4 Soot emissions

The results showed that the smoke opacity was inversely relational to the bio-oil blending ratio, showing a decreasing trend with increasing biofuel ratio. At 1,600 rpm, the smoke opacity of standard diesel was 57.77%, while waste cup lump rubber bio-oil gave lower smoke opacity at all blending ratios, reducing smoke by 1.22–36.13% compared to standard diesel, as shown in Figure 10. This phenomenon could be explained by the higher oxygen content in biofuel, promoting higher combustion temperature, which causes the reduction of particulate matter (PM) compounds of the exhaust, which is consistent with previous studies [28–30] that reported the relationship between fuel molecular structure and soot formation. This has beneficial effects on both the environment and public health. Furthermore, it leads to cleaner components within the combustion system.

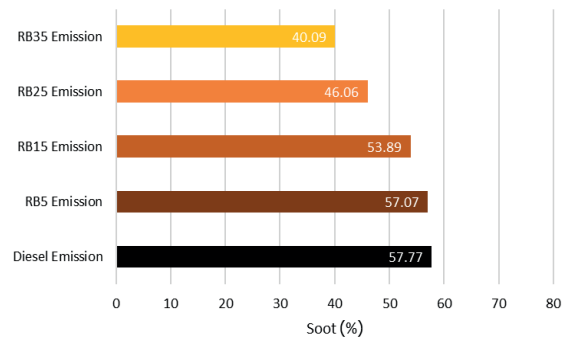


Figure 10 Effect of soot from the engine by using mixed fuel at different rates.

4. Conclusions

In this study, the bio-oil produced from waste rubber cup lump which has not yet undergone the distillation process or quality improvement, was used as blended fuel in a four-stroke diesel engine throughout the tests. With the test results were compared with diesel and blended fuel, assessing average performance and exhaust emissions, as shown in Table. 4. By the results demonstrated that bio-oil from the waste rubber cup lump “RB” which at the highest blend ratio tested (RB35), it provided an average brake torque of only 15.74% lower than diesel fuel, despite an average BSFC increase of 66.67%, it represents an alternative energy option due to Thailand's high rubber production capacity and its potential to reduce greenhouse gas emissions especially CO_2 by 0.89–6.48% generated by engine combustion. Finally, future research should focus on improving fuel properties, particularly cetane rating, and injection timing optimization to reduce emissions and enhance engine performance to be appropriate to the tested fuel. Furthermore, it is recommended to include

Table 4 The percentage difference in engine performance and emissions utilizing bio-oil at varying blending ratios.

Ratios	Average performance									
	T (Nm)	% diff.	P (kW)	% diff.	BSFC (kg/kWh)	% diff.	BSEC (MJ/kWh)	% diff.	BTE (%)	% diff.
Diesel	31.05	-	5.14	-	0.39	-	18.35	-	19.88	-
RB5	30.21	2.74	4.99	2.96	0.58	39.18	27.50	39.91	14.61	30.56
RB15	28.96	6.97	4.82	6.43	0.67	52.83	31.25	52.02	13.13	40.90
RB25	26.49	15.85	4.41	15.29	0.76	64.35	34.93	62.24	11.74	51.49
RB35	26.52	15.74	4.39	15.74	0.78	66.67	35.11	62.70	11.46	53.73

Ratios	Average emission							
	CO ₂ (g/kWh)	% diff.	CO (g/kWh)	% diff.	NO _x (g/kWh)	% diff.	Soot %	% diff.
Diesel	120.20	-	0.97	-	1.11	-	57.77	-
RB5	119.14	0.89	1.06	8.87	1.48	28.57	57.07	1.22
RB15	117.30	2.44	1.23	23.64	2.22	66.67	53.89	6.95
RB25	116.16	3.42	1.51	43.55	3.14	95.53	46.06	22.56
RB35	112.65	6.48	1.93	66.21	4.73	123.97	40.09	36.13

detailed combustion analysis, including in-cylinder pressure measurements and heat release rate evaluation, to clarify the relationship between ignition delay, combustion temperature, and gas formation when using waste rubber bio-oil. Future research should improve fuel properties, especially the cetane index. Optimizing injection timing is also important to lower emissions and enhance engine performance for the tested fuel. It is also recommended to include a detailed combustion analysis. In-cylinder pressure measurements and heat release rate evaluation would clarify the links among ignition delay, combustion temperature, and gas formation when using waste rubber bio-oil.

5. Acknowledgements

The authors would like to express our sincere gratitude to the department of mechanical engineering, faculty of

engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen campus, for providing the facilities, research equipment, and various resources that greatly supported the successful completion of this study.

6. References

- [1] Ministry of Energy. (2022). Diesel price trend and its impact on agricultural machinery costs. Ministry of Energy, Thailand.
- [2] Office of Agricultural Economics. (2021). Agricultural economics in Thailand: Policy analysis and outlook. Ministry of Agriculture and Cooperatives, Thailand.
- [3] Ministry of Energy. (2008). 15-year Renewable Energy Development Plan 2008-2022. Ministry of Energy, Thailand.
- [4] Khurawat, W. (2024). Alternative Energy Development Plan (AEDP 2024). Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, Thailand.



[5] Pleanjai, S., Gheewala, S. H., and Garivait, S. (2007). Environmental evaluation of biodiesel production from palm oil in a life cycle perspective, *Asian Journal on Energy and Environment*, vol. 8(1), pp. 15-32.

[6] Chueathao, K. (2018). The impact of ethanol demand on cassava, sugarcane, molasses, and gasohol, *Journal of Business, Innovation and Sustainability*, vol. 13(1), pp. 150-168.

[7] Youngpattana, P., Phasorn, C., and Laloon, K. (2024). Biofuel production from rubber by pyrolysis method, *Agricultural and Biological Engineering*, vol. 1(3), pp. 84-87.

[8] Czernik, S. and Bridgwater, V. (2004). Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil, *Energy & Fuels*, vol. 18(2), pp. 590-598.

[9] Kolkanon, P. (2022). Trend of rubber collection value in Thailand's cooperative sector. Cooperative Auditing Department, Thailand.

[10] The Thai Rubber Association. (2025). Local rubber market prices, The Thai Rubber Association, Thailand.

[11] Marsman, J. H., Wildschut, J., Evers, P., Koning, D. S. and Heers, H. J. (2008). Identification and classification of components in flash pyrolysis oil and hydro deoxygenated oils by two-dimensional gas chromatography and time-of-flight mass spectrometry. *Journal of chromatography A*, vol. 1188(1), pp. 17-25.

[12] Murugan, S., Ramaswamy, M. C. and Nagarajan, G. (2008). A comparative study on the performance, emission and combustion studies of a DI diesel engine using distilled

tire pyrolysis oil-diesel blends, *Fuel*, vol. 87(10-11), pp. 2111-2121.

[13] Department of Energy Business Act. (2024). Specification and quality requirements for diesel fuel, Royal Thai Government Gazette, Thailand.

[14] Beld, B. V. D., Holle, E. and Florijn, J. (2013). The use of pyrolysis oil and pyrolysis oil derived fuels in diesel engines for CHP applications, *Applied Energy*, vol. 102, pp. 190-197.

[15] Siam Kubota Technical Training Center. (2009). Kubota RT Series Diesel Engine Service Manual, 2nd ed. Siam Kubota Industry Co., Ltd.

[16] Sakkampang, C., Sakkampang, K., Suwunnasopha, P. and Poojeera, S. (2023). Performance, exhaust emission, and wear behavior of a direct-injection engine using biodiesel from Yang-Na (*Dipterocarpus Alatus*) oleoresins, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 7, p. 100328.

[17] Matthews, R.D. (2014). Relationship of brake power to various energy efficiencies and other engine parameters: the efficiency rule, *International Journal of Vehicle Design*, vol. 4(5), pp. 491-500.

[18] Subramaniam, D., Murugesan, A., Alagumalai, A. and Kumaravel, A. (2013). Bio-diesel production and its engine characteristics—An expatriate view, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 361-370.

[19] Gailis, M., Dukulis, I., Pirs, V. and Birzietis, G. (2018). Practical methodology for calculation of specific gaseous emissions, Engineering for rural development 23-25 May 2018, Jelgava, Latvia.



[20] Yaqoob, H., Ali, H. M., Abbas, H., Abid, O., Jamil, M. A. and Ahmed, T. (2023). Performance and emissions characteristics of tire pyrolysis oil in diesel engine: an experimental investigation, *Clean Techn Environ Policy*, vol.25, pp. 3177–3187.

[21] Subramaniam, M., Solomon, J. M., Nadanakumar, V., Anaimuthu, S. and Sathyamurthy, R. (2020). Experimental investigation on performance, combustion and emission characteristics of DI diesel engine using algae as a biodiesel, *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1382–1392.

[22] Yuan, X., Ding, X., Leng, L., Li, H., Shao, J., Qian, Y., Huang, H., Chen, X., Zeng, G. (2018). Applications of bio-oil-based emulsions in a DI diesel engine: The effects of bio-oil compositions on engine performance and emissions, *Energy*, vol. 154, pp. 110-118.

[23] Baranitharan, P., Ramesh, K. and Sakthivel, R. (2018). Analytical characterization of the Aegle marmelos pyrolysis products and investigation on the suitability of bio-oil as a third-generation bio-fuel for C.I engine, *The Global Home of Chemical Engineers*, vol. 38(4), 13116.

[24] Sanjeevannavar, M. B, Banapurmath, N. R., Soudagar, M. E. M., Atgur, V., Hossain, N., Mujtaba, M. A., Yunus Khan, T. M., Nageswar, R. B., Ahmed I. K. and Elfasakhany, A. (2022). Performance indicators for the optimal BTE of biodiesels with additives through engine testing by the Taguchi approach, *Chemosphere*, vol. 288(2), p. 132450.

[25] Thiagarajan, S., Varuvel, E. G., Martin, L. J. and Nagalingam, B. N. (2019). Comparative analysis of various methods to reduce CO₂ emission in a biodiesel fueled CI engine, *Fuel*, vol. 253, pp. 146-158.

[26] Hoang, A. T. (2019). Experimental study on spray and emission characteristics of a diesel engine fueled with preheated bio-oils and diesel fuel, *Energy*, vol.171, pp. 795-808.

[27] Hess, M.A., Haas, M.J. and Foglia, T.A. (2007). Attempts to reduce NO_x exhaust emissions by using reformulated biodiesel, *Fuel Processing Technology*, vol. 88(7), pp. 693-699.

[28] Pexa, M., Čedík, J., & Pražan, R. (2016). Smoke and NO_x emissions of combustion engine using biofuels, *Agronomy Research*, vol. 14(2), pp. 547–555.

[29] Sakhare, N.M., Shelke, P.S. and Lahane, S. (2016). Experimental investigation of effect of exhaust gas recirculation and cottonseed B20 biodiesel fuel on diesel engine, *Procedia Technol*, vol. 25, pp. 869–876.

[30] Sathish, T., Mohanavel, V., Arunkumar, M., Rajan, K., Manzoore Elahi Soudagar, M., Mujtaba, M.A., Saleh Salmen, H., Sami Al Obaid, H., Fayaz, H. and Sivakumar, S. (2022). Utilization of Azadirachta indica biodiesel, ethanol and diesel blends for diesel engine applications with engine emission profile, *Fuel*, vol. 319, p. 123798.



ระบบปัญญาประดิษฐ์สำหรับการนับหลอดด้ายแนวอนบนรถเข็นโดยใช้โมเดลตรวจจับวัตถุ

Artificial Intelligence System for the Detection and Counting of Horizontal Spools in Carts using Object Detection

มนัสวี ลิตาธรรม, นาฏนลิน จันลาเศษ และ ครรชิต รองไชย*

ห้องวิจัยปัญญาประดิษฐ์และการพัฒนาที่ยั่งยืน (AI and Sustainability Laboratory) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น 150 ถ. ศรีจันทร์ ต.ในเมือง
อ.เมืองขอนแก่น ขอนแก่น 40000

*Corresponding Author: kanchit.ro@rmu.ac.th

Received 6 December 2025; Received in revised form 17 February 2026; Accepted 2 April 2026

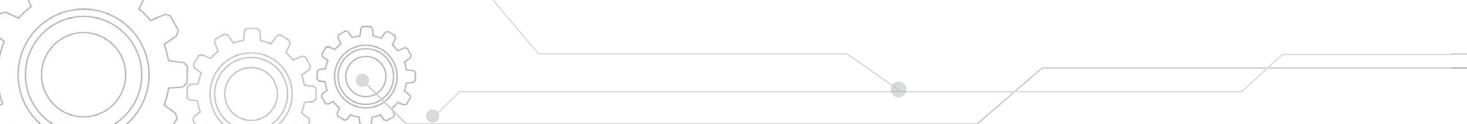
บทคัดย่อ

ในยุคที่อุตสาหกรรมการผลิตเปลี่ยนผ่านสู่ระบบอัตโนมัติและปัญญาประดิษฐ์ (AI) การนับหลอดด้ายบนรถเข็นในโรงงานสิ่งทอซึ่งพึ่งพาแรงงานมนุษย์ซึ่งใช้เวลามากและมีโอกาสเกิดข้อผิดพลาด งานวิจัยนี้พัฒนาระบบตรวจนับหลอดด้ายอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี AI โดยใช้บอร์ด Nvidia Jetson Nano ร่วมกับอัลกอริธึม YOLOv7 สำหรับตรวจจับหลอดด้ายทั้งแบบเอียงองศาและแบบนอน การดำเนินงานเริ่มจากการเก็บภาพหลอดด้ายเพื่อฝึกโมเดล ผลการทดสอบแสดงประสิทธิภาพสูงสุดด้วยค่า Precision 99.99%, Recall 99.99% และ mAP@0.5 เท่ากับ 99.97% โดยระบบตรวจจับได้แม่นยำทั้งสองรูปแบบด้วย F1-score 100% เมื่อทดสอบในโรงงานจริงระบบให้ค่า F1-score 100% ในทุกกรณี การเปรียบเทียบกับแรงงานมนุษย์พบว่า AI ใช้เวลาเฉลี่ยเพียง 505 มิลลิวินาทีต่อรอบ ขณะที่พนักงานใช้เวลา 4.28 วินาทีสำหรับหลอดแบบเอียง และ 50.4 วินาทีสำหรับหลอดแบบนอน แสดงให้เห็นว่าระบบ AI มีความเร็วและแม่นยำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอเพื่อเพิ่มสมรรถนะและลดต้นทุนการผลิต

คำสำคัญ: ปัญญาประดิษฐ์ (AI), การมองเห็นของเครื่อง, การตรวจจับวัตถุ, YOLOv7

Abstract

In an era where industrial manufacturing is increasingly embracing automation and artificial intelligence (AI) to enhance efficiency, accuracy and reduce labour dependency, one persistent challenge in textile factories is the manual counting of yarn tubes on carts which is a task that demands high precision but remains time-consuming and reliant on human workers. This research presents the design and development of an AI-powered system for counting yarn tubes on carts, tailored for industrial applications. The system utilises an Nvidia Jetson Nano board and YOLOv7 object detection algorithm to identify and count yarn tubes positioned both at a 45-degree angle and horizontally. The development process involved collecting image data, training the models and validating their performance. The model demonstrated a Precision of 99.99%, Recall of 99.99% and mAP@0.5 of 99.97%. The system achieved an F1-score of 100% for both 45-degree and horizontal yarn tubes. In real-world industrial testing, the



model achieved an F1-score of 100% in all test cases. When comparing the performance of the AI system to that of human workers, the AI took only 505 millisecond per round to count, whereas human workers took an average of 4.28 seconds for angled tubes and 50.4 seconds for horizontal tubes.

Keywords: Artificial intelligence, Object detection, Machine Vision, YOLOv7

บทนำ

ปัญญาประดิษฐ์ (AI) กำลังเปลี่ยนแปลงการทำงานของอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ไม่เพียงแต่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในการดำเนินงานขององค์กร แต่ยังสร้างโอกาสใหม่ให้กับการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมทั่วโลก โดย AI ได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในภาคส่วนต่างๆ เช่น การผลิต การแพทย์ การขนส่ง การตลาด รวมถึงการศึกษาและเกษตรกรรม [1]

ในอุตสาหกรรม 5.0 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการมองเห็นด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Vision) ร่วมกับ AI ช่วยเพิ่มสมรรถนะในการผลิต โดยการใช้กล้องและเซ็นเซอร์ในการ "มองเห็น" และเข้าใจข้อมูลภาพ ซึ่งสามารถตรวจสอบการทำงานของเครื่องจักร การตรวจจับความผิดปกติในกระบวนการผลิต และการตรวจสอบคุณภาพสินค้าได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว การใช้เทคโนโลยีเหล่านี้ทำให้สามารถลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์ และช่วยลดเวลาในการผลิต เพิ่มผลผลิต และทำให้กระบวนการผลิตมีความยืดหยุ่นและมีคุณภาพสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของอุตสาหกรรม 5.0 ที่มุ่งเน้นการผสมผสานเทคโนโลยีอัจฉริยะ เช่น AI และหุ่นยนต์ เพื่อยกระดับการผลิตให้มีประสิทธิภาพและความรวดเร็วมากขึ้น [2-4]

ตัวอย่างหนึ่งที่โดดเด่นคือ การใช้ AI ในอุตสาหกรรมการผลิตแหวนสำหรับการประมง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของเศรษฐกิจในหลายประเทศที่การประมงเป็นอาชีพหลัก การผลิตแหวนต้องการความแม่นยำในการตรวจสอบคุณภาพ วัสดุที่นำมาใช้ต้องมีความแข็งแรง ทนทานต่อแรงดึงและการกัดกร่อนจากน้ำทะเล กระบวนการผลิตแหวนประกอบด้วยหลายขั้นตอน ตั้งแต่การเตรียมวัสดุ การปั่นเส้นด้าย การถัก

แห และการตรวจสอบคุณภาพ ซึ่งทุกขั้นตอนต้องมีความแม่นยำ

ปัญหาที่พบบ่อยคือการนับจำนวนหลอดด้ายที่ใช้ในกระบวนการผลิตแหวน การที่ยังพึ่งพาแรงงานคนในการนับจำนวนหลอดด้ายทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย เช่น การนับซ้ำซ้อนหรือนับไม่ครบอันเนื่องมาจากความเหนื่อยล้าของแรงงาน แต่การนำ AI เข้ามาใช้ควบคู่กับแรงงานคนภายในกระบวนการนี้ [5] ช่วยลดข้อผิดพลาด เพิ่มความแม่นยำ และยังสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่หยุดพัก ช่วยเพิ่มผลผลิตต่อวันและลดค่าใช้จ่ายในระยะยาว [6]

การนับจำนวนวัตถุดิบมีความสำคัญในหลายอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมการผลิต ซึ่งการนับที่แม่นยำจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน ลดความสูญเสีย และสนับสนุนการบริหารจัดการด้านโลจิสติกส์ได้ เทคโนโลยีด้าน Machine Vision และปัญญาประดิษฐ์ จึงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง โดยงานวิจัยนี้ได้นำโมเดล YOLOv7 [7] มาใช้ร่วมกับระบบ Edge AI ซึ่งประมวลผลบนอุปกรณ์ปลายทางอย่าง Nvidia Jetson Nano ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากช่วยลดภาระของระบบเครือข่ายและศูนย์ข้อมูล โดยการประมวลผลภาพสามารถทำได้แบบเรียลไทม์ที่อุปกรณ์ ช่วยลดความล่าช้าในการส่งข้อมูล [8]

การปรับใช้ AI ยังช่วยให้อุตสาหกรรมสามารถปรับตัวได้ทันกับยุคแห่งเทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ไม่เพียงช่วยให้ธุรกิจสามารถแข่งขันได้ในตลาดโลก แต่ยังช่วยสร้างมาตรฐานใหม่ในการผลิตเพิ่มโอกาสทางเศรษฐกิจ และช่วยสร้างความยั่งยืนให้กับภาคการผลิตในอนาคต [9]

การทบทวนวรรณกรรม

บทบาทของปัญญาประดิษฐ์ ในการสนับสนุนอุตสาหกรรม 4.0 และ 5.0 พบว่า AI เป็นตัวขับเคลื่อนสำคัญในการสร้างระบบการผลิตอัจฉริยะ และส่งเสริมความเป็นอยู่ของแรงงานอย่างยั่งยืน การทบทวนวรรณกรรมจาก 2,887 บทความเผยให้เห็นการเติบโตของงานวิชาการตั้งแต่ปี 2018 และระบุ 4 กลุ่มเนื้อหาเด่น โดยเฉพาะหัวข้อเกี่ยวกับอุตสาหกรรม 5.0 และการเรียนรู้เชิงลึก พร้อมนำเสนอแนวทางและประเด็นวิจัยเชิงลึกสำหรับอนาคต [10]

การทำงานของ Convolutional Neural Networks (CNNs) เป็นหัวใจสำคัญของงานด้าน Artificial Intelligence ที่สามารถอธิบายได้ (xAI) เพราะแม้ว่า CNNs จะประสบความสำเร็จสูง แต่ยังมีลักษณะเป็น กล่องดำ ทำให้เข้าใจเหตุผลเบื้องหลังการตัดสินใจได้ยาก ปัจจุบัน วิธีอธิบายส่วนใหญ่ยังเน้นการสร้างภาพหรือการทำ Visualization ซึ่งยังไม่ครอบคลุมทุกแง่มุมของการตีความโมเดล [11]

การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) และ เอ็ดจ์ (Edge) หรือ Edge AI ซึ่งหมายถึงการประมวลผล AI ในอุปกรณ์ที่ใกล้กับผู้ใช้ หรืออุปกรณ์แบบฝังตัว โดยเน้นการประมวลผล AI ใกล้กับผู้ใช้ แทนที่จะดำเนินการในศูนย์ข้อมูลส่วนกลาง [8]

ใช้เทคโนโลยี AI ตรวจจับภาพด้วยโมเดล YOLOv7 เพื่อระบุและพ่นยาฆ่าวัชพืชเฉพาะจุดโดยใช้ระบบอัตโนมัติและโดรน แทนการฉีดพ่นทั่วพื้นที่ที่มีต้นทุนสูงและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ผลการทดลองพบว่า YOLOv7 ให้สมรรถนะการตรวจจับวัชพืชสูง โดยได้ mAP และค่าประเมินอื่นๆ สูงกว่า 99% [12]

โมเดลตรวจจับและนับผลผลิตผลไม้ที่ผสมผสานกลไก self-attention ของ Vision Transformer (CBAM และ CA) เข้ากับ YOLOv7 เพื่อแก้ปัญหาการนับผลไม้ที่ซับซ้อน เช่น การบดบังและความแปรผันของผลไม้ พร้อมเสริมด้วยวิธีติดตามวัตถุหลายตัว (SORT และ Cascade-SORT) สำหรับการนับข้ามเฟรม

ผลลัพธ์พบว่าโมเดล YOLOv7-CA ให้ค่า mAP 91.3% และ F1 score 0.85 สูงกว่า YOLOv7 เดิม พร้อมลดค่า Mean Absolute Error ลง 0.642 แสดงให้เห็นว่าโมเดลใหม่นี้ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประเมินผลผลิต และเป็นประโยชน์ต่อการตัดสินใจในอุตสาหกรรมผลไม้ [13]

พัฒนาโมเดล MSC-YOLO จาก YOLOv7 เพื่อเพิ่มสมรรถนะการตรวจจับวัตถุขนาดเล็กในภาพถ่ายจากโดรน ซึ่งมีความยากเพราะความสูงในการบินที่เปลี่ยนแปลงได้ การเคลื่อนที่ที่เร็วทำให้ภาพเบลอและวัตถุมีขนาดเล็กมาก วิธีที่เสนอได้เพิ่มส่วน HEAD เพื่อช่วยตรวจจับวัตถุเล็กแทนการใช้วิธีลดขนาดภาพแบบเดิม และออกแบบโมดูลใหม่ที่จะดึงรายละเอียดของบริบทในหลายขนาด เพื่อให้มองเห็นวัตถุเล็กได้ชัดเจน ผลการทดลองกับชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศพบว่าวิธีใหม่ให้ความแม่นยำสูงกว่าวิธีมาตรฐานเดิมประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าเหมาะสำหรับการใช้งานจริงในงานตรวจจับวัตถุจากโดรน [14]

วิธีอธิบายผลลัพธ์ของโมเดลเรียนรู้ของเครื่องที่ออกแบบมาสำหรับผู้ทั่วไป ไม่ใช่เฉพาะผู้เชี่ยวชาญ โดยใช้เทคนิคการมาสก์บางส่วนเพื่อระบุส่วนสำคัญในภาพสำหรับงานจำแนกภาพ แล้วสร้างคำอธิบายทั้งแบบภาพและข้อความ เช่น แผนที่ส่วนสำคัญของฟิกเชลและกราฟแสดงน้ำหนักของฟิเจอร์ จากการทดสอบกับผู้ใช้อย่างน้อย 50 คน วิธีนี้ให้คำอธิบายที่เข้าใจง่ายและมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีเดิม ทำให้เหมาะสำหรับใช้จริงในการอธิบายการตัดสินใจของโมเดลให้ผู้ใช้อย่างทั่วไประบุ [15]

ระบบตรวจจับ ติดตาม และนับยานพาหนะแบบเรียลไทม์ด้วย YOLOv7 เพื่อแก้ปัญหาการตรวจจับพลาดและการมองเห็นรถขนาดเล็กบนทางหลวง ระบบสามารถจำแนกประเภทรถ วิเคราะห์การไหลของการจราจร และให้ข้อมูลสถิติแบบทันที ช่วยในการจัดการจราจร วางแผน และป้องกันเหตุการณ์ต่างๆ ได้ [16]

YOLOv7 เป็นตัวตรวจจับวัตถุแบบเรียลไทม์ที่ให้ความสำคัญและความแม่นยำโดดเด่น โดยทำงานได้ตั้งแต่ 5 ถึง 160 FPS และทำความแม่นยำสูงสุดได้

56.8% AP บน GPU V100 รุ่น YOLOv7-E6 (56 FPS, 55.9% AP) เร็วและแม่นยำกว่าตัวตรวจจับขั้นสูงทั้งแบบ transformer และแบบ convolution เช่น SWIN-L Cascade-Mask R-CNN และ ConvNeXt-XL Cascade-Mask R-CNN โดย YOLOv7 ทำงานเร็วกว่า 5 เท่าและแม่นยำกว่าทั้งคูนอกจากนี้ยังเหนือกว่าโมเดลยอดนิยมอื่น ๆ เช่น YOLOR, YOLOX, Scaled-YOLOv4, YOLOv5 และ DETR ทั้งในด้านความเร็วและความแม่นยำ พร้อมทั้งสามารถเทรนจากศูนย์บนชุดข้อมูล MS COCO ได้โดยไม่พึ่งพาการ pretrain [17]

Mask YOLOv7 เพื่อตรวจจับและนับวัวจากภาพถ่ายโดรนทั้งในสภาพแวดล้อมควบคุมและไม่ควบคุม โดยเพิ่มกลไกการแยกวัตถุเพื่อแยกวัวแต่ละตัว ผลการทดลองพบว่ามีความแม่นยำ 93–95% แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถแข่งขันกับวิธีตรวจจับและแยกวัตถุอื่น ๆ ได้ทั้งด้านความแม่นยำและความเร็ว และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดการปศุสัตว์ เช่น การติดตาม ตรวจสอบ และรายงานข้อมูลวัวแต่ละตัว [18]

วิธีนับข้าวสาลีอัตโนมัติด้วย YOLOv7 ที่ปรับปรุงแล้วและ DeepSORT สำหรับติดตามหลายเป้าหมายและการนับแบบแบ่งเขตข้ามเส้น โดยมีการปรับปรุงเครือข่ายหลักด้วย DCNV3, PConv, BiFPN และโมดูลให้ความสนใจ CBAM เพื่อเพิ่มความแม่นยำและสมรรถนะ ผลการทดลองพบว่าโมเดลปรับปรุงมีความแม่นยำการตรวจจับ 93.8% และ mAP@0.5 เท่ากับ 94.9% การติดตามหลายเป้าหมายมีความแม่นยำ 93.0% และ MOTA 82.3% ส่วนการนับข้าวสาลีมีความแม่นยำเฉลี่ยสูงกว่า 97.5% ทำงานได้เร็ว 19.2 เฟรมต่อวินาที ทำให้สามารถใช้งานจริงในภาคการผลิตได้อย่างเสถียร [19]

ระบบการตรวจจับลิงโดยใช้ YOLOv7 โดยสร้างชุดข้อมูลเฉพาะจากภาพลิงในธรรมชาติและภาพส่วนตัว แบ่งชุดข้อมูลสำหรับฝึกและทดสอบ ทำเครื่องหมายกรอบกรณีด้วยเครื่องมือ เช่น labellmg จากนั้นฝึกโมเดล YOLOv7 ด้วยตารางการฝึกและการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เลือกจุดตรวจที่มี

สมรรถนะดีที่สุดเพื่อใช้วิเคราะห์และประเมินผลการตรวจจับ [20]

วิธีติดตามและนับนกในพื้นที่ชุ่มน้ำโดยใช้ YOLOv7 ร่วมกับการติดตามหลายวัตถุ DeepSORT โดยสร้างชุดข้อมูลนกทำ Labelling ลำตัวและหัวรวมกว่า 3,737 ภาพ และชุดข้อมูลนกเดี่ยว 11,139 ภาพ ปรับปรุง YOLOv7 ด้วยโมดูล GAM และ Alpha-IoU loss เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการตรวจจับ ผลการทดลองได้ค่า mAP@0.5 เท่ากับ 0.951 และ mAP@0.5:0.95 เท่ากับ 0.815 จากนั้นข้อมูลถูกใช้สำหรับติดตามและนับชนิดของนกตามพื้นที่ ทำให้สามารถประเมินจำนวนและการกระจายของฝูงนกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยสนับสนุนงานอนุรักษ์นก [21]

YOLOv7 และ DeepSORT สำหรับตรวจจับและติดตามวัตถุแปลกปลอมในเหมืองถ่านหิน โดยแก้ปัญหาความคล้ายคลึงทางกายภาพระหว่างวัตถุแปลกปลอมกับถ่านหิน โมเดลถูกปรับด้วยโมดูลเสริมและกลไกความสนใจเชิงพื้นที่ ทำให้การตรวจจับมีความแม่นยำ 91.3% และติดตามหลายวัตถุได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย MOTA 76.1% และ MOTP 80.6% พัฒนาการเหล่านี้เหนือกว่าอัลกอริทึมเดิมแสดงถึงศักยภาพของระบบสำหรับการใช้งานจริงในเหมืองถ่านหินและการปรับปรุงความปลอดภัยและประสิทธิภาพการผลิต [22]

YOLOv7 สำหรับตรวจจับวัตถุในภาพพืชอายุโดยเพิ่ม Modulated Deformable Convolution เพื่อปรับตำแหน่งการสุ่มตัวอย่างและลดความบิดเบือนขอบภาพ และใช้ Swin Transformer เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็ก ผลการทดลองพบว่าโมเดลปรับปรุงเพิ่มค่า mAP สูงสุด 5.9% บนชุดข้อมูล VOC-360 และ 2.4% บน ERP-360 ยืนยันความสามารถในการตรวจจับวัตถุในภาพพืชอายุและภาพถ่ายแบบ equirectangular [23]

วิธีดำเนินงาน

1. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

Jetson Nano เป็นอุปกรณ์คอมพิวเตอร์หลักที่ใช้ในการประมวลผลระบบ AI ด้วยความสามารถในการประมวลผลภาพและฮาร์ดแวร์สำหรับปัญญาประดิษฐ์ในราคาที่ไม่แพง โดยเชื่อมต่อกับกล้องอุตสาหกรรม KAYETON U-400 เลนส์ 5-50 mm ใช้ในการถ่ายภาพที่มีความละเอียดและสามารถถ่ายภาพได้รวดเร็ว

2. การเก็บข้อมูล

ในการเก็บข้อมูล ผู้จัดทำได้บันทึกวิดีโอของหลอดด้ายแบบ 45 องศาและแบบนอนตามรูปที่ 1 และ 2 จากห้องทดลองและโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้กล้อง KAYETON เลนส์ 5-50mm ความละเอียด 1280x720 พิกเซล จากนั้นแปลงวิดีโอเป็นรูปภาพด้วยโปรแกรม Computer Vision Annotation Tool (CVAT) จำนวนภาพที่ใช้ในการพัฒนาโมเดลแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 หลอดด้ายแบบเอียง

ตารางที่ 1 จำนวนภาพที่ใช้ในการพัฒนาโมเดล

รายการ	Model
Train Set (ภาพ)	2,683
Validation Set (ภาพ)	298
หลอดด้ายแบบเอียง(ภาพ)	1,468
หลอดด้ายแบบนอน(ภาพ)	1,513



รูปที่ 2 หลอดด้ายแบบนอน

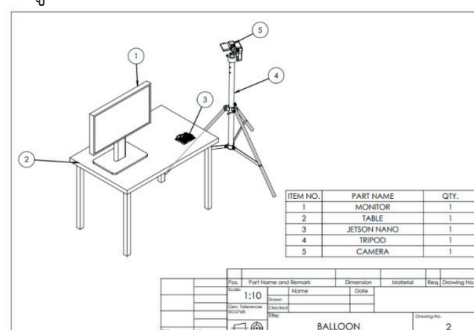
3. การจัดเตรียมข้อมูล

กระบวนการจัดเตรียมข้อมูลประกอบด้วยการทำความสะอาดข้อมูลเบื้องต้น โดยดำเนินการตรวจสอบและแก้ไขข้อมูลที่ขาดหาย ข้ำซ้อน หรือไม่สอดคล้องกัน ภายหลังจากนั้นจึงดำเนินการติดป้ายกำกับข้อมูล (Labeling) เพื่อนำไปใช้ในการฝึกโมเดลปัญญาประดิษฐ์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม CVAT ในการดำเนินการ

เมื่อกระบวนการติดป้ายกำกับข้อมูลเสร็จสมบูรณ์ จึงทำการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็นสามส่วน ได้แก่ ชุดข้อมูลฝึกสอน (Training Set) คิดเป็น 80% ชุดข้อมูลตรวจสอบ (Validation Set) คิดเป็น 10% สำหรับการตรวจสอบสมรรถนะและป้องกันปัญหา Overfitting และชุดข้อมูลทดสอบ (Test Set) คิดเป็น 20% สำหรับการประเมินสมรรถนะของโมเดลกับข้อมูลที่ไม่เคยพบเห็นมา

4. การออกแบบระบบตรวณับจำนวนหลอดด้าย

โครงสร้างของระบบตรวณับจำนวนหลอดด้ายแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ระบบตรวณับจำนวนหลอดด้าย

5. Hyperparameters ในการฝึกโมเดลและ การป้องกันปัญหา overfitting

โมเดล YOLOv7 ถูกฝึกด้วยอัลกอริธึม Stochastic Gradient Descent (SGD) โดยตั้งค่า batch size เท่ากับ 16, ขนาดภาพที่ป้อนเข้า (input image size) ที่ 640×640 พิกเซล และจำนวนรอบการฝึก (epoch) เท่ากับ 130 รอบ ค่า learning rate เริ่มต้น (lr0) ถูกตั้งไว้ที่ 0.01, ค่า momentum เท่ากับ 0.937 และใช้ weight decay ที่ 0.0005 เพื่อควบคุมไม่ให้น้ำหนักของโมเดลมีค่ามากเกินไป ซึ่งอาจนำไปสู่การ overfitting โดยมีการใช้เทคนิค OneCycleLR เพื่อปรับ learning rate ตลอดกระบวนการฝึก โดยตั้งค่าอัตราสุดท้าย (lrf) ที่ 0.1 และมีช่วง warm-up จำนวน 3 epoch เพื่อให้โมเดลเริ่มเรียนรู้อย่างมั่นคง โดยค่า momentum เริ่มต้นอยู่ที่ 0.8 และ learning rate ของ bias เริ่มที่ 0.1 นอกจากนี้ เพื่อเพิ่มความสามารถในการ generalize และลดความเสี่ยงของการ overfitting ยังมีการใช้เทคนิค data augmentation ที่หลากหลาย เช่น การปรับค่า HSV ของภาพ (hue = 0.015, saturation = 0.7, value = 0.4), การเลื่อนภาพ (translation ± 0.2), การย่อ-ขยายภาพ (scaling ± 0.5) และการกลับภาพในแนวนอน (flip left-right) ด้วยความน่าจะเป็น 0.5 ขณะที่การกลับภาพในแนวตั้งไม่ได้ถูกใช้งาน (flipud = 0.0) ทั้งนี้ ยังเปิดใช้งาน mosaic augmentation (mosaic = 1.0) เพื่อรวมภาพจาก 4 แหล่งเข้าด้วยกัน เพิ่มความหลากหลายของบริบทในข้อมูลฝึก โดยไม่มีการใช้เทคนิค mixup, copy-paste และ perspective เพื่อหลีกเลี่ยงการบิดเบือนลักษณะทางกายภาพของหลอดด้ายซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของการตรวจจับวัตถุ มีการกำหนด positive/negative samples ระหว่างการฝึกใช้วิธี Optimal Transport Assignment (OTA) เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการเรียนรู้การจับคู่วัตถุเป้าหมาย และโมเดลถูกประเมินด้วยชุดข้อมูล validation และ test ที่แยกออกจากชุดฝึก เพื่อประเมินสมรรถนะอย่างเป็นระบบ

6. การทดสอบสมรรถนะโมเดล ปัญหาประติษฐ์

ในการประเมินสมรรถนะของระบบตรวจนับหลอดด้าย ได้ดำเนินการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงของโรงงาน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 รูปแบบการวางหลอดด้าย ได้แก่ แบบเอียงและแบบนอน รูปแบบละ 5 ครั้ง

ตารางที่ 2 เมทริกซ์ความสับสน

		Actual Values	
		Positive	Negative
Predicted Value	Positive	True Positive (TP)	False Positive (FP)
	Negative	False Negative (FN)	True Negative (TN)

ผลลัพธ์จากการทดสอบถูกนำมาจัดทำเป็นเมทริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix) ดังแสดงตารางที่ 2 ซึ่งเป็นตารางแสดงผลการทำนายของโมเดลเปรียบเทียบกับค่าจริง ประกอบด้วย 4 ค่าหลัก คือ

- True Positive (TP) จำนวนหลอดด้ายที่ระบบตรวจจับได้ถูกต้อง
- False Positive (FP) จำนวนที่ระบบตรวจจับผิดพลาด (ตรวจพบแต่ไม่มีจริง)
- True Negative (TN) จำนวนที่ระบบระบุว่าไม่มีหลอดด้ายได้ถูกต้อง
- False Negative (FN) จำนวนหลอดด้ายที่มีจริงแต่ระบบตรวจไม่พบ

$$\text{Precision (P)} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

$$\text{Recall (R)} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

$$F_1\text{-Score} = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (3)$$

จากเมทริกซ์ความสับสนดังกล่าว จึงนำมาคำนวณค่าตัวชี้วัดสมรรถนะต่างๆ ได้แก่ Precision

(ความแม่นยำในการตรวจจับ) ตามสมการที่ (1), *Recall* (ความสามารถในการตรวจจับครบถ้วน) ตามสมการที่ (2), และ *F1-Score* (ค่าเฉลี่ยฮาร์มอนิกของ *Precision* และ *Recall*) ตามสมการที่ (3) เพื่อประเมินสมรรถนะโดยรวมของระบบ

$$AP = \int_0^1 P \times R \, dR \quad (4)$$

Average Precision (AP) ตามสมการที่ (4) ใช้ประเมินสมรรถนะของโมเดลในแต่ละคลาส โดยคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง *Precision* และ *Recall* ซึ่งแสดงความสามารถของโมเดลในการรักษาความแม่นยำเมื่อค่า *Recall* เพิ่มขึ้น

$$mAP = \frac{1}{n} \sum_i^n AP_i \quad (5)$$

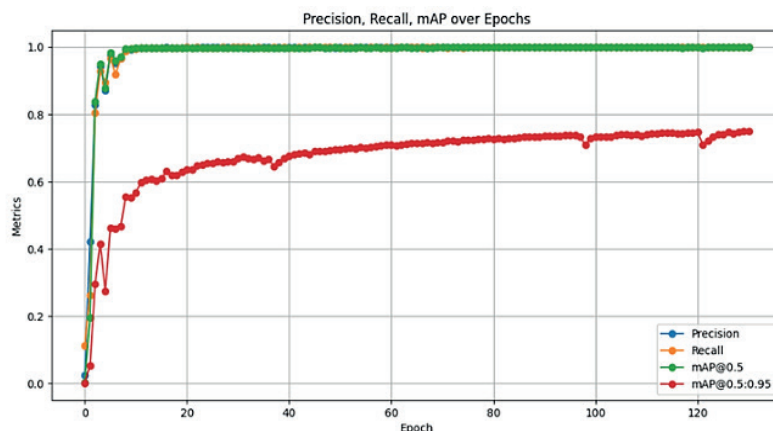
Mean Average Precision (mAP) ตามสมการที่ (5) คือค่าเฉลี่ยของ *AP* จากทุกคลาส ใช้ประเมิน

สมรรถนะโดยรวมของโมเดลในการตรวจจับวัตถุหลายประเภทพร้อมกัน

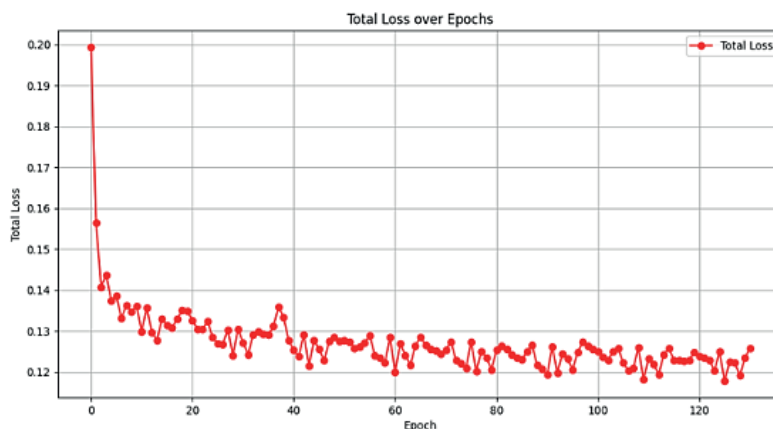
ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ผลการฝึกโมเดลด้วยจำนวน 130 รอบ (Epoch) พบว่า โมเดลมีสมรรถนะสูง โดยมีค่า *Precision* อยู่ที่ 99.96% และ *Recall* ที่ 99.94% สำหรับค่า *mAP@0.5* ได้ 99.91% และ *mAP@0.95* ได้ 74.94% ตามที่แสดงในรูปที่ 4 โดยกระบวนการฝึกอบรวมทั้งหมดใช้เวลา 22 ชั่วโมง 13 นาที

ค่า Total loss จากการฝึกโมเดล ดังรูปที่ 5 อยู่ที่ 0.1258 โดยเป็นการวัดค่าความผิดพลาดของโมเดล ยิ่งค่าน้อยเท่าไรโมเดลยิ่งมีความถูกต้องสูง จากแนวโน้มของกราฟยังไม่มีปรากฏว่าค่า Total loss สูงขึ้น ดังนั้นโมเดลยังมีความสามารถในการเรียนรู้รูปแบบจากข้อมูลโดยไม่จำข้อมูลฝึกสอน



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Precision, Recall และ mAP เทียบกับ Epochs



รูปที่ 5 Total loss หรือค่าความสูญเสียทั้งหมด

ผลการนับจำนวนหลอดด้ายแบบเก่าโดยใช้คนในการเปรียบเทียบกับการนับโดยใช้โมเดล YOLOv7 ในการนับ ดังตารางที่ 3 และ 4 โดยนับทั้งวางเรียงและวางแบบนอน ดังรูปที่ 6 และ 7

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบการนับจำนวนหลอดด้ายรถเข็นแบบเรียง

	TIME AVERAGE	PRECISION (%)	RECALL (%)	F1-SCORE (%)
คนนับ	4.82s	100	100	100
AI นับ	505ms	100	100	100

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบการนับจำนวนหลอดด้ายรถเข็นแบบนอน

	TIME AVERAGE	PRECISION (%)	RECALL (%)	F1-SCORE (%)
คนนับ	50.4s	100	99.02	99.5
AI นับ	505ms	100	100	100



รูปที่ 6 การวางหลอดด้าย 45 องค์



รูปที่ 7 การวางหลอดด้ายแบบนอน

สรุป

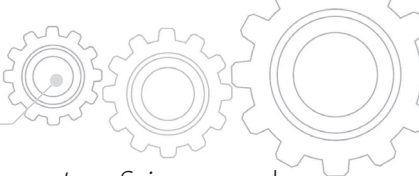
การศึกษาการพัฒนากระบวนการนับหลอดด้ายโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อเพิ่มสมรรถนะในกระบวนการผลิตแหวน พบว่า AI สามารถลดข้อผิดพลาดจากแรงงานคนและเพิ่มความรวดเร็วได้อย่างมีนัยสำคัญ เวลาเฉลี่ยที่พนักงานใช้นับหลอดด้ายแบบ 45 องค์ คือ 4.28 วินาที และ Precision 100% ซึ่ง AI ใช้เวลาเฉลี่ย 1 วินาที Precision 100% Recall 100% F1-Score 100% และ เวลาเฉลี่ยที่คนใช้นับหลอดด้ายแบบนอนคือ 50.4 วินาที และ Precision 99.02% ซึ่ง AI ใช้เวลาเฉลี่ย 1 วินาที Precision 100% Recall 100% F1-Score 100% ซึ่งตัวอย่างจากการนับแบบนอนมีจำนวนหลอดด้ายกว่าหนึ่งร้อยหลอด และคนนับต้องใช้ความพยายามในการนับ จากผลการทดลองพบว่ายังมีกรณีที่พนักงานนับผิดพลาดซึ่งทำให้เห็นว่า ระบบ AI นั้นมีเวลาเฉลี่ย และ สมรรถนะที่สูงกว่าพนักงาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น และบริษัทขอนแก่นแหวน จำกัด ในการสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัย ในการเขียนบทความนี้ได้ใช้ปัญญาประดิษฐ์แบบรู้สร้าง Gemini, ChatGPT, Claude.ai ช่วยในการแปลภาษา และปรับปรุงการสื่อสารทางวิชาการให้ชัดเจนยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Leng, J., Sha, W., Wang, B., Zheng, P., Zhuang, C., Liu, Q., Wuest, T., Mourtzis, D., & Wang, L. (2024). Unlocking the power of industrial artificial intelligence towards Industry 5.0: Insights, pathways, and challenges. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 73, pp. 349–363.
- [2] Sharma, M., Tomar, A., & Hazra, A. (2024). Edge computing for Industry 5.0: Fundamental, applications and research challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11(11), pp. 19070–19093.



[3] Vyhmeister, E., and Castane, G. G. (2024, March). When Industry meets trustworthy AI: A systematic review of AI for Industry 5.0.

[4] Martini, B., Bellisario, D., Coletti, P. (2024). Human-centered and sustainable artificial intelligence in Industry 5.0: Challenges and perspectives. *Sustainability*, vol. 16(13), pp. 1–24.

[5] Wang, Z., and Yan, J. (2024). Deep learning-based assembly process action recognition and progress prediction facing human-centric intelligent manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 196, p. 109381.

[6] Rame, I., Purwanto, P., & Sudarno, S. (2024). Industry 5.0 and sustainability: An overview of emerging trends and challenges for a green future. *Innovation and Green Development*. vol. 3(4), p. 100173.

[7] Wang, C.-Y., Bochkovskiy, A., Liao, H.-Y. M. (2025). WongKinYiu /yolov7: Implementation of paper – YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors [Computer software]. GitHub.

[8] Singh, R., and Gill, S. S. (2023). Edge AI: A survey. *Journal of Information Security and Applications*, vol. 70, p. 103308.

[9] Bin Rashid, A., and Kausik, M. A. K. (2024). AI revolutionizing industries worldwide: A comprehensive overview of its diverse applications. *Hybrid Advances*, vol. 7, p. 100277.

[10] Fosso-Wamba, S., and Guthrie, C. (2024). Artificial intelligence and Industry 4.0 and 5.0: A bibliometric study and research

agenda. *Procedia Computer Science*, vol. 235, pp. 718–725.

[11] López-González, C. I., Gómez-Silva, M. J., Besada-Portas, E., Pajares, G. (2024). Analyzing and interpreting convolutional neural networks using latent space topology. *Neurocomputing*, vol. 593, p. 127713.

[12] Lakshmi Narayana, C., & Venkata Ramana, K. (2023). An efficient real-time weed detection technique using YOLOv7. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 14(2), pp. 550–556.

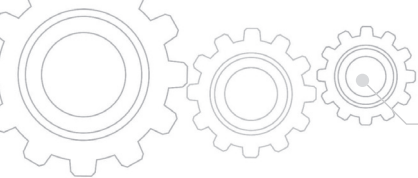
[13] Hu, J., Fan, C., Wang, Z., Ruan, J., Wu, S. (2023). Fruit detection and counting in apple orchards based on improved YOLOv7 and multi-object tracking methods. *Sensors*, vol. 23(13), p. 5931.

[14] Tang, X., Ruan, C., Li, X., Li, B., Fu, C. (2024). MSC-YOLO: Improved YOLOv7 based on multi-scale spatial context for small object detection in UAV-view. *Computers, Materials & Continua*, vol. 79(1), pp. 983–1003.

[15] Anjomshoe, S., Omeiza, D., Jiang, L. (2021). Context-based image explanations for deep neural networks. *Image and Vision Computing*, vol. 116, p. 104337.

[16] Rouf, A., Iwahori, Y., Wu, Q., Wu, H., Yu, X., Wang, A. (2023). Real-time vehicle detection, tracking and counting system based on YOLOv7. *Embedded Self Organizing Systems*, vol.10(7), pp. 4-8.

[17] Wang, C.-Y., Bochkovskiy, A., & Liao, H.-Y. M. (2022). YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors. *arXiv*.



[18] Bello, A.-W., & Oladipo, M. A. (2024). Mask YOLOv7-based drone vision system for automated cattle detection and counting. *Artificial Intelligence and Applications*. vol. 2(2), pp. 115-125.

[19] Li, Z., Zhu, Y., Sui, S., Zhao, Y., Liu, P., Li, X. (2024). Real-time detection and counting of wheat ears based on improved YOLOv7. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 218, p. 108544.

[20] Vamshi, M., Marupaka, N., Nallamothu, S. C., Naureen, A. (2023). A deep learning approach – Monkey detection using YOLOv7. In *Proceedings of the 2023 International Conference on Evolutionary Algorithms and Soft Computing Techniques (EASCT 2023)*. IEEE.

[21] Chen, X., Li, Y., Zhang, Y., Wang, H., Liu, Z. (2023). An efficient method for monitoring birds based on object detection and multi-object tracking networks. *Animals*, vol. 13(10), p. 1713.

[22] Yang, D., Miao, C., Liu, Y., Wang, Y., Zheng, Y. (2024). Improved foreign object tracking algorithm in coal for belt conveyor gangue selection robot with YOLOv7 and DeepSORT. *Measurement*, vol. 228, p. 114178.

[23] Zhou, J., Yang, D., Song, T., Ye, Y., Zhang, X., & Song, Y. (2024). Improved YOLOv7 models based on modulated deformable convolution and Swin transformer for object detection in fisheye images. *Image and Vision Computing*, vol. 144, p. 104876.



การจำแนกเว็บไซต์พนันออนไลน์จากหน้าจอด้วย MobileNetV2

Screenshot-Based Classification of Online Gambling Websites with MobileNetV2

อมรเทพ สืบสาย และ ชัยพร เขมะภาคะพันธ์*

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต

ถนนประชาชื่น พุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210

*Corresponding Author: chaiyaporn@dpu.ac.th

Received 23 February 2026; Received in revised form 7 April 2026; Accepted 24 April 2026

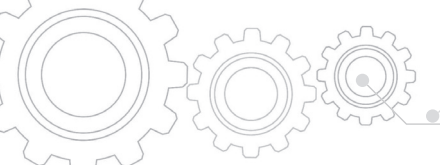
บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของระบบอัตโนมัติสำหรับการจำแนกเว็บไซต์พนันออนไลน์จากหน้าจอเว็บไซต์ โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพร่วมกับการเรียนรู้เชิงลึกผ่านสถาปัตยกรรมโมบายเน็ตวีทู ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันที่ผ่านการฝึกสอนล่วงหน้าบนชุดข้อมูลอิมเมจเน็ต และนำมาปรับใช้ด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบถ่ายโอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกับชุดข้อมูลเฉพาะทาง ชุดข้อมูลที่ใช้ทดลองประกอบด้วยหน้าจอเว็บไซต์ 1,200 ภาพ แบ่งเป็นเว็บไซต์การพนันและเว็บไซต์ทั่วไปในสัดส่วนที่เท่ากัน กระบวนการเตรียมข้อมูลรวมถึงการปรับขนาดภาพมาตรฐานและการทำอนอร์มัลไลเซชัน โดยแบ่งชุดข้อมูลเพื่อฝึกสอน ตรวจสอบ และทดสอบ ในสัดส่วนร้อยละ 70-20-10 และร้อยละ 80-10-10 เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงประจักษ์ นอกจากนี้ได้ปรับค่าพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ ขนาดแบทช์ 8 และ 16 ร่วมกับจำนวนรอบการฝึกสอนระหว่าง 10-50 รอบ พร้อมประยุกต์ใช้เทคนิคการหยุดก่อนกำหนดเพื่อป้องกันปัญหาการเรียนรู้เกินและเพิ่มเสถียรภาพของแบบจำลอง ทั้งนี้ได้ประเมินประสิทธิภาพผ่านตัวชี้วัดความแม่นยำ ค่าความระลึก ค่าเอฟวัน และค่าพื้นที่ใต้เส้นโค้งลักษณะเฉพาะ เพื่อสะท้อนความสามารถในการจำแนกข้อมูลอย่างครอบคลุม ผลการทดลองพบว่า การแบ่งข้อมูลในสัดส่วน 80-10-10 ร่วมกับ Batch Size เท่ากับ 8 และ Epoch เท่ากับ 50 ให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีค่า Accuracy เท่ากับ 0.97, Precision เท่ากับ 0.98, Recall เท่ากับ 0.95, F1-Score เท่ากับ 0.95 และ ROC AUC เท่ากับ 0.9969 ซึ่งอยู่ในระดับยอดเยี่ยม ผลการวิจัยพบว่าโมบายเน็ตวีทูมีประสิทธิภาพสูงในการจำแนกเว็บไซต์การพนันออนไลน์อย่างแม่นยำและมีเสถียรภาพ ด้วยจุดเด่นด้านขนาดแบบจำลองที่เล็กและใช้ทรัพยากรต่ำ จึงเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในระบบเฝ้าระวังและสนับสนุนการบังคับใช้กฎหมาย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยยังมีข้อจำกัดด้านขนาดชุดข้อมูลและการจำแนกเพียงสองกลุ่ม งานวิจัยในอนาคตจึงควรเพิ่มความหลากหลายของข้อมูล ทดลองเปรียบเทียบกับสถาปัตยกรรมอื่น

คำสำคัญ: โมบายเน็ตV2, การจำแนกหน้าจอเว็บไซต์, เว็บไซต์พนัน, การเรียนรู้เชิงลึก, การถ่ายทอดการเรียนรู้

Abstract

This study aimed to develop and evaluate an automated system for classifying online gambling websites from screenshots by integrating image processing with deep learning via the MobileNetV2 architecture. This convolutional neural network, pre-trained on the ImageNet dataset, was implemented using transfer learning to enhance performance on domain-specific data. The experimental dataset consisted of 1,200 screenshots, equally divided between



gambling and general websites. Data preparation involved standard resizing and normalization, with the dataset partitioned into train-validation-test sets at ratios of 70:20:10 and 80:10:10 for empirical comparison. Key parameters, including batch sizes of 8 and 16 and training epochs ranging from 10 to 50, were adjusted alongside the application of early stopping to prevent overfitting and ensure model stability. Performance was evaluated using accuracy, precision, recall, F1-score, and ROC AUC to reflect comprehensive classification capabilities. The results demonstrated that an 80:10:10 data split combined with a batch size of 8 and 50 epochs yielded the highest performance, achieving an accuracy of 0.97, precision of 0.98, recall of 0.95, F1-score of 0.95, and an excellent ROC AUC of 0.9969. The findings indicated that MobileNetV2 was highly effective in accurately and stably identifying gambling websites. Due to its compact size and low computational requirements, the model is well-suited for real-world monitoring systems and law enforcement support. However, the study was limited by its dataset size and binary classification scope. Future research should increase data diversity, compare alternative architectures, and develop multi-class classification to expand applicability in more complex contexts.

Keywords: MobileNetV2, Website Screenshot Classification, Gambling Websites, Deep Learning, Transfer Learning

บทนำ

การแพร่กระจายของเว็บไซต์พนันออนไลน์ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสังคม เศรษฐกิจ และความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ในวงกว้าง แม้ว่าประเทศไทยจะมีกรอบกฎหมาย เช่น พระราชบัญญัติว่าด้วยการกระทำความผิดเกี่ยวกับคอมพิวเตอร์ พ.ศ. 2550 และพระราชบัญญัติคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล พ.ศ. 2562 ที่เปิดช่องให้สามารถปิดกั้นเว็บไซต์ที่ผิดกฎหมายได้ แต่กระบวนการตรวจสอบแบบใช้คำสำคัญหรือการทำงานด้วยเจ้าหน้าที่เพียงอย่างเดียวยังคงมีข้อจำกัดด้านความเร็วและความแม่นยำ

การเข้าถึงอินเทอร์เน็ตได้อย่างกว้างขวางและสะดวกสบายทำให้พฤติกรรมของผู้บริโภค ในหลายด้านเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญหนึ่งในนั้นคือการพนันออนไลน์ (Online Gambling) ซึ่งแพร่ขยายอย่างรวดเร็ว เนื่องจากผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงบริการได้ทุกที่ทุกเวลา โดยไม่จำเป็นต้องเดินทางไปยังสถานประกอบการจริง ลักษณะดังกล่าวทำให้การพนันออนไลน์มีความเข้าถึงง่าย (Accessibility) สะดวก (Convenience) และไม่เปิดเผยตัวตน (Anonymity)

ซึ่งดึงดูดกลุ่มผู้ใช้งานได้หลากหลายตั้งแต่วัยรุ่นจนถึงผู้ใหญ่

อย่างไรก็ตามการพนันออนไลน์ก่อให้เกิดผลกระทบเชิงลบต่อหลายมิติ เช่น เศรษฐกิจ: การสูญเสียรายได้ครัวเรือน การหมุนเวียนเงินในระบบใต้ดิน และการสูญเสียรายได้ภาษีของรัฐ และสังคม: การเสพติดการพนัน การเพิ่มขึ้นของหนี้สินและอาชญากรรมทางเศรษฐกิจ สถานการณ์ดังกล่าวยังสะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของ เครื่องมือในการตรวจสอบและเฝ้าระวังเว็บไซต์พนันออนไลน์ ที่ต้องมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งมีกรอบกฎหมายที่เกี่ยวข้องได้แก่ พระราชบัญญัติว่าด้วยการกระทำความผิดเกี่ยวกับคอมพิวเตอร์ พ.ศ. 2550 [1] พระราชบัญญัติคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล พ.ศ. 2562 [2] และพระราชบัญญัติการพนัน พ.ศ. 2478 มาตรา 12 [3] โดยในส่วนของการดำเนินการระงับการแพร่หลายซึ่งข้อมูลความผิดที่ผิดกฎหมาย เช่น การระงับข้อมูลที่ผิดกฎหมายตาม Domain Name/URL นั้น องค์ประกอบของภาพหลักฐานในการประกอบการดำเนินการ เพื่อระงับการแพร่หลายซึ่งข้อมูลดังกล่าว

หลักฐานที่เหมาะสมต้องมีองค์ประกอบดังนี้

1. ต้องแสดงให้เห็น URL (URL bar) อย่างชัดเจน
2. ต้องมีคำหรือรูปภาพที่เข้าข่ายผิดกฎหมาย (เช่น keyword การพนัน)
3. ต้องมี Taskbar หรือ System Clock แสดงวันเดือนปีและเวลา ณ ขณะจับภาพหน้าจอ
4. หน้าจอแสดงผลต้องไม่ถูกปิดเป็นรูป crop จนไม่สามารถยืนยันแหล่งที่มาของข้อมูลได้

ในประเทศไทย แม้ว่าการพนันออนไลน์ยังคงเป็นสิ่งผิดกฎหมายตามพระราชบัญญัติการพนัน พ.ศ. 2478

อย่างไรก็ตาม แม้มีกฎหมายรองรับแต่การปฏิบัติงานในปัจจุบันยังคงเผชิญข้อจำกัดสำคัญจากการพึ่งพาการตรวจสอบด้วยมนุษย์ และการกรอกรหัสสำคัญ ซึ่งไม่สามารถตรวจจับเว็บไซต์ที่เปลี่ยนชื่อโดเมนได้ทันที และไม่ครอบคลุมการใช้คำค้นหาที่หลากหลายในรูปแบบภาษาไทยและอังกฤษที่มีการปรับเปลี่ยนตลอดเวลา และแม้การวิจัยในอดีตจะนำเทคนิคการประมวลผลภาษามาใช้จำแนกเว็บไซต์จากรหัสต้นฉบับ แต่ยังพบช่องว่างในการตรวจจับอัตลักษณ์ทางสายตาของเว็บไซต์พนันสมัยใหม่ที่เน้นการใช้กราฟิกและแบนเนอร์เป็นหลัก [4] งานวิจัยนี้จึงมุ่งปิดช่องว่างดังกล่าวด้วยการประยุกต์ใช้สถาปัตยกรรมโมบายเน็ตวีทู (MobileNetV2) ซึ่งเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันที่มีประสิทธิภาพสูงในการสกัดคุณลักษณะเชิงทัศน์ มาจำแนกประเภทเว็บไซต์จากภาพหน้าจอโดยตรง [5] แนวทางนี้ไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการระบุเว็บไซต์ผิดกฎหมายที่ซ่อนเร้นเนื้อหาเชิงข้อความ แต่ยังสนับสนุนการรวบรวมพยานหลักฐานดิจิทัลให้สอดคล้องกับพระราชบัญญัติว่าด้วยการกระทำความผิดเกี่ยวกับคอมพิวเตอร์ พ.ศ. 2550 เพื่อยกระดับการเฝ้าระวังและบังคับใช้กฎหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน [6]

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) สำหรับจำแนกเว็บไซต์พนันออนไลน์จากภาพหน้าจอเว็บไซต์

2. เพื่อประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดล MobileNetV2 ภายใต้พารามิเตอร์การฝึกสอนที่ต่างกัน

วิธีดำเนินงาน

1. การเก็บและจัดเตรียมข้อมูล

ชุดข้อมูล (Dataset) ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดกรอบการสร้างชุดข้อมูลอย่างเป็นระบบ โดยเริ่มจากการกำหนด เกณฑ์การติดฉลาก (Labeling Criteria) ล่วงหน้า เพื่อให้การจำแนกประเภทข้อมูลมีความสอดคล้อง (Consistency) และลดความคลาดเคลื่อนระหว่างผู้ประเมิน (Inter-rater Variability) ทั้งนี้ ชุดข้อมูลประกอบด้วยภาพหน้าจอเว็บไซต์จำนวนทั้งสิ้น 1,200 ภาพ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ เว็บไซต์พนันออนไลน์ และเว็บไซต์ทั่วไปที่ไม่เกี่ยวข้องกับการพนัน

1.1 กลุ่มภาพหน้าจอเว็บไซต์พนันออนไลน์

ในกลุ่มข้อมูลนี้ประกอบด้วยภาพหน้าจอเว็บไซต์พนันออนไลน์ จำนวน 600 ภาพ ที่มีวัตถุประสงค์หลัก ในการนำเสนอหรืออำนวยความสะดวกแก่กิจกรรมการพนัน โดยผู้วิจัยกำหนดเกณฑ์การพิจารณาจากองค์ประกอบเชิงโครงสร้างของหน้าเว็บ (Structural Features) และองค์ประกอบเชิงเนื้อหา (Content Features) ดังต่อไปนี้

- 1) การปรากฏของปุ่ม “สมัครสมาชิก”, “เข้าสู่ระบบ”, “เติมเงิน”, “ฝาก – ถอน”
- 2) การแสดงแบนเนอร์ส่งเสริมการเล่นเกมหรือโบนัส
- 3) การแสดงตารางอัตราต่อรอง (Odds Table)
- 4) อินเทอร์เฟซเกมสล็อต หรือห้องคาสิโนสด
- 5) สัญลักษณ์หรือข้อความที่สื่อถึงกิจกรรมการพนันโดยตรง

ภาพหน้าจอเว็บไซต์ที่อยู่ในกลุ่มภาพหน้าจอเว็บไซต์พนันออนไลน์ ซึ่งสะท้อนลักษณะร่วม (Common Visual Patterns) ได้แก่ การใช้สีสดที่ดึงดูดความสนใจ ปุ่มกระตุ้นการสมัครใช้งานขนาดใหญ่ การจัดวางองค์ประกอบที่เน้นกิจกรรมการเติมเงิน และการแสดงภาพกราฟิกของเกมหรือเหรียญรางวัล ดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2



รูปที่ 1 ตัวอย่างภาพหน้าจอของเว็บไซต์พนัน



รูปที่ 2 ตัวอย่างภาพหน้าจอของเว็บไซต์พนัน

จากรูปที่ 1 และรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าเว็บไซต์มีการออกแบบอินเตอร์เฟซที่เน้นการกระตุ้นการมีส่วนร่วมของผู้ใช้งานผ่านองค์ประกอบภาพ (Visual Stimuli) และข้อความเชิญชวน ซึ่งถือเป็นคุณลักษณะสำคัญที่โมเดลการเรียนรู้เชิงลึกสามารถเรียนรู้ได้ผ่านกระบวนการสกัดคุณลักษณะ (Feature Extraction) ดังนั้น การคัดเลือกภาพตัวอย่างที่มีความหลากหลายในด้าน เช่น โทนสี โครงสร้างหน้าเว็บ รูปแบบการจัดวางปุ่ม ประเภทเกมที่แสดงผล

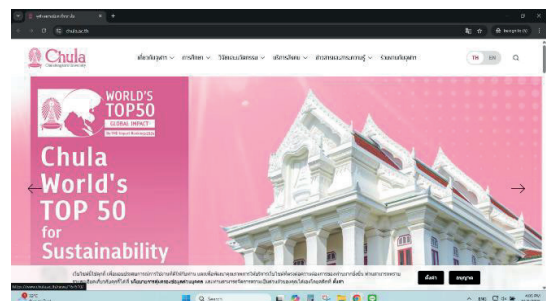
1.2 กลุ่มภาพหน้าจอเว็บไซต์ทั่วไปที่ไม่เกี่ยวข้องกับการพนัน นอกจากกลุ่มเว็บไซต์พนันออนไลน์แล้ว ผู้วิจัยได้จัดเตรียมชุดข้อมูลในกลุ่มเว็บไซต์ทั่วไปที่ไม่เกี่ยวข้องกับการพนัน จำนวน 600 ภาพ เพื่อใช้เป็นกลุ่มเปรียบเทียบ (Negative Class) สำหรับการฝึกและประเมินประสิทธิภาพของโมเดลการจำแนกประเภทภาพ โดยการกำหนดเกณฑ์การคัดเลือกเว็บไซต์ในกลุ่มนี้พิจารณาจากเงื่อนไขหลัก ได้แก่

- 1) ไม่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับการพนันโดยตรงหรือโดยอ้อม
- 2) ไม่มีปุ่มหรือองค์ประกอบที่สื่อถึงการสมัครสมาชิกเพื่อเติมเงิน

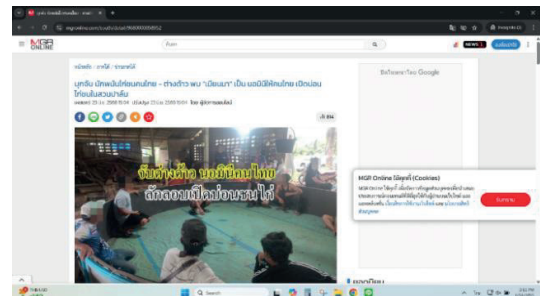
3) ไม่มีตารางอัตราต่อรอง ระบบฝาก-ถอน หรืออินเตอร์เฟซเกมคาสิโน

4) ไม่ปรากฏข้อความส่งเสริมการเล่นเกมที่มักจะเป็นกิจกรรมเสี่ยงโชค

เว็บไซต์ในกลุ่มนี้ครอบคลุมหลายหมวดหมู่ เช่น เว็บไซต์ข่าวสาร เว็บไซต์องค์กรภาครัฐและเอกชน เว็บไซต์พาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ เว็บไซต์การศึกษา และเว็บไซต์บล็อกหรือบทความทั่วไป ทั้งนี้เพื่อให้ข้อมูลมีความหลากหลายเชิงโครงสร้าง (Structural Diversity) และสะท้อนสภาพแวดล้อมจริงของโลกออนไลน์ ดังแสดงในรูปที่ 3 และรูปที่ 4



รูปที่ 3 ตัวอย่างภาพหน้าจอของเว็บไซต์ทั่วไป



รูปที่ 4 ตัวอย่างภาพหน้าจอของเว็บไซต์ทั่วไป

จากภาพตัวอย่างในกลุ่มเว็บไซต์ทั่วไป จะเห็นลักษณะการออกแบบที่แตกต่างจากภาพในกลุ่มเว็บไซต์พนันอย่างชัดเจน กล่าวคือ โครงสร้างหน้าเว็บเน้นการนำเสนอข้อมูลหรือเนื้อหาบทความ การจัดวางองค์ประกอบเป็นไปตามลำดับข้อมูล (Information Hierarchy) ไม่มีองค์ประกอบภาพที่เน้นการกระตุ้นพฤติกรรมเสี่ยงหรือการทำธุรกรรมเดิมพัน และการใช้สีและกราฟิกมีลักษณะเป็นกลางหรือสอดคล้องกับอัตลักษณ์องค์กร ความแตกต่างดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้โมเดลสามารถเรียนรู้คุณลักษณะเชิงภาพ (Visual Features) ที่

จำแนกความแตกต่างระหว่างเว็บไซต์พื้กับเว็บไซต์ทั่วไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในมิติของรูปแบบปุ่ม (Button Patterns) การจัดวางแบนเนอร์ (Banner Layout) และองค์ประกอบกราฟิกที่สื่อถึงกิจกรรมเกมเติมพื้

2. ขอบเขตข้อมูล (Data Scope)

ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกเก็บรวบรวมจากเว็บไซต์ที่สามารถเข้าถึงได้โดยสาธารณะ (Publicly Accessible Websites) โดยไม่มีการเข้าถึงข้อมูลที่ต้องใช้บัญชีผู้ใช้หรือสิทธิ์เฉพาะ ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับหลักจริยธรรมการวิจัยด้านข้อมูลดิจิทัล และหลีกเลี่ยงการเข้าถึงข้อมูลส่วนบุคคล โดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.1 ขอบเขตเชิงโครงสร้างหน้าเว็บ (Page-Level Scope) ผู้วิจัยกำหนดให้เก็บข้อมูลเฉพาะหน้าเว็บหลัก (Homepage หรือ Landing Page) ของแต่ละเว็บไซต์เท่านั้น โดยไม่รวมถึงหน้าลงทะเบียน (Registration Page) หน้าระบบสมาชิก (Member Area) หรือหน้าที่ต้องเข้าสู่ระบบก่อนเข้าถึงเว็บไซต์ ซึ่งเหตุผลในการจำกัดเฉพาะหน้าเว็บหลัก เนื่องจากหน้าแรกเป็นหน้าที่สะท้อนอัตลักษณ์และวัตถุประสงค์หลักของเว็บไซต์ และเป็นหน้าที่ที่ผู้ใช้งานทั่วไปสามารถเข้าถึงได้

2.2 ขอบเขตเชิงเวลา (Temporal Scope) ข้อมูลถูกเก็บในช่วงเวลาปัจจุบันเนื่องจากหน้าเว็บหลักมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทั้งด้านเนื้อหา โปรโมชัน และการออกแบบอินเทอร์เฟซ ดังนั้นชุดข้อมูลจึงสะท้อนสภาพเว็บไซต์ ณ ช่วงเวลาที่ทำการเก็บข้อมูลเท่านั้น

2.3 ขอบเขตเชิงเนื้อหา (Content Scope) การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะ ลักษณะเชิงภาพ (Visual Features) ของหน้าเว็บไซต์ เช่น การจัดวางองค์ประกอบ (Layout Structure) รูปแบบปุ่มและแบนเนอร์ โทสนีและองค์ประกอบกราฟิก

2.4 ข้อจำกัดของขอบเขตข้อมูล (Scope Limitations) การจำกัดข้อมูลเฉพาะหน้าเว็บหลักอาจส่งผลให้ไม่ครอบคลุมรูปแบบเว็บไซต์ที่ซ่อนเนื้อหาหลักไว้หลังระบบสมัครสมาชิก และไม่สามารถ

ตรวจจับเว็บไซต์ที่ปรับเปลี่ยนหน้าแรกให้มีลักษณะเป็นกลางเพื่อหลีกเลี่ยงการตรวจสอบได้

3. การเตรียมข้อมูล (Data Preprocessing)

ก่อนนำภาพเข้าสู่กระบวนการฝึกสอนโมเดล ผู้วิจัยได้ดำเนินการเตรียมข้อมูลให้สอดคล้องกับข้อกำหนดของสถาปัตยกรรม MobileNetV2 โดยมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.1 การปรับขนาดภาพ (Image Resizing) ภาพหน้าจอทั้งหมดถูกปรับขนาดเป็น 224×224 พิกเซล ซึ่งเป็นขนาดอินพุตมาตรฐานของ MobileNetV2 ตามที่เสนอโดย Sandler และคณะ [5] การกำหนดขนาดภาพให้คงที่มีความสำคัญในเชิงโครงสร้าง เนื่องจากโครงข่าย Convolutional Neural Network (CNN) ต้องการมิติข้อมูลที่สม่ำเสมอเพื่อให้สามารถคำนวณ Convolution Operation ได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ การลดขนาดภาพยังช่วยลดจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องประมวลผล ส่งผลให้ลดภาระด้านหน่วยความจำและเวลาในการฝึกสอน ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ MobileNetV2 ที่มุ่งเน้นความมีประสิทธิภาพเชิงคำนวณ (Computational Efficiency) และความเบาของโมเดล

3.2 การปรับค่าความเข้มของพิกเซล (Pixel Normalization) ค่าความเข้มของพิกเซล (0-255) ถูกปรับให้อยู่ในช่วง 0-1 โดยการหารด้วย 255 ทั้งนี้เพื่อให้ข้อมูลมีสเกลที่เหมาะสมต่อการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมตามแนวคิดของ Goodfellow et al. [7] การทำ Normalization มีบทบาทสำคัญในการ

- 1) ลดความแปรปรวนของข้อมูลนำเข้า
- 2) ป้องกันปัญหา Gradient ที่มีค่าสูงเกินไป (Exploding Gradients)
- 3) ช่วยให้กระบวนการ Gradient Descent มีเสถียรภาพมากขึ้น
- 4) เพิ่มความเร็วในการลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสม (Faster Convergence)

ดังนั้น การปรับสเกลข้อมูลจึงเป็นขั้นตอนมาตรฐานในงาน Deep Learning และมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของโมเดล

3.3 การจัดรูปแบบข้อมูล (Tensor Formatting) ภาพที่ผ่านการปรับขนาดและ Normalization ถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบ Tensor ขนาด $224 \times 224 \times 3$ (RGB Channels) เพื่อให้สอดคล้องกับโครงสร้างอินพุตของ MobileNetV2 ซึ่งออกแบบให้รองรับภาพสีแบบสามช่องสัญญาณ

3.4 เหตุผลเชิงสถาปัตยกรรม (Architectural Consistency) MobileNetV2 ใช้โครงสร้าง Inverted Residual Blocks และ Linear Bottlenecks ซึ่งออกแบบมาเพื่อประมวลผลข้อมูลภาพที่ผ่านการปรับสเกลอย่างเหมาะสม หากข้อมูลมีสเกลที่ไม่สมดุล อาจส่งผลให้การเรียนรู้ภายในชั้น Convolution และ Batch Normalization ไม่มีประสิทธิภาพในเชิงทฤษฎี การเตรียมข้อมูลให้มีสเกลที่เหมาะสมจึงสอดคล้องกับหลักการของการเรียนรู้เชิงลึกที่อธิบายโดย Goodfellow et al. [7] ว่าการปรับรูปแบบข้อมูลก่อนการฝึกสอนเป็นองค์ประกอบสำคัญของ Pipeline การเรียนรู้

3.5 ข้อจำกัดของโมเดล MobileNetV2 เนื่องจากข้อจำกัดสถาปัตยกรรมของโมเดล MobileNetV2 ถูกออกแบบให้รับข้อมูลนำเข้าขนาดมาตรฐานรูปภาพขนาด 224×224 พิกเซล ในการประมวลผล ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องมีการปรับความละเอียดของรูปภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งทำการปรับลดขนาดรูปภาพต้นฉบับ (Full HD) ตามสัดส่วนก่อนทำการครอบ (Crop) ภาพให้เหลือขนาด 224×224 พิกเซล ในขั้นสุดท้ายก่อนนำเข้าสู่โมเดล



รูปที่ 5 แสดงผลการปรับขนาดภาพของโมเดล MobileNetV2

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการจำแนกประเภทเว็บไซต์จากภาพหน้าจอโดยพิจารณาแบบโดยรวมของหน้าเว็บ มากกว่าการวิเคราะห์ข้อความเชิงลึก การปรับขนาดภาพเป็น 224×224 พิกเซล

จึงยังคงรักษาคูณลักษณะที่เพียงพอต่อการเรียนรู้ของโมเดล

4. การแบ่งชุดข้อมูล (Dataset Splitting)

เพื่อให้การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและสะท้อนความสามารถในการจำแนกข้อมูลใหม่ จึงเลือกใช้กระบวนการแบ่งชุดข้อมูลแบบโฮลด์เอาต์ โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ส่วนที่เป็นอิสระต่อกัน ได้แก่ ชุดข้อมูลฝึกสอน (Training Set) ชุดข้อมูลตรวจสอบ (Validation Set) และชุดข้อมูลทดสอบ (Test Set) โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การวิเคราะห์ความไวต่อปริมาณข้อมูล โดยกำหนดสัดส่วนการทดลองแบ่งข้อมูลเป็น กรณี 2 โดยมี 10-10-80 และ 10-20-70 ได้แก่ วัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความไวของสถาปัตยกรรม MobileNetV2 ต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณข้อมูลฝึกสอนภายใต้ทรัพยากรข้อมูลที่จำกัด การเปรียบเทียบนี้จะช่วยหาจุดสมดุลระหว่างปริมาณข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้พารามิเตอร์ และปริมาณข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

4.2 หน้าที่ของชุดข้อมูลย่อย

1. ชุดข้อมูลฝึกสอน ใช้สำหรับให้แบบจำลองเรียนรู้และสกัดคุณลักษณะเชิงทัศน์ (Visual Features) จากภาพหน้าจอเว็บไซต์
2. ชุดข้อมูลตรวจสอบ ทำหน้าที่เป็นข้อมูลชุดยืนยันในระหว่างการฝึกสอน เพื่อใช้ปรับจูนค่า Batch Size, Epoch และใช้ร่วมกับเทคนิค Early Stopping เพื่อป้องกันปัญหาการเรียนรู้เกินอย่างเป็นระบบ
3. ชุดข้อมูลทดสอบ ทำหน้าที่เป็นข้อมูลที่ไม่เคยผ่านตาแบบจำลองมาก่อน โดยถูกแยกไว้ประเมินประสิทธิภาพเชิงประจักษ์ในขั้นตอนสุดท้ายเพียงครั้งเดียว เพื่อให้ได้ตัวชี้วัดที่สะท้อนการใช้งานจริงอย่างเป็นกลาง

4.3 วิธีการสุ่มแบ่งข้อมูล

เพื่อให้การแบ่งข้อมูลเป็นไปตามหลักการสถิติ ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการสุ่มแบบแบ่งชั้นภูมิ (Stratified Sampling) เพื่อรักษาสัดส่วนของเว็บไซต์การพนันและเว็บไซต์ทั่วไปให้มีความสมดุลเท่ากันใน

ทุกชุดข้อมูลย่อย นอกจากนี้ยังกำหนดเงื่อนไขให้ภาพที่มาจากโดเมนเว็บไซต์เดียวกันต้องถูกจัดอยู่ในชุดข้อมูลกลุ่มเดียวกันเท่านั้น เพื่อป้องกันปัญหาข้อมูลรั่วไหล ซึ่งอาจส่งผลให้แบบจำลองจดจำรูปแบบการออกแบบเฉพาะของโดเมนแทนการเรียนรู้คุณลักษณะทั่วไปของคลาส ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การแบ่งจำนวนภาพตามคลาสและสัดส่วนการฝึกสอน-การทดสอบประสิทธิภาพ-การทดสอบ (Train-Validation-Test Split)

Split	Class	Train	Validation	Test	Total
70 – 20–10	เว็บไซต์พนัน	420	120	60	600
	เว็บไซต์ทั่วไป	420	120	60	600
	รวม	840	240	120	1,200
	เว็บไซต์พนัน	480	60	60	600
80 – 10–10	เว็บไซต์ทั่วไป	480	60	60	600
	รวม	960	120	120	1,200

5. การฝึกสอนโมเดล (Model Training)

ในการวิจัยนี้ได้ทำการทดลองฝึกสอนโมเดลภายใต้จำนวนรอบการเรียนรู้ (Epochs) ที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 10 รอบ ถึง 50 รอบ โดยเพิ่มครั้งละ 10 รอบ (คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 รอบ) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโมเดล นอกจากนี้ยังได้ทดสอบขนาดแบตช์ (Batch Size) ที่ 2 ค่า คือ 8 และ 16 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในการเรียนรู้ของโมเดล โดยมีการใช้ TensorBoard เพื่อติดตามค่าตัวชี้วัดสำคัญ ได้แก่ Accuracy, Loss และ ROC AUC ตลอดกระบวนการฝึกสอนโมเดล ซึ่งดำเนินการบนชุดข้อมูล Training Set และตรวจสอบความถูกต้องด้วย Validation Set โดยในงานวิจัยนี้กำหนดจำนวนรอบการเรียนรู้สูงสุด (Epochs) ที่ 50 รอบ และใช้กลไก Early Stopping เพื่อป้องกันการเกิด Overfitting โดยเฝ้าติดตามค่า Validation ROC AUC (val_auc)

หากค่าไม่ปรับตัวดีขึ้นภายในจำนวนรอบที่กำหนด โมเดลจะหยุดการเรียนรู้โดยอัตโนมัติและบันทึกพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดไว้

5.1 การปรับพารามิเตอร์และกระบวนการเรียนรู้

โมเดลถูกปรับพารามิเตอร์ด้วย Adam Optimizer โดยกำหนดอัตราการเรียนรู้ (learning rate) ที่ 0.001 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับการฝึกโมเดล Deep Learning ในงานจำแนกภาพ เนื่องจากสามารถปรับอัตราการเรียนรู้แบบ adaptive ตามค่าเกราดิเอนต์ของแต่ละพารามิเตอร์ได้ และใช้ฟังก์ชันการสูญเสีย (loss function) แบบ Categorical Cross-Entropy ซึ่งแม้งานวิจัยนี้จะมีเพียงสองคลาสแต่ยังถือว่าเหมาะสมสำหรับการจำแนกประเภท (multi-class classification)

5.2 การศึกษาผลกระทบของ Batch Size

เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาด batch (Batch Size) ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลเมื่อใช้ batch size ที่แตกต่างกันสองค่า คือ 8 และ 16 โดย batch ขนาดเล็กมีแนวโน้มทำให้การเรียนรู้มีความละเอียดมากขึ้น แต่ต้องใช้เวลาประมวลผลนานกว่า ในขณะที่ batch ขนาดใหญ่ช่วยให้การฝึกเร็วขึ้นแต่มีโอกาสลดทอนความสามารถในการ generalize โมเดล

6. การประเมินผลโมเดล (Model Evaluation)

หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการฝึกสอน โมเดลที่ได้จะถูกนำมาประเมินประสิทธิภาพด้วยชุดข้อมูล Test Set ซึ่งไม่เคยถูกใช้ในการฝึกหรือปรับแต่งพารามิเตอร์มาก่อน เพื่อให้การประเมินสะท้อนความสามารถในการทำนายข้อมูลใหม่ ได้อย่างเป็นกลาง

ในการวิจัยนี้ใช้การประเมินผลเชิงปริมาณ (Quantitative Evaluation) เป็นหลัก โดยพิจารณาตัวชี้วัดหลายรายการ เพื่อให้ครอบคลุมมิติของประสิทธิภาพที่แตกต่างกันของโมเดลจำแนกประเภทแบบสองคลาส (Binary Classification) โดยมีตัวชี้วัดดังนี้

6.1 Confusion Matrix เป็นตารางสรุปผลการทำนายของโมเดลแบ่งออกเป็น 4 กรณี ได้แก่



True Positive (TP): ทำนายว่าเป็นเว็บไซต์พนัน และเป็นเว็บไซต์พนันจริง

True Negative (TN): ทำนายว่าเป็นเว็บไซต์ทั่วไป และเป็นเว็บไซต์ทั่วไปจริง

False Positive (FP): ทำนายว่าเป็นเว็บไซต์พนัน แต่เป็นเว็บไซต์ทั่วไปจริง

False Negative (FN): ทำนายว่าเป็นเว็บไซต์ทั่วไป แต่เป็นเว็บไซต์พนันจริง

6.2 Accuracy (ความแม่นยำรวม) แสดงสัดส่วนของจำนวนตัวอย่างที่โมเดลทำนายถูกต้องต่อจำนวนตัวอย่างทั้งหมด ดังสมการ

$$\text{Accuracy} = \frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)} \quad (1)$$

6.3 Precision (ความแม่นยำเชิงบวก) วัดความถูกต้องของตัวอย่างที่โมเดลทำนายว่าเป็นเว็บไซต์พนัน ดังสมการ

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

6.4 Recall (การครอบคลุม หรือ Sensitivity) วัดความสามารถของโมเดลในการตรวจจับเว็บไซต์พนันทั้งหมดที่มีอยู่จริง ดังสมการ

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

6.5 F1-Score เป็นค่าเฉลี่ยเชิงฮาร์โมนิกของ Precision และ Recall ซึ่งสะท้อนความสมดุลระหว่างการทำนายถูกและการตรวจจับครอบคลุม

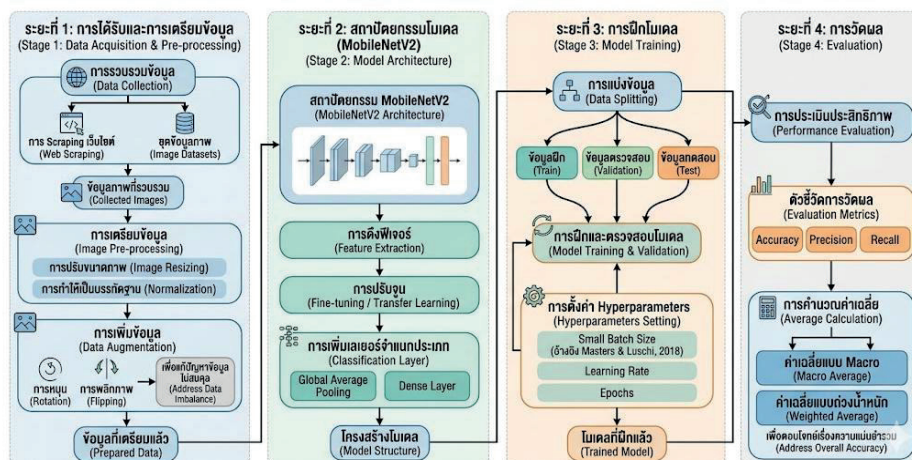
$$F1 = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (4)$$

6.6 ROC AUC (Receiver Operating Characteristic – Area Under the Curve) ตัวชี้วัดสมรรถนะของโมเดลที่ใช้ประเมินความสามารถในการจำแนกเว็บไซต์พนันและเว็บไซต์ทั่วไป โดยพิจารณาจากพื้นที่ใต้กราฟ ROC ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการทำนายบวกจริง (True Positive Rate: TPR) และอัตราการทำนายบวกเทียม (False Positive Rate: FPR) ดังสมการ

$$\text{TPR} = \frac{TP}{TP + FN}, \quad \text{FPR} = \frac{FP}{FP + TN} \quad (5)$$

ค่า ROC AUC ที่ใกล้เคียง 1.0 หมายถึงโมเดลสามารถจำแนกได้ดีมาก ขณะที่ค่าที่ใกล้ 0.5 แสดงว่าโมเดลไม่สามารถจำแนกได้ดีกว่าการสุ่ม (random guess) นอกจากนี้ได้สร้าง Confusion Matrix เพื่อแสดงจำนวนการทำนายถูกและผิดในแต่ละคลาสโดยตรง และสร้างรายงานผลในรูปแบบ Classification Report ที่สรุปค่า Precision, Recall และ F1-Score ของแต่ละคลาส พร้อมค่าเฉลี่ย Macro และ Weighted Average [8]

จากวิธีการดำเนินงานที่กล่าวมา สามารถสรุปเป็นแผนภาพขั้นตอนการทำงาน (Research Workflow) ได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย (Research Workflow)



ผลการทดลองและการอภิปรายผล

บทนี้นำเสนอผลการทดลองของการประยุกต์ใช้โมเดล MobileNetV2 ในการจำแนกเว็บไซต์พนันออนไลน์จากภาพหน้าจอบเว็บไซต์ โดยการทดลองดำเนินการภายใต้ขั้นตอนและการตั้งค่าที่กำหนดไว้ การประเมินประสิทธิภาพของโมเดลครอบคลุมตัวชี้วัดมาตรฐาน ได้แก่ Accuracy, Precision, Recall, F1-score และ ROC AUC เพื่อสะท้อนถึงความถูกต้องโดยรวมและความสามารถในการจำแนกเชิงลึกในระดับคลาส

1. ภาพรวมประสิทธิภาพของโมเดล

ผลการทดลองพบว่าโมเดลสามารถจำแนกเว็บไซต์พนันออนไลน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีค่า

1.1 Accuracy = 97.0%

1.2 F1-score = 0.97

1.3 Precision และ Recall อยู่ในช่วง 0.95–0.98

1.4 ROC AUC มีค่าใกล้เคียง 0.99
ค่าดังกล่าวสะท้อนว่าโมเดลมีความสามารถในการแยกแยะลักษณะเชิงภาพ (Visual Features) ของเว็บไซต์พนันกับเว็บไซต์ทั่วไปได้อย่างชัดเจน ทั้งในเชิงความถูกต้องโดยรวม (Accuracy) และความสมดุลระหว่าง Precision กับ Recall (F1-score) ค่า F1-score ที่สูงแสดงให้เห็นว่าโมเดลไม่เพียงแต่ทำนายถูกต้องจำนวนมาก แต่ยังสามารถลดทั้ง False Positive และ False Negative ได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในบริบทของการตรวจจับเว็บไซต์พนันออนไลน์

2. การเปรียบเทียบกับงานวิจัย

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใช้ MobileNetV2 ในโดเมนอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพของงานวิจัยนี้อยู่ในระดับใกล้เคียงกับงานก่อนหน้า แม้บริบทข้อมูลจะแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์ที่ได้ (97%) อยู่ในระดับใกล้เคียงกับงานด้านภาพธรรมชาติ เช่น งานของ Nair et al. [4] และ Aufar and Kaloka [10] ทั้งที่ข้อมูลเว็บไซต์มีลักษณะซับซ้อนกว่า (มีข้อความ ไอคอน โฆษณา และ

องค์ประกอบกราฟิกหลากหลาย) จึงสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างของ MobileNetV2 ซึ่งใช้แนวคิด Inverted Residuals และ Depthwise Separable Convolution มีความสามารถในการดึงคุณลักษณะเชิงภาพที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ดี แม้โดเมนจะไม่ใช่วัตถุทั่วไป

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลลัพธ์ MobileNetV2

งานวิจัย	โดเมนข้อมูล	Accuracy	F1-score
Patel et al. [9]	การแพทย์	91.2%	0.91
Aufar and Kaloka [10]	เกษตร	99.9%	0.99
Nair B. J. et al. [4]	ดอกไม้ สมุนไพร	98.3%	0.98
งานวิจัยนี้	เว็บไซต์พนัน	97.0%	0.97

3. ผลกระทบของพารามิเตอร์การฝึกสอน

ในการทดลอง ผู้วิจัยได้ทำการปรับพารามิเตอร์หลักดังนี้

3.1 Epochs: 10, 20, 30, 40, 50

3.2 Batch Size: 8 และ 16

3.3 Data Split: 70–20–10 และ 80–10–10

ผลการทดลองพบว่า

3.4 เมื่อเพิ่มจำนวน Epoch จาก 10 เป็น 30 ค่า Accuracy เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

3.5 หลัง 40 - 50 Epoch ค่าประสิทธิภาพเริ่มคงที่ (Plateau)

3.6 Batch Size = 8 ให้ค่า Validation Accuracy สูงกว่าเล็กน้อยในบางกรณี โดยจากการทดลองพบว่า Batch Size ขนาดเล็ก (8) ให้ค่าความแม่นยำสูงกว่าขนาดใหญ่ (16) เนื่องจากในทางทฤษฎี การเรียนรู้เชิงลึก Batch Size ขนาดเล็กช่วยให้กระบวนการ Gradient Descent มีความถี่ในการปรับปรุงค่าน้ำหนัก (Weights) บ่อยขึ้นในหนึ่งรอบ



การเรียนรู้ ส่งผลให้โมเดลสามารถเรียนรู้ลักษณะเฉพาะที่ละเอียดอ่อน (Fine-grained features) ของหน้าเว็บไซต์นั้น เช่น รูปแบบของปุ่มขนาดเล็กหรือสัญลักษณ์เฉพาะได้ดีกว่า และยังช่วยให้โมเดลหลีกเลี่ยงการติดอยู่ในจุด Local Minima ที่ไม่เหมาะสม (Poor Local Minima) ได้ดีกว่า Batch Size ขนาดใหญ่ [11]

3.7 Data split แบบ 80-10-10 ให้ผลลัพธ์ที่เสถียรมากกว่าเล็กน้อย เนื่องจากสถาปัตยกรรม MobileNetV2 แม้จะเป็นแบบจำลองขนาดเล็ก แต่ยังคงต้องการปริมาณข้อมูลฝึกสอนที่เพียงพอเพื่อปรับจูนพารามิเตอร์ให้ครอบคลุมความหลากหลายของข้อมูล (Data Diversity) การเพิ่มสัดส่วนข้อมูลฝึกสอนเป็นร้อยละ 80 ช่วยให้โมเดลได้เห็นรูปแบบของหน้าเว็บไซต์ทั่วไปและเว็บไซต์พิเศษที่มีความซับซ้อนของกราฟิกสูงได้หลากหลายขึ้น ส่งผลให้โมเดลมีโอกาสเกิดการเรียนรู้ที่ครอบคลุม (Better

Generalization) และลดความแปรปรวนเมื่อนำไปทดสอบกับข้อมูลที่ไม่เคยเห็น ส่งผลให้ได้ค่าความแม่นยำสูงถึง 0.97 ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพการเรียนรู้ที่เหมาะสมภายใต้ทรัพยากรข้อมูลที่มีอยู่อย่างจำกัด

4. การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของโมเดลบนชุด Validation จากผลการทดลองของโมเดล MobileNetV2 ภายใต้เงื่อนไขการแบ่งข้อมูล (Data Splitting) และค่าพารามิเตอร์การฝึกสอนที่แตกต่างกัน พบว่าโมเดลมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับสูงอย่างสม่ำเสมอ โดยมีค่า Accuracy อยู่ในช่วง 0.93 – 0.97 ขณะที่ค่า Precision, Recall และ F1-Score อยู่ระหว่าง 0.92 – 0.98 ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความเสถียรของโมเดลต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ จำนวน Epoch และขนาด Batch Size ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์ของโมเดลบนชุด Validation ตามการแบ่งชุดข้อมูลและขนาดแบตช์

Split	Epoch	Batch Size	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score	ROC AUC
70 -20-10	10	8	0.94	0.93	0.95	0.94	0.9689
		16	0.95	0.95	0.95	0.95	0.9706
	20	8	0.96	0.94	0.98	0.96	0.9797
		16	0.95	0.94	0.97	0.95	0.9822
	30	8	0.96	0.95	0.97	0.96	0.9794
		16	0.96	0.94	0.98	0.96	0.9806
	40	8	0.96	0.94	0.98	0.96	0.9811
		16	0.96	0.94	0.98	0.96	0.9831
	50	8	0.96	0.94	0.98	0.96	0.9781
		16	0.96	0.94	0.98	0.96	0.9825
80 -10-10	10	8	0.95	0.98	0.92	0.95	0.9892
		16	0.95	0.98	0.92	0.95	0.9900
	20	8	0.96	0.98	0.93	0.96	0.9958
		16	0.95	0.98	0.92	0.95	0.9961
	30	8	0.96	0.98	0.93	0.96	0.9964
		16	0.95	0.97	0.93	0.95	0.9967
	40	8	0.96	0.95	0.97	0.96	0.9928
		16	0.96	0.98	0.93	0.96	0.9961
	50	8	0.97	0.98	0.95	0.97	0.9969
		16	0.93	0.95	0.92	0.93	0.9942



สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาค้นคว้านี้สามารถสรุปข้อเสนอแนะได้สองประการสำคัญ ดังนี้

1. เชิงการประยุกต์ใช้งานจริง

1.1 โมเดลนี้สามารถพัฒนาเป็น เครื่องมือสนับสนุนเจ้าหน้าที่ เพื่อใช้ตรวจสอบเว็บไซต์ต้องสงสัยได้อย่างรวดเร็วและอัตโนมัติ

1.2 ระบบสามารถบูรณาการเข้ากับ หน่วยงานรัฐหรือเอกชน ที่ทำหน้าที่กำกับดูแลการใช้งานอินเทอร์เน็ต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบังคับใช้กฎหมาย

2. ข้อจำกัดของงานวิจัย

2.1 งานวิจัยนี้ มีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดชุดข้อมูล โดยชุดข้อมูล 1,200 ภาพ แม้จะเพียงพอต่อการเรียนรู้แบบถ่ายโอน แต่ยังไม่ครอบคลุมความหลากหลายของรูปแบบเว็บไซต์พนันที่มีการปรับเปลี่ยนหน้าตา (UI/UX) อยู่ตลอดเวลาเพื่อหลีกเลี่ยงการตรวจจับ

2.2 งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพียงการแยกเว็บไซต์พนันออกจากเว็บไซต์ทั่วไปเท่านั้น จึงยังไม่สามารถระบุประเภทเฉพาะของกิจกรรมพนัน เช่น คาสีโนสด พนันกีฬา หรือสล็อต ซึ่งมีลักษณะกราฟิกที่แตกต่างกันได้

2.3 การพิจารณาเพียงภาพหน้าจอหลัก (Landing Page) ดังนั้นการเก็บข้อมูลจึงจำกัดเฉพาะหน้าแรกของเว็บไซต์ อาจทำให้ไม่สามารถตรวจจับเว็บไซต์ที่ออกแบบหน้าแรกให้ดูเป็นกลาง เพื่อปกปิดเนื้อหาการพนันที่ซ่อนอยู่ภายในระบบสมาชิกได้

3. เชิงการวิจัยในอนาคต

3.1 ขยายชุดข้อมูลให้ใหญ่ และหลากหลายขึ้น ทั้งในด้านภาษา (ไทย/อังกฤษ), การออกแบบเว็บไซต์ และลักษณะกราฟิก

3.2 ทดลองใช้สถาปัตยกรรมใหม่ เช่น EfficientNet, ConvNeXt หรือ Vision Transformer (ViT) เพื่อเปรียบเทียบเชิงประสิทธิภาพกับ MobileNetV2

3.3 พัฒนาโมเดลสำหรับ Multi-class Classification เพื่อตรวจจับเว็บไซต์ผิดกฎหมายประเภทอื่น

3.4 เพิ่มการตรวจสอบชื่อเว็บไซต์ที่เข้าข่ายเว็บไซต์พนันออนไลน์

เอกสารอ้างอิง

[1] พระราชบัญญัติการพนัน พุทธศักราช 2478. (2478, 5 กุมภาพันธ์). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 52, ตอนที่ 0 ก. หน้า 1980-2003.

[2] พระราชบัญญัติคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล พ.ศ. 2562. (2562, 27 พฤษภาคม). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 136, ตอนที่ 69 ก. หน้า 52-95.

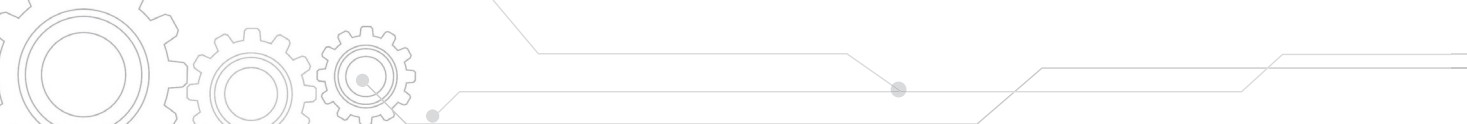
[3] พระราชบัญญัติว่าด้วยการกระทำความผิดเกี่ยวกับคอมพิวเตอร์ พ.ศ. 2550. (2550, 18 มิถุนายน). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 124, ตอนที่ 27 ก. หน้า 4-13.

[4] Nair, B. J. B., Arjun, B., Abhishek, S., Abhinav, N. M., and Madhavan, V. (2024). Classification of Indian medicinal flowers using MobileNetV2. 2024 11th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), pp. 1512-1518.

[5] Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., and Chen, L.-C. (2018). MobileNetV2: Inverted residuals and linearized bottlenecks. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 4510-4520.

[6] พระราชบัญญัติการบริหารงานและการให้บริการภาครัฐผ่านระบบดิจิทัล พ.ศ. 2562. (2562, 22 พฤษภาคม). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 136, ตอนที่ 67 ก. หน้า 40-52.

[7] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep learning. MIT Press.



[8] Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, pp. 2825–2830.

[9] Patel, S., Kumar, A., & Singh, R. (2020). AI for inclusive education: A case study. *International Journal of Special Education*, vol. 35(3), pp. 10-23.

[10] Aifar, Y., & Kaloka, T. P. (2021). Robusta coffee leaf detection based on YOLOv3-MobileNetV2 model. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. vol. 12(6), pp. 6675-6683.

[11] Masters, D., & Luschi, C. (2018). Revisiting small batch training for deep neural networks. arXiv:1804.07612. pp. 1-18.

การประมาณค่าปริมาณน้ำฝนจากปริมาณไอน้ำในอากาศของประเทศไทย

Estimation of rainfall from the amount of water vapor in the air of Thailand

Sayan Phokate*

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan,
Khon Kaen Campus, Nai Muang Sub-district, Muang District, Khon Kaen Province, Thailand, 40000

*Corresponding Author: sayan.ph@emuti.ac.th, 082-8571112

Received 24 February 2026; Received in revised form 31 March 2026; Accepted 14 May 2026

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณค่าปริมาณน้ำฝนในอากาศในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากการตรวจวัดของสถานีอุตุนิยมวิทยาในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย ระหว่างปี พ.ศ. 2557 ถึง พ.ศ.2567 นำข้อมูลมาคำนวณหาปริมาณไอน้ำในอากาศ จากนั้นนำค่าปริมาณไอน้ำที่คำนวณได้มาหาความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำฝนที่วัดได้ของสถานีเดียวกัน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนกับปริมาณไอน้ำในอากาศมีความน่าเชื่อถือค่อนข้างสูงสามารถแสดงได้ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะมีรูปแบบแตกต่างกันไปในแต่ละภูมิภาค เมื่อทดสอบกับชุดข้อมูลอิสระของปี พ.ศ. 2568 พบว่าค่าเฉลี่ยรายเดือนของปริมาณน้ำฝนจากแบบจำลองมีความสอดคล้องที่ดีทั้งในด้านการกระจายตัวและแนวโน้มกับค่าที่ได้จากการวัดโดยไม่มี ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ 38.693 มิลลิเมตร

คำสำคัญ: ปริมาณไอน้ำ, ปริมาณน้ำฝน, ข้อมูลอากาศชั้นบน, ข้อมูลพื้นผิว, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Abstract

This research aims to estimate rainfall amounts in different regions of Thailand using temperature and relative humidity data obtained from meteorological stations in each region of the country between 2014 to 2024. The data was then used to calculate the amount of water vapor in the air. The calculated water vapor content was then correlated with the rainfall measured at the same station. The results showed that the relationship between rainfall and water vapor in the air was relatively reliable and could be represented in a mathematical model, which would vary depending on the region. When tested with an independent dataset from the year 2025, the monthly average rainfall from the model a good agreement in distributions and trends with the measured values, showing no significant difference at the 0.05 level. The root mean square error (RMSE) was 38.693 mm.

Keywords: amount of water vapor, rainfall, upper air data, surface data, mathematical model

1. Introduction

Water vapor is the atmosphere's composition indicates the change of weather, cloud formation, rain, fog, snow and hail etc. In addition, the amount of water vapor in the atmosphere has a significant influence on the reduction of solar radiation through the atmosphere to the Earth's surface [1]. The amount of water vapor is part of the hydrologic cycle. The water vapor is a carrier and distributes heat to the atmosphere and the surface. It has heat retention properties, making the temperature of the earth warm for living [2]. The amount of water vapor in the air is expressed in terms of the precipitable water vapor in centimeters. Which can be said in terms of the height of the water in the column of the atmosphere, if the water vapor inserted in the column of the atmosphere condenses into water [3-4]. The precipitable water vapor in the air is rare and there is no measurement of water vapor in Thailand. The amount of water vapor is related to the relative humidity and air temperature obtained from the upper air data. It changes according to latitude and season [4-5]. The heat from the sun causes water to evaporate into a vapor floats up in the air. When the air temperature decreases, the water vapor in the atmosphere condenses into small droplets floating in the air, they will gather into clouds. Water vapor in the clouds gathered in a large drop of water to fall to the ground, called rain. Temperature and relative humidity are important factors that affect the amount of water vapor and rainfall, higher water vapor levels increase the chances of rain [2, 5].

Rainfall is a vital and essential resource for all living things. Rainfall refers to the height of accumulated rainfall on a flat surface over a given period of time, assuming the water does not seep into the ground. It is measured in millimeters. Climate change makes rainfall patterns difficult to predict. It is highly variable and varies greatly across different regions [2, 5]. Accurate and precise forecasting can effectively reduce risks to life, the economy, and the environment [1, 6]

Rainfall is also a significant global issue because it affects every aspect of human life. Accurately predicting rainfall is a challenging task today. Thailand is an agricultural country, so rainfall is a major factor affecting agricultural yields, food production, the spread of diseases and pests, the occurrence of natural disasters, and biodiversity. This research presents a method for estimating rainfall from the amount of water vapor in the air, using readily available surface data (temperature and relative humidity), which can be applied in areas where measurements are not available.

2. Materials and Methods

This research, the relative humidity and air temperature data from the upper air data during 2014-2024 were used. There are only 4 stations in Thailand namely, Chiang Mai, Ubon Ratchathani, Songkhla and the Bangkok Meteorological Department. This is used to calculate the amount of water vapor using theoretical equation [2-5].

$$w = -\frac{1}{\rho g} \int_{p_0}^0 M_p dp \quad (1)$$

where w is the amount of water vapor in centimeters, M_p is the mixing ratio at any pressure level p (decimal), g is the acceleration due to gravity (986.665 cm/s^2), p_0 is the atmospheric pressure at the Earth's surface (mbar), ρ is the air density (g/cm^3). The minus sign indicates pressure decreases as the height increases.

The amount of water vapor from upper data at the four monitoring stations between 2014 to 2024 was correlated with the surface data (temperature, relative humidity, and saturated vapor pressure) at the same station and simultaneously in the mathematical model to calculate the water vapor of the stations that does not have the upper air data. After that, the mathematical model was tested using surface data and upper air data of the same station using data in 2025 which is independent data to test and find the efficiency in the form of root mean square error (RMSE). Finally, rainfall data from 29 regularly monitored stations nationwide were used, including 7 stations in the North, 8 stations in the Central region, 7 stations in the Northeast, and 7 stations in the South. The monthly average for each region is calculated. The relationship between rainfall and water vapor data at the same station and time period is used to create a mathematical model to estimate rainfall using surface data for different regions.

3. Results and Discussion

The amount of water vapor from the upper air data of four stations were correlated with temperature and relative humidity, which is the surface data at the same station and the same time, as shown in

Figure 1. The results showed that data were correlated in mathematical models. The correlation coefficient (R^2) was 0.891. Relationships was fitted as the following equation.

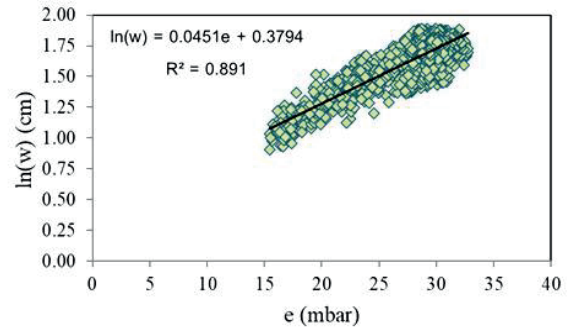


Figure 1 The relationship between water vapor and vapor pressure.

$$w = 1.461407 \exp(0.0451e) \quad (2)$$

where e is the vapor pressure (mbar). It is obtained by the product of the saturated vapor pressure (e_s) and the relative humidity (RH) at that pressure level [2, 5].

$$e = \frac{RH \times e_s}{100} \quad (3)$$

The saturated vapor pressure value depends only on the air temperature (T) in degree Celsius. The saturated vapor pressure (in mbar) is calculated according to [2, 5].

$$e_s = 6.112 \exp\left(\frac{17.67 \times T}{T + 243.5}\right) \quad (4)$$

The model was retested with independent data that had never been used to build the model, using data from the four stations mentioned above in 2025 to verify the accuracy of the model. It was found that, the amount of water vapor from the upper air data was close to the value obtained from the model, where the RMSE was 0.528 cm and the R^2 was 0.851. This model was

used to calculate water vapor for stations without upper air data.

The data from 29 stations across four regions of Thailand during the years 2014 to 2024 were analyzed to identify the relationship between rainfall and water vapor, as shown in Figure 2. The mathematical relationship between rainfall and amount of water vapor in each region can be analyzed and shown in Table 1, which varies according to the climate of each region.

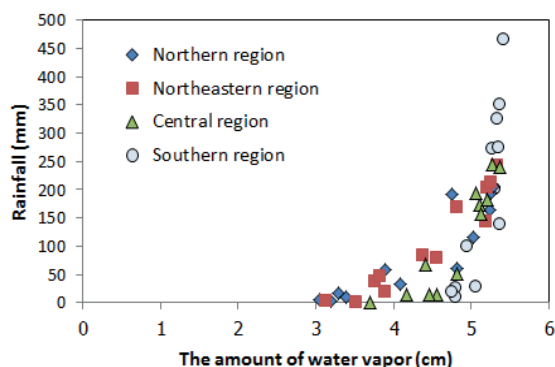


Figure 2 Average monthly rainfall and amount of water vapor from 4 regions of Thailand during the years 2014 to 2024.

Table 1 The Equation of relationship between rainfall and amount of water vapor

Region	The equation of the relationship
North	$RF = 0.0026 w^{6.7737}$; $R^2 = 0.871$
Northeast	$RF = 2.9074 w^3 + 0.4992 w^2 - 62.601 w + 100.56$; $R^2 = 0.931$
Central	$RF = 0.0002 \exp(2.658 w)$; $R^2 = 0.808$
South	$RF = 7 \times 10^{-10} w^{24.154}$; $R^2 = 0.843$

The model was tested with independent data, which had never been used in the modeling by using the same data from 29 stations across four regions of Thailand in

2025 of the same stations to verify the accuracy of the model (show as Figure 3). It was found that, the monthly average rainfall from the model agreement in distributions and trends with the measured values, the data are not significantly different at the confidence level 0.05. The RMSE was 38.693 mm and the R^2 was 0.879 with the relationship as shown in the equation.

$$RF = 0.8667(RF_M) + 9.9098 \quad (5)$$

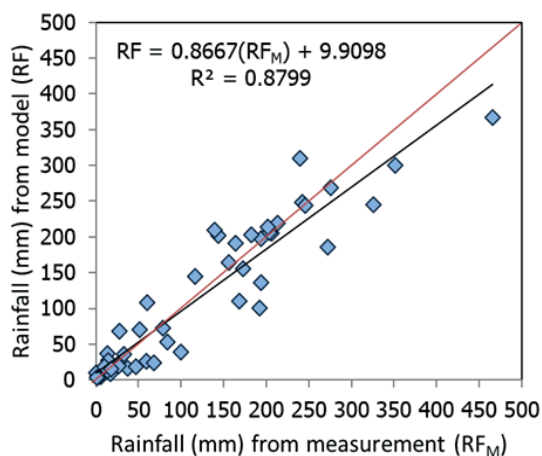


Figure 3 The average monthly rainfall from the model is compared to the measured rainfall in each region in 2025.

4. Conclusions

In this paper, the rainfall is estimated from the amount of water vapor in the atmosphere using mathematical models. It was found that the rainfall is related to the amount of water vapor in the atmosphere, which can estimate the rainfall from water vapor data. The mathematical model for estimating rainfall in Thailand is divided into 4 regions. Each region has a relationship between rainfall and the amount of water vapor in the atmosphere. The results of the study were as follows:

- 1) Northern region has a power relationship, the correlation coefficient equal to 0.871.
- 2) Northeastern region had a polynomial relationship, the correlation coefficient equal to 0.931.
- 3) Central region has an exponential relationship, the correlation coefficient equal to 0.808.
- 4) Southern region has a power relationship, the correlation coefficient equal to 0.843.

The rainfall model was compared with the measured rainfall. It was found that the rainfall were consistent and very similar, with a root mean square error of 38.693 mm. There were not significantly different at the confidence level of 0.05, and the R^2 was 0.879.

5. Acknowledgement

The researchers would like to thank Rajamangala University of Technology Isan for supporting the research. The Meteorological Department for providing valuable information on the research was also acknowledged.

6. References

[1] Wang, R., Fu, Y., Xian, T., Chen, F., Yuan, R., Li, R., and Liu, G. (2017). Evaluation of Atmospheric Precipitable Water Characteristics and Trends in Mainland China from 1995 to 2012. *Journal of Climate*, vol. 30, pp. 8673–8688.

[2] Xian, T., Su, K., Zhang, J., Hu, H., and Wang, H. (2025). Precipitable Water Vapor Retrieval Based on GNSS Data and Its Application in Extreme Rainfall. *Remote Sensing*, vol. 17, pp. 1-16.

[3] Kelsey, V., Riley, S., and Minschwaner, K. (2022). Atmospheric precipitable water vapor and its correlation with clear-sky infrared temperature observations, *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 15, pp. 1563–1576.

[4] Phokate, S. and Atyotha, V. (2018). Determination of the Amount of Water Vapor in the Troposphere over Thailand using Surface Data. *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 8, pp. 364-372.

[5] Zhang, Y., Xu, J., Yang, N. and Lan, P. (2018). Variability and Trends in Global Precipitable Water Vapor Retrieved from COSMIC Radio Occultation and Radiosonde Observations. *Atmosphere*, vol. 9(5), pp. 1-14.

[6] Praveena, R., Ganesh Babu, T.R., Birunda, M., Sudha, G., Sukumar, P. and Gnanasoundharam, J., (2023). Prediction of Rainfall Analysis Using Logistic Regression and Support Vector Machine. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2466, pp. 1-9.

ผลการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ที่มีต่อความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมของ นักศึกษาระดับปริญญาตรี

Effects of Internet of Things (IoT)-Based Learning on Undergraduate Students' Innovation Design Ability

ธนารักษ์ สารเถื่อนแก้ว *

ภาควิชาเทคโนโลยีการศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง บางกะปิ กรุงเทพฯ 10240

*Corresponding Author: Thanarak.s@ru.ac.th

Received 13 March 2026; Received in revised form 16 June 2026; Accepted 20 June 2026

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เปรียบเทียบความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมของนักศึกษา ก่อนและหลังการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) และ 2) ศึกษาความพึงพอใจของนักศึกษาที่มีต่อการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยีการศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2568 จำนวน 30 คน ได้มาโดยการเลือกแบบอาสาสมัคร การวิจัยใช้แบบแผนการวิจัยก่อนทดลอง (Pre-experimental Design) แบบกลุ่มเดียววัดก่อนและหลังการทดลอง (One-Group Pretest-Posttest Design) เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย 1) แผนการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง จำนวน 8 คาบ 2) แบบทดสอบวัดความสามารถในการออกแบบนวัตกรรม เป็นข้อสอบอัตนัย 1 ข้อ คะแนนเต็ม 100 คะแนน และ 3) แบบสอบถามความพึงพอใจของผู้เรียน สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ t-test แบบ Dependent Sample ผลการวิจัยพบว่า 1) ความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมของนักศึกษาหลังเรียน ($M = 82.63$, $SD = 6.91$) สูงวก่อก่อนเรียน ($M = 54.20$, $SD = 8.75$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($t(29) = 15.87$, $p < 0.001$) และมีขนาดอิทธิพลสูงมาก (Cohen's $d = 2.90$) และ 2) นักศึกษามีความพึงพอใจต่อการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($M = 4.64$, $SD = 0.51$) ผลการวิจัยสะท้อนให้เห็นว่าการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสามารถส่งเสริมความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมของนักศึกษาระดับอุดมศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, การออกแบบนวัตกรรม, การคิดเชิงออกแบบ

Abstract

The purposes of this research were to: 1) compare undergraduate students' innovation design ability before and after learning through Internet of Things (IoT)-based learning management, and 2) investigate students' satisfaction toward IoT-based learning management. The sample consisted of 30 undergraduate students Semester 1, academic year 2025 from the Department of Educational Technology, Faculty of Education, Ramkhamhaeng University, selected through volunteer sampling. The study employed a pre-experimental research design using a one-group pretest-posttest design. The research instruments consisted of: 1) eight IoT-



based learning management plans, 2) an innovation design ability test in the form of one essay question with a total score of 100 points, and 3) a student satisfaction questionnaire. Data were analyzed using mean, standard deviation, and paired-samples t-test. The results revealed that: 1) students' innovation design ability after the learning intervention ($M = 82.63$, $SD = 6.91$) was significantly higher than before the intervention ($M = 54.20$, $SD = 8.75$), $t(29) = 15.87$, $p < 0.001$, with a very large effect size (Cohen's $d = 2.90$); and 2) students' overall satisfaction toward IoT-based learning management was at the highest level ($M = 4.64$, $SD = 0.51$). The findings indicate that IoT-based learning management effectively enhances undergraduate students' innovation design ability in higher education.

Keywords: Internet of Things (IoT), Innovation Design, Design Thinking

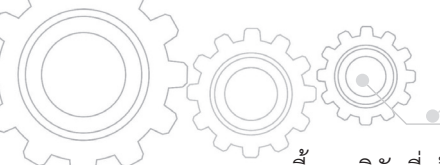
บทนำ

ในศตวรรษที่ 21 การเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีดิจิทัลส่งผลให้ระบบการศึกษาจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนจากการถ่ายทอดความรู้ไปสู่การจัดการเรียนรู้ที่ส่งเสริมให้ผู้เรียนสามารถคิด วิเคราะห์ ออกแบบ แก้ปัญหา และสร้างนวัตกรรมได้อย่างเป็นรูปธรรม โดยเฉพาะในระดับอุดมศึกษา ผู้เรียนจำเป็นต้องมีทักษะด้านเทคโนโลยี การคิดเชิงระบบ การคิดสร้างสรรค์ และการออกแบบนวัตกรรม เพื่อรองรับบริบทของเศรษฐกิจดิจิทัลและสังคมฐานนวัตกรรม เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง หรือ Internet of Things (IoT) เป็นเทคโนโลยีที่เชื่อมโยงอุปกรณ์ เช่น เซอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ระบบเครือข่าย และระบบคลาวด์เข้าด้วยกัน ทำให้อุปกรณ์สามารถเก็บรวบรวม ส่งผ่าน วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูลได้แบบเรียลไทม์ [1] จึงมีศักยภาพสูงในการนำมาใช้เป็นฐานของการเรียนรู้เชิงปฏิบัติและการพัฒนานวัตกรรม

ในบริบทการศึกษา IoT มิได้เป็นเพียงเครื่องมือดิจิทัลสำหรับอำนวยความสะดวกในการเรียนรู้เท่านั้น แต่ยังเป็นสื่อกลางที่ช่วยให้ผู้เรียนได้เรียนรู้จากสถานการณ์จริง ผ่านการสังเกตปัญหา การเก็บข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การออกแบบระบบ การสร้างต้นแบบ และการทดสอบการทำงานของชิ้นงาน กระบวนการดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดการเรียนรู้เชิงสร้างสรรค์ การเรียนรู้โดยใช้โครงงานเป็นฐาน และกระบวนการคิดเชิงออกแบบ ซึ่งเน้นให้ผู้เรียน

เข้าใจปัญหา กำหนดปัญหา สร้างแนวคิด พัฒนาต้นแบบ และปรับปรุงผลงานจากผลการทดสอบ [2] ดังนั้น การจัดการเรียนรู้โดยใช้ IoT จึงมีความเหมาะสมต่อการพัฒนาความสามารถในการออกแบบนวัตกรรม เพราะผู้เรียนได้ใช้เทคโนโลยีเป็นเครื่องมือในการแปลงปัญหาให้เป็นแนวคิด ออกแบบแนวทางแก้ปัญหา และสร้างต้นแบบที่สามารถใช้งานได้จริง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่างานวิจัยด้าน IoT ทางการศึกษาในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและครอบคลุมหลายมิติ เช่น การออกแบบรูปแบบการเรียนรู้โดยใช้ IoT และ Cloud Computing เพื่อสนับสนุนการเรียนรู้ที่มีความหมายของนักศึกษาระดับอุดมศึกษา ซึ่งพบว่ารูปแบบที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมในระดับมากที่สุด และประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่ Smart Teaching, Smart Classroom และ Smart Learning [3] งานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมและปัญหาการใช้อินเทอร์เน็ตในสถานศึกษาในยุค IoT พบว่านักศึกษามีพฤติกรรมการใช้อินเทอร์เน็ตในระดับสูง แต่ยังมีปัญหาด้านอุปกรณ์และระบบเครือข่ายที่ไม่สามารถรองรับการใช้งานได้ครอบคลุม [4] ขณะที่งานวิจัยด้านการบริหารสถานศึกษาพบว่าปัจจัยเชิงสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับการยอมรับและการใช้ IoT ในสถานศึกษามีหลายองค์ประกอบ เช่น ทักษะการบริหาร การรับรู้ความสามารถของตนเอง พฤติกรรมตามแผน และการยอมรับเทคโนโลยี [5]



นอกจากนี้ งานวิจัยที่เน้นการใช้ IoT เพื่อสร้างหรือพัฒนาชิ้นงานนวัตกรรมพบว่า หลักสูตรฝึกอบรมเรื่องการประยุกต์ใช้แพลตฟอร์ม IoT เพื่อสร้างนวัตกรรมดิจิทัลของผู้เรียนมีองค์ประกอบของหลักสูตรที่เหมาะสม และผู้เรียนมีความพึงพอใจต่อหลักสูตรในระดับมากที่สุด [6] งานวิจัยการพัฒนากิจกรรมหุ่นยนต์ IoT ตามแนวทางสะเต็มศึกษาพบว่าการผสาน IoT กับกิจกรรมเชิงวิศวกรรมช่วยส่งเสริมทักษะกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรมของนักเรียน โดยเฉพาะการระบุปัญหา การรวบรวมข้อมูล และการพัฒนาหุ่นยนต์อย่างเป็นระบบ แต่ยังพบข้อจำกัดด้านการวางแผน การจัดการเวลา การทดสอบซ้ำ และการนำเสนอผลงาน [7] งานวิจัยการจัดการเรียนการสอนวิทยาการคำนวณโดยใช้โครงงานเป็นฐานในเทคโนโลยี IoT พบว่าผู้เรียนมีพฤติกรรมความเป็นนวัตกรรมหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียน และรูปแบบที่พัฒนาขึ้นมีคุณภาพผ่านเกณฑ์ที่กำหนด [8] ส่วนงานวิจัยด้านการพัฒนาต้นแบบระบบถังขยะ IoT และระบบประเมินความพึงพอใจด้วย IoT แสดงให้เห็นว่า IoT สามารถนำไปใช้สร้างระบบต้นแบบที่เก็บข้อมูล แสดงผล และสนับสนุนการตัดสินใจได้จริง [9-10]

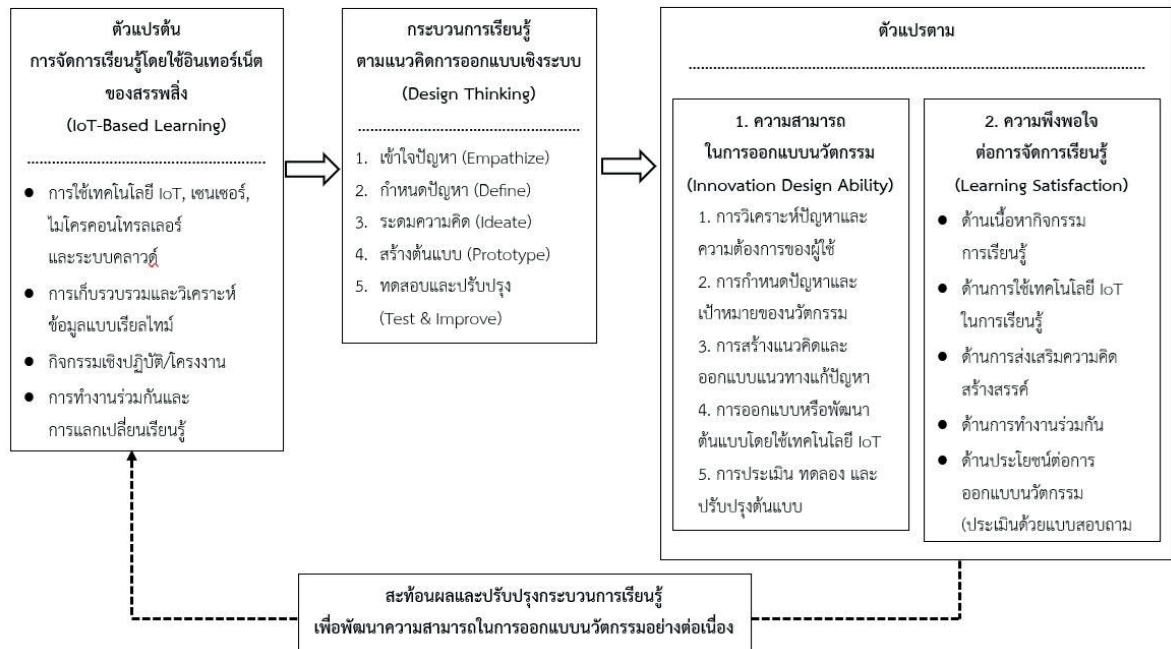
อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณางานวิจัยดังกล่าวในเชิงช่องว่างการวิจัย พบว่า งานวิจัยจำนวนมากมุ่งศึกษาการพัฒนาแบบการเรียนรู้ ความเหมาะสมของหลักสูตร การใช้ IoT เพื่อบริหารจัดการหรือสร้างระบบต้นแบบเฉพาะด้าน ตลอดจนการพัฒนาความเป็นนวัตกรรมหรือทักษะกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรมในระดับโรงเรียน แต่ยังมียงานวิจัยจำนวนน้อยที่ศึกษาผลของการจัดการเรียนรู้โดยใช้ IoT ที่มีต่อ “ความสามารถในการออกแบบนวัตกรรม” ของนักศึกษาระดับปริญญาตรีโดยตรง โดยเฉพาะการวัดผลก่อนและหลังเรียนจากภาระงานการออกแบบนวัตกรรมที่ครอบคลุมองค์ประกอบของกระบวนการคิดเชิงออกแบบ ช่องว่างดังกล่าวชี้ให้เห็นความจำเป็นในการวิจัยที่เชื่อมโยง IoT ในฐานะเทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงปฏิบัติกับกระบวนการออกแบบนวัตกรรมอย่างเป็นระบบ และประเมินผลลัพธ์ของผู้เรียนทั้ง

ด้านความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมและความพึงพอใจต่อการเรียนรู้

ในการวิจัยครั้งนี้ ความสามารถในการออกแบบนวัตกรรม หมายถึง ความสามารถของนักศึกษาในการประยุกต์ใช้ความรู้ เทคโนโลยี IoT และกระบวนการคิดเชิงออกแบบ (Design Thinking) เพื่อวิเคราะห์ปัญหา สร้างแนวคิด พัฒนาต้นแบบ และปรับปรุงนวัตกรรมที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยประเมินจาก 5 องค์ประกอบ ได้แก่ (1) การวิเคราะห์ปัญหาและความต้องการของผู้ใช้ (Empathize) (2) การกำหนดปัญหาและเป้าหมายของนวัตกรรม (Define) (3) การสร้างแนวคิดและออกแบบแนวทางแก้ปัญหา (Ideate) (4) การออกแบบหรือพัฒนาต้นแบบโดยใช้เทคโนโลยี IoT (Prototype) และ (5) การประเมินทดลอง และปรับปรุงต้นแบบ (Test) ซึ่งสังเคราะห์จากแนวคิด Design Thinking ของ Plattner, Meinel และ Leifer [11-13] นิยามดังกล่าวใช้เป็นฐานในการพัฒนาเครื่องมือวัดความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมให้สอดคล้องกับตัวแปรหลักของการวิจัย

กรอบแนวคิดการวิจัยครั้งนี้ ตั้งอยู่บนแนวคิดว่าการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเป็นตัวแปรต้นที่เปิดโอกาสให้นักศึกษาได้เรียนรู้จากการลงมือปฏิบัติจริงผ่านอุปกรณ์ IoT เซนเซอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ และระบบคลาวด์ โดยจัดกิจกรรมตามกระบวนการคิดเชิงออกแบบ ได้แก่ การเข้าใจปัญหา การกำหนดปัญหา การระดมความคิด การสร้างต้นแบบ และการทดสอบ (รูปที่ 1) ผลจากกระบวนการดังกล่าวคาดว่าจะส่งผลต่อความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมของนักศึกษาในด้านการวิเคราะห์ปัญหา การกำหนดแนวคิด การออกแบบต้นแบบ และการปรับปรุงผลงาน นอกจากนี้ ประสพการณ์การเรียนรู้ที่เน้นการลงมือปฏิบัติ การใช้เทคโนโลยีจริง และการสร้างชิ้นงานที่มีความหมายต่อผู้เรียน ย่อมส่งผลต่อความพึงพอใจของนักศึกษาที่มีต่อการจัดการเรียนรู้ด้วย

กรอบแนวคิดการวิจัย (Conceptual Framework)



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

ดังนั้น การวิจัยเรื่องผลการจัดการเรียนรู้โดยใช้ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่มีต่อความสามารถในการ ออกแบบนวัตกรรมของนักศึกษาระดับปริญญาตรี จึง มีความสำคัญทั้งในเชิงวิชาการและเชิงปฏิบัติ กล่าวคือ ในเชิงวิชาการ งานวิจัยนี้ช่วยเติมเต็ม ช่องว่างขององค์ความรู้เกี่ยวกับการใช้ IoT เพื่อพัฒนา ความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมของผู้เรียน ระดับอุดมศึกษา ส่วนในเชิงปฏิบัติ ผลการวิจัย สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบกิจกรรมการ เรียนรู้ที่บูรณาการเทคโนโลยี IoT กับกระบวนการคิด เชิงออกแบบ เพื่อพัฒนาผู้เรียนให้มีทักษะด้านการ สร้างนวัตกรรมที่สอดคล้องกับความต้องการของสังคม ดิจิทัลและการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการ ออกแบบนวัตกรรมของนักศึกษาก่อนและหลังการ จัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง
2. เพื่อศึกษาความพึงพอใจของนักศึกษาที่มีต่อ การจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

สมมติฐานการวิจัย นักศึกษาที่ได้รับการจัดการ เรียนรู้โดยใช้ IoT มีความสามารถในการออกแบบ

นวัตกรรมหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียน อย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับ 0.05

ขอบเขตการวิจัย การวิจัยเรื่องผลการจัดการ เรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ที่มีต่อ ความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมของนักศึกษาระดับปริญญาตรี กำหนดขอบเขตการวิจัย ดังนี้

1. ขอบเขตด้านเนื้อหา

การวิจัยครั้งนี้มุ่งศึกษาผลของการจัดการเรียนรู้ โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ที่มีต่อความสามารถในการออกแบบ นวัตกรรมของนักศึกษาระดับปริญญาตรี โดยการ จัดกิจกรรมการเรียนรู้บูรณาการเทคโนโลยี IoT ร่วมกับ กระบวนการคิดเชิงออกแบบ (Design Thinking) ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ได้แก่ การทำความเข้าใจ ปัญหาและความต้องการของผู้ใช้ (Empathize) การ กำหนดปัญหาและเป้าหมายของนวัตกรรม (Define) การสร้างแนวคิดและออกแบบแนวทางแก้ปัญหา (Ideate) การพัฒนาต้นแบบโดยใช้เทคโนโลยี IoT (Prototype) การทดสอบ ประเมินผล และปรับปรุง ต้นแบบ (Test) โดยศึกษาตัวแปรตาม 2 ด้าน ได้แก่

- 1) ความสามารถในการออกแบบนวัตกรรม ซึ่ง

ประกอบด้วย การวิเคราะห์ปัญหาและความต้องการของผู้ใช้ การกำหนดปัญหาและเป้าหมายของนวัตกรรม การสร้างแนวคิดและออกแบบแนวทางแก้ปัญหา การออกแบบหรือพัฒนาต้นแบบโดยใช้เทคโนโลยี IoT การประเมิน ทดลอง และปรับปรุงต้นแบบ

2) ความพึงพอใจของนักศึกษาที่มีต่อการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ นักศึกษาระดับปริญญาตรี คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยีการศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2568 จำนวน 30 คน ได้มาโดยการเลือกแบบอาสาสมัคร (Volunteer Sampling) การเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบอาสาสมัครมีความเหมาะสมกับลักษณะของกิจกรรมการเรียนรู้ที่ต้องอาศัยการเข้าร่วมอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการทดลอง การใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ IoT รวมทั้งการพัฒนาต้นแบบนวัตกรรมที่ต้องใช้เวลาในการฝึกปฏิบัติ ผู้วิจัยจึงเปิดโอกาสให้นักศึกษาที่มีความสนใจและสามารถเข้าร่วมกิจกรรมได้ครบทุกคาบเรียนเข้าร่วมการวิจัย เพื่อให้การดำเนินการทดลองเป็นไปอย่างต่อเนื่องและลดปัญหาการขาดหายของข้อมูลระหว่างการทดลอง

ขอบเขตด้านพื้นที่ การวิจัยดำเนินการ ณ ภาควิชาเทคโนโลยีการศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

ขอบเขตด้านเวลา การวิจัยดำเนินการในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2568 โดยใช้แผนการจัดการเรียนรู้จำนวน 8 คาบเรียน และดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลระหว่างเดือนพฤษภาคม 2568 - กันยายน 2568

วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยก่อนทดลอง (Pre-experimental Research) โดยใช้แบบแผนการวิจัยแบบกลุ่มเดียววัดก่อนและหลังการทดลอง (One-Group Pretest-Posttest Design)

การพิจารณาด้านจริยธรรมการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ ผู้เข้าร่วมการวิจัยทุกคนได้รับการชี้แจงวัตถุประสงค์ ขั้นตอนการวิจัย สิทธิในการถอนตัวจากการวิจัยได้ทุกเมื่อโดยไม่ส่งผลกระทบต่อผลการเรียน และลงนามในหนังสือแสดงความยินยอมเข้าร่วมการวิจัย (Informed Consent) ก่อนการเก็บรวบรวมข้อมูล

1. การพัฒนาและตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือวิจัย

1.1 แผนการจัดการเรียนรู้

ผู้วิจัยได้พัฒนาแผนการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ร่วมกับกระบวนการคิดเชิงออกแบบ (Design Thinking) จำนวน 8 คาบ คาบละ 2 ชั่วโมง มีขั้นตอนการจัดการเรียนรู้ ดังนี้

คาบที่ 1 - ขั้นที่ 1 Empathize : การวิเคราะห์ปัญหาและความต้องการของผู้ใช้ ผู้เรียนศึกษาสถานการณ์ปัญหาจริง สำรวจความต้องการของผู้ใช้ และเก็บรวบรวมข้อมูลจากบริบทจริง เพื่อนำไปสู่การกำหนดประเด็นปัญหาที่ต้องการแก้ไข

คาบที่ 2 - ขั้นที่ 2 Define : การกำหนดปัญหาและเป้าหมายของนวัตกรรม ผู้เรียนวิเคราะห์ข้อมูลที่รวบรวมได้ สังเคราะห์ประเด็นปัญหา กำหนดขอบเขตของปัญหา และกำหนดเป้าหมายของนวัตกรรมที่ต้องการพัฒนา

คาบที่ 3 และ 4 - ขั้นที่ 3 Ideate : การสร้างแนวคิดและออกแบบแนวทางแก้ปัญหา ผู้เรียนศึกษาความรู้พื้นฐานด้านเทคโนโลยี IoT ได้แก่ เซนเซอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ระบบเครือข่าย และแพลตฟอร์มคลาวด์ จากนั้นระดมความคิดเพื่อสร้างแนวทางแก้ปัญหาและออกแบบนวัตกรรม

คาบที่ 5, 6 และ 7 - ขั้นที่ 4 Prototype : การออกแบบและพัฒนาต้นแบบนวัตกรรม IoT ผู้เรียนออกแบบโครงสร้างระบบ พัฒนาต้นแบบนวัตกรรมโดยใช้อุปกรณ์ IoT เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ และทดสอบการทำงานเบื้องต้นของระบบ

คาบที่ 8 - ขั้นที่ 5 Test : การประเมิน ทดลอง และปรับปรุงต้นแบบ ผู้เรียนทดลองใช้งานต้นแบบ ประเมินประสิทธิภาพ รับข้อเสนอแนะจากผู้ใช้หรือ

เพื่อนร่วมชั้น ปรับปรุงต้นแบบ และนำเสนอผลงาน พร้อมสะท้อนผลการเรียนรู้

จากนั้นนำแผนการจัดการเรียนรู้ไปให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 คน ประกอบด้วย ผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยี IoT ระดับปริญญาเอกและมีประสบการณ์ด้าน IoT ไม่น้อยกว่า 5 ปี ผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีการศึกษา ระดับปริญญาเอกและมีประสบการณ์สอนระดับอุดมศึกษาไม่น้อยกว่า 5 ปี และผู้เชี่ยวชาญด้านการวัดและประเมินผลทางการศึกษา ระดับปริญญาเอกและมีผลงานวิจัยด้านการพัฒนาเครื่องมือวิจัย ผู้เชี่ยวชาญประเมินความสอดคล้องระหว่างวัตถุประสงค์ เนื้อหา กิจกรรมการเรียนรู้ และการวัดผล โดยใช้ดัชนีความสอดคล้อง (IOC) พบว่ามีค่า IOC อยู่ระหว่าง 0.67–1.00 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จากนั้นผู้วิจัยได้นำข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญมาปรับปรุงแก้ไขแผนการจัดการเรียนรู้ก่อนนำไปทดลองใช้กับกลุ่มตัวอย่าง

1.2 แบบประเมินความสามารถในการออกแบบนวัตกรรม

ผู้วิจัยพัฒนาเครื่องมือวัดความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมในรูปแบบภาระงานเชิงสถานการณ์ (Scenario-Based Innovation Design Performance Task) โดยกำหนดสถานการณ์ปัญหาที่ต้องการการแก้ไขด้วยเทคโนโลยี IoT และให้ผู้เรียนดำเนินการตามกระบวนการคิดเชิงออกแบบ (Design Thinking) ทั้งนี้การประเมินใช้เกณฑ์การให้คะแนนแบบรูบริกเชิงวิเคราะห์ (Analytic Rubric) คะแนนเต็ม 100 คะแนน เกณฑ์การประเมินประกอบด้วย 5 องค์ประกอบ ดังนี้ การวิเคราะห์ปัญหาและความต้องการของผู้ใช้ (20 คะแนน) การกำหนดปัญหาและเป้าหมายของนวัตกรรม (20 คะแนน) การสร้างแนวคิดและออกแบบแนวทางแก้ปัญหา (20 คะแนน) การออกแบบหรือพัฒนาต้นแบบโดยใช้เทคโนโลยี IoT (20 คะแนน) การประเมิน ทดลอง และปรับปรุงต้นแบบ (20 คะแนน) แต่ละองค์ประกอบกำหนดระดับคุณภาพ 5 ระดับ (1–5) ตามรายละเอียดของเกณฑ์การประเมิน

ผู้วิจัยนำภาระงานเชิงสถานการณ์สำหรับการออกแบบนวัตกรรม (Scenario-Based Innovation Design Performance Task) พร้อมเกณฑ์การประเมินแบบรูบริกเชิงวิเคราะห์ (Analytic Rubric) ไปตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 คนเดิม พิจารณาความสอดคล้องระหว่างองค์ประกอบของความสามารถในการออกแบบนวัตกรรม วัตถุประสงค์การวิจัย สถานการณ์ที่กำหนด และเกณฑ์การประเมิน โดยใช้ดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (IOC) ผลการประเมินพบว่าค่า IOC ของแต่ละองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 0.67–1.00 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์และสามารถใช้วัดความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมได้ตามที่กำหนด นอกจากนี้ผู้เชี่ยวชาญได้ให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับความครอบคลุมขององค์ประกอบทั้ง 5 ด้าน ได้แก่ การวิเคราะห์ปัญหา การกำหนดปัญหา การสร้างแนวคิด การพัฒนาต้นแบบ และการประเมินปรับปรุงต้นแบบ ซึ่งผู้วิจัยได้นำข้อเสนอแนะดังกล่าวมาปรับปรุงสถานการณ์และเกณฑ์การให้คะแนนก่อนนำไปทดลองใช้

จากนั้นนำเครื่องมือไปทดลองใช้กับนักเรียนระดับปริญญาตรีที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่างจริง จำนวน 30 คน ซึ่งไม่ใช่กลุ่มตัวอย่างในการวิจัยครั้งนี้ เพื่อปรับปรุงความชัดเจนของสถานการณ์ เกณฑ์การให้คะแนน และความเหมาะสมของภาระงาน ผู้วิจัยตรวจสอบความเชื่อมั่นระหว่างผู้ประเมิน (Inter-rater Reliability) โดยให้ผู้ประเมินอิสระจำนวน 3 คน ประเมินผลงานของผู้เรียนตามเกณฑ์การประเมินแบบรูบริกเชิงวิเคราะห์ (Analytic Rubric) และวิเคราะห์ความสอดคล้องของคะแนนโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายในชั้น (Intraclass Correlation Coefficient: ICC) ผลการวิเคราะห์พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.89 แสดงว่าเครื่องมือมีความเชื่อมั่นระหว่างผู้ประเมินอยู่ในระดับสูง

นอกจากนี้ เพื่อป้องกันผลกระทบจากการใช้เครื่องมือซ้ำ (Testing Effect) ผู้วิจัยได้พัฒนาภาระ

งานเชิงสถานการณ์ก่อนเรียนและหลังเรียนในลักษณะคู่ขนาน (Parallel Performance Tasks) โดยทั้งสองภาระงานวัดองค์ประกอบเดียวกันของความสามารถในการออกแบบนวัตกรรม ได้แก่ การวิเคราะห์ปัญหา การกำหนดปัญหา การสร้างแนวคิด การพัฒนาต้นแบบ และการประเมินปรับปรุงต้นแบบ แต่ใช้สถานการณ์ปัญหาคนละบริบท เพื่อให้ผู้เรียนไม่สามารถใช้คำตอบเดิมในการทำแบบประเมินหลังเรียนได้โดยตรง

1.3 แบบวัดความพึงพอใจของผู้เรียน

ผู้วิจัยสร้างแบบวัดความพึงพอใจของผู้เรียนต่อการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเป็นแบบมาตรประมาณค่า 5 ระดับ (Likert Scale) จำนวน 15 ข้อ แบ่งเป็น 5 ด้าน ได้แก่ ด้านเนื้อหาและกิจกรรมการเรียนรู้ จำนวน 3 ข้อ ด้านการใช้เทคโนโลยี IoT ในการเรียนรู้ จำนวน 3 ข้อ ด้านการส่งเสริมความคิดสร้างสรรค์ จำนวน 3 ข้อ ด้านการทำงานร่วมกัน จำนวน 3 ข้อ และด้านด้านประโยชน์ต่อการออกแบบนวัตกรรม จำนวน 3 ข้อ ผู้วิจัยได้นำแบบวัดความพึงพอใจไปให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 คน ตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา โดยใช้ดัชนีความสอดคล้อง (IOC) ผลการวิเคราะห์พบว่าค่า IOC อยู่ระหว่าง 0.67–1.00 จากนั้นนำแบบสอบถามไปทดลองใช้กับนักศึกษาที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 คน เพื่อตรวจสอบความเชื่อมั่นของเครื่องมือ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของ ครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient) ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.93 แสดงว่าแบบวัดความพึงพอใจมีความเชื่อมั่นในระดับสูงและสามารถนำไปใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลในการวิจัยได้อย่างเหมาะสม

2. การทดลองและเก็บข้อมูล

ผู้วิจัยนำแบบทดสอบก่อนเรียน (Pretest) ไปทดสอบกับกลุ่มตัวอย่าง จากนั้น จัดกิจกรรมตามแผนการจัดการเรียนรู้จนครบ 8 แผน หลังจากนั้น ให้กลุ่มตัวอย่างทำแบบทดสอบหลังเรียน (Posttest) และประเมินความพึงพอใจของผู้เรียน

การควบคุมตัวแปรกวน

เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวิจัย ผู้วิจัยได้ดำเนินการควบคุมตัวแปรกวนที่อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมของนักศึกษา ดังนี้

(1) เก็บข้อมูลพื้นฐานของผู้เรียนก่อนการทดลอง ได้แก่ ผลการเรียนรู้เฉลี่ยสะสม (GPA) ประสบการณ์การใช้เทคโนโลยี IoT และระดับทักษะดิจิทัลพื้นฐาน เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์และอภิปรายผลการวิจัย

(2) กำหนดให้ผู้เรียนทุกคนได้รับเนื้อหา กิจกรรมการเรียนรู้ ระยะเวลาเรียน อุปกรณ์การเรียนรู้ และการวัดประเมินผลในรูปแบบเดียวกันตลอดการทดลอง เพื่อลดความแตกต่างที่อาจเกิดจากสภาพแวดล้อมการเรียนรู้

(3) ใช้อุปกรณ์ IoT ชุดเดียวกันและกำหนดกิจกรรมการเรียนรู้ตามแผนการจัดการเรียนรู้เดียวกันสำหรับผู้เรียนทุกคน เพื่อลดผลกระทบจากความแตกต่างของทรัพยากรและเทคโนโลยีที่ใช้ในการเรียนรู้

(4) ผู้สอนเป็นบุคคลเดียวกันตลอดการทดลอง และใช้แนวทางการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ตามที่กำหนดไว้ เพื่อควบคุมความแตกต่างด้านวิธีสอนและปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้สอนกับผู้เรียน

(5) จัดการเรียนรู้ในช่วงเวลาเดียวกันภายใต้สภาพแวดล้อมการเรียนรู้เดียวกัน เพื่อลดผลกระทบจากปัจจัยด้านเวลาและบริบทการเรียนรู้

การควบคุมปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้เรียน

เนื่องจากการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเป็นกิจกรรมที่เน้นการทำงานร่วมกัน ผู้วิจัยจึงดำเนินการควบคุมปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้เรียน ดังนี้

(1) แบ่งกลุ่มผู้เรียนให้มีจำนวนสมาชิกใกล้เคียงกัน โดยคำนึงถึงความหลากหลายของประสบการณ์ และทักษะด้านเทคโนโลยี เพื่อให้แต่ละกลุ่มมีลักษณะใกล้เคียงกันมากที่สุด

(2) กำหนดบทบาทหน้าที่ของสมาชิกในกลุ่มอย่างชัดเจน เช่น ผู้วิเคราะห์ปัญหา ผู้ออกแบบระบบ

ผู้พัฒนาต้นแบบ และผู้นำเสนอผลงาน เพื่อให้ผู้เรียนทุกคนมีส่วนร่วมในการทำกิจกรรม

(3) ใช้กิจกรรมการเรียนรู้และภาระงานเดียวกันสำหรับทุกกลุ่ม เพื่อลดความแตกต่างที่เกิดจากลักษณะงานที่ได้รับ

(4) ผู้สอนติดตามและกำกับการทำงานของแต่ละกลุ่มอย่างต่อเนื่อง เพื่อป้องกันการครอบงำการทำงานของสมาชิกบางคน และส่งเสริมการมีส่วนร่วมอย่างทั่วถึง

(5) กำหนดเกณฑ์การประเมินผลงานและกระบวนการทำงานร่วมกันในรูปแบบเดียวกันทุกกลุ่ม เพื่อให้การประเมินมีความเป็นธรรมและสามารถเปรียบเทียบผลได้

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยวิเคราะห์ความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมก่อนและหลังเรียนโดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เปรียบเทียบคะแนนก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยสถิติ t-test แบบ Dependent Samples วิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้เรียนโดยใช้ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ข้อจำกัดของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ใช้แบบแผน One-Group Pretest-Posttest Design ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อความตรงภายใน ได้แก่ History, Maturation, Testing Effect และ Statistical Regression นอกจากนี้ การเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบ Volunteer Sampling อาจก่อให้เกิด Selection Bias เนื่องจาก

ผู้เข้าร่วมวิจัยอาจมีแรงจูงใจและความสนใจด้านเทคโนโลยีสูงกว่านักศึกษาทั่วไป ดังนั้น การสรุปอ้างอิงผลการวิจัยไปยังนักศึกษาระดับอุดมศึกษาโดยรวมควรกระทำด้วยความระมัดระวัง และควรมีการศึกษาซ้ำโดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างหรือการจัดกลุ่มตัวอย่างที่มีความหลากหลายมากขึ้น

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

1. ผลการเปรียบเทียบความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมของนักศึกษาก่อนและหลังเรียน ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติ t-test แบบ Dependent Sample เพื่อเปรียบเทียบคะแนนก่อนเรียนและหลังเรียนของนักศึกษาที่ได้รับการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ดังตารางที่ 1 จากตารางที่ 1 พบว่า นักศึกษามีคะแนนความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมหลังเรียน ($M = 82.63$, $SD = 6.92$) สูงวก่อนเรียน ($M = 54.20$, $SD = 8.75$) อย่างชัดเจน โดยมีผลต่างค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.43 คะแนน

ผลการทดสอบด้วยสถิติ Dependent Samples t-test พบว่า คะแนนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($t(29) = 15.87$, $p < 0.001$)

นอกจากนี้ ผลต่างค่าเฉลี่ยมีช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อยู่ระหว่าง 24.77 ถึง 32.09 คะแนน แสดงให้เห็นว่าการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งส่งผลให้คะแนนความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีความแม่นยำในการประมาณค่าอยู่ในระดับดี

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบคะแนนก่อนเรียนและหลังเรียน

การทดสอบ	N	M	SD	Mean Difference	95% CI of Mean Difference	t	p	Cohen's d
ก่อนเรียน	30	54.20	8.75	28.43	[24.77, 32.09]	15.87	< 0.001*	2.90
หลังเรียน	30	82.63	6.91					

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

เมื่อพิจารณาขนาดอิทธิพล (Effect Size) พบว่ามีค่า Cohen's d เท่ากับ 2.90 ซึ่งอยู่ในระดับสูงมาก (Very Large Effect Size) ตามเกณฑ์ของ Cohen (1988) สะท้อนให้เห็นว่าการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งมีผลต่อการพัฒนาความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมของนักศึกษาในทางปฏิบัติอย่างเด่นชัด มิใช่เพียงมีนัยสำคัญทางสถิติเท่านั้น

2. ผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้เรียนต่อการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งแสดงดังตารางที่ 2 จากตารางที่ 2 พบว่า นักศึกษามีความพึงพอใจต่อการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($M = 4.64$, $SD = 0.51$)

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้เรียน

รายการประเมิน	Mean	SD	ระดับ
ด้านเนื้อหากิจกรรมการเรียนรู้			
1. เนื้อหาการเรียนรู้มีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การเรียนรู้	4.61	0.55	มากที่สุด
2. กิจกรรมการเรียนรู้ช่วยให้เข้าใจเนื้อหาได้ง่ายขึ้น	4.65	0.50	มากที่สุด
3. กิจกรรมการเรียนรู้ส่งเสริมการมีส่วนร่วมของผู้เรียน	4.63	0.49	มากที่สุด
รวม	4.63	0.51	มากที่สุด
ด้านการใช้เทคโนโลยี IoT ในการเรียนรู้			
4. อุปกรณ์และเทคโนโลยี IoT มีความเหมาะสมกับกิจกรรมการเรียนรู้	4.72	0.44	มากที่สุด
5. การใช้ IoT ช่วยให้เกิดความเข้าใจในการออกแบบนวัตกรรม	4.69	0.47	มากที่สุด
6. การใช้งานอุปกรณ์ IoT มีความสะดวกและไม่ซับซ้อน	4.69	0.48	มากที่สุด
รวม	4.70	0.46	มากที่สุด
ด้านการส่งเสริมความคิดสร้างสรรค์			
7. กิจกรรมการเรียนรู้เปิดโอกาสให้คิดค้นแนวทางใหม่ในการแก้ปัญหา	4.56	0.55	มากที่สุด
8. การเรียนรู้ช่วยพัฒนาความคิดสร้างสรรค์ในการออกแบบนวัตกรรม	4.61	0.52	มากที่สุด
9. การเรียนรู้ช่วยให้สามารถพัฒนาแนวคิดสู่ต้นแบบนวัตกรรมได้	4.57	0.54	มากที่สุด
รวม	4.58	0.54	มากที่สุด
ด้านการทำงานร่วมกัน			
10. กิจกรรมส่งเสริมการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นระหว่างผู้เรียน	4.57	0.57	มากที่สุด
11. ผู้เรียนสามารถทำงานร่วมกับผู้อื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ	4.53	0.60	มากที่สุด
12. การทำงานกลุ่มช่วยให้เกิดการเรียนรู้ร่วมกัน	4.55	0.57	มากที่สุด
รวม	4.55	0.58	มากที่สุด
ด้านประโยชน์ต่อการออกแบบนวัตกรรม			
13. ความรู้ที่ได้รับสามารถนำไปใช้ในการออกแบบนวัตกรรมได้จริง	4.74	0.46	มากที่สุด
14. การเรียนรู้ช่วยเพิ่มความมั่นใจในการพัฒนานวัตกรรม	4.70	0.49	มากที่สุด
15. การเรียนรู้ช่วยพัฒนาทักษะที่จำเป็นต่อการสร้างนวัตกรรม	4.72	0.48	มากที่สุด
รวม	4.72	0.48	มากที่สุด
รวมทั้งหมด	4.64	0.51	มากที่สุด

หมายเหตุ: การแปลผลค่าเฉลี่ยใช้เกณฑ์ 5 ระดับ โดยค่าเฉลี่ย 4.51–5.00 หมายถึง ระดับมากที่สุด

เมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่า ทุกด้านมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด โดยด้านที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด ได้แก่ ด้านประโยชน์ต่อการออกแบบนวัตกรรม ($M = 4.72$, $SD = 0.48$) รองลงมา คือ ด้านการใช้เทคโนโลยี IoT ในการเรียนรู้ ($M = 4.70$, $SD = 0.46$) ด้านเนื้อหาและกิจกรรมการเรียนรู้ ($M = 4.63$, $SD = 0.51$) ด้านการส่งเสริมความคิดสร้างสรรค์ ($M = 4.58$, $SD = 0.54$) และด้านการทำงานร่วมกัน ($M = 4.55$, $SD = 0.58$) ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อ พบว่า ข้อที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด ได้แก่ “ความรู้ที่ได้รับสามารถนำไปใช้ในการออกแบบนวัตกรรมได้จริง” ($M = 4.74$, $SD = 0.46$) รองลงมา คือ “อุปกรณ์และเทคโนโลยี IoT มีความเหมาะสมกับกิจกรรมการเรียนรู้” ($M = 4.72$, $SD = 0.44$) และ “การเรียนรู้ช่วยพัฒนาทักษะที่จำเป็นต่อการสร้างนวัตกรรม” ($M = 4.72$, $SD = 0.48$)

ผลการวิจัยสะท้อนให้เห็นว่า การจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสามารถตอบสนองความต้องการของผู้เรียนได้เป็นอย่างดี ทั้งในด้านเนื้อหา กระบวนการเรียนรู้ การใช้เทคโนโลยี การพัฒนาความคิดสร้างสรรค์ การทำงานร่วมกัน และการประยุกต์ใช้ความรู้เพื่อการออกแบบนวัตกรรม

สรุปผลการวิจัย

นักศึกษามีความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($t(29) = 15.87$, $p < 0.001$) โดยคะแนนเฉลี่ยก่อนเรียนเท่ากับ 54.20 คะแนน ($SD = 8.75$) และหลังเรียนเท่ากับ 82.63 คะแนน ($SD = 6.91$) มีผลต่างค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.43 คะแนน (95% $CI = 24.77-32.09$) และมีขนาดอิทธิพลอยู่ในระดับสูงมาก (Cohen's $d = 2.90$)

นักศึกษามีความพึงพอใจต่อการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($M = 4.64$, $SD = 0.51$) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่า ด้านประโยชน์ต่อการออกแบบนวัตกรรมมีค่าเฉลี่ยสูงสุด ($M = 4.72$, $SD = 0.48$) รองลงมา คือ ด้านการใช้เทคโนโลยี IoT ในการเรียนรู้ ($M = 4.70$, $SD = 0.46$) ด้านเนื้อหาและกิจกรรมการ

เรียนรู้ ($M = 4.63$, $SD = 0.51$) ด้านการส่งเสริมความคิดสร้างสรรค์ ($M = 4.58$, $SD = 0.54$) และด้านการทำงานร่วมกัน ($M = 4.55$, $SD = 0.58$) ตามลำดับ

อภิปรายผล

1. การจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งช่วยพัฒนาความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมของนักศึกษา

ผลการวิจัยพบว่า นักศึกษามีความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีขนาดอิทธิพลอยู่ในระดับสูงมาก (Cohen's $d = 2.90$) แสดงให้เห็นว่าการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสามารถส่งเสริมการพัฒนาความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากกรอบแนวคิด Design Thinking ของ Brown [11] และ Plattner et al. [12] ซึ่งเสนอว่าการสร้างนวัตกรรมเกิดจากกระบวนการที่เริ่มจากการทำความเข้าใจปัญหาและความต้องการของผู้ใช้ (Empathize) การกำหนดปัญหา (Define) การสร้างแนวคิด (Ideate) การพัฒนาต้นแบบ (Prototype) และการทดสอบปรับปรุง (Test) โดยกิจกรรมการเรียนรู้ในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบให้ผู้เรียนได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ผู้เรียนสามารถเชื่อมโยงองค์ความรู้กับการปฏิบัติจริงและพัฒนานวัตกรรมได้เป็นระบบมากขึ้น

นอกจากนี้ เทคโนโลยี IoT มีลักษณะสำคัญที่เปิดโอกาสให้ผู้เรียนได้เรียนรู้จากสถานการณ์จริงผ่านการเก็บข้อมูล การเชื่อมต่ออุปกรณ์ และการสร้างต้นแบบที่สามารถใช้งานได้จริง ทำให้ผู้เรียนเห็นผลลัพธ์ของการออกแบบได้ทันที ส่งผลให้เกิดการเรียนรู้เชิงลึกและการแก้ปัญหาอย่างเป็นรูปธรรม ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด Smart Learning Environment ที่เน้นการเรียนรู้จากประสบการณ์จริงและการมีปฏิสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมการเรียนรู้ [13-14]

ผลการวิจัยยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Samok and Jeerungsuwan [3] ที่พบว่าในการบูรณาการ IoT และ Cloud Computing สามารถสนับสนุนการเรียนรู้ที่มีความหมายในระดับอุดมศึกษาได้ เนื่องจากผู้เรียนสามารถเข้าถึงข้อมูลและทรัพยากรการเรียนรู้ได้อย่างต่อเนื่อง รวมทั้งยังสอดคล้องกับ Paliktzoglou และ Vlachopoulou [15] ที่สรุปจากการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบว่า IoT ช่วยส่งเสริมการเรียนรู้เชิงรุก (Active Learning) การเรียนรู้แบบผู้เรียนเป็นศูนย์กลาง และการพัฒนาทักษะแห่งศตวรรษที่ 21

นอกจากนี้ ผลการวิจัยครั้งนี้ยังสอดคล้องกับ Kaewta et al. [6] ที่พบว่าการใช้แพลตฟอร์ม IoT สามารถพัฒนาศักยภาพของผู้เรียนในการสร้างนวัตกรรมดิจิทัล และสอดคล้องกับ Buachoom [7] ที่พบว่ากิจกรรมหุ่นยนต์ IoT ตามแนวทางสะเต็มศึกษาช่วยส่งเสริมกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรมของผู้เรียน รวมถึงสอดคล้องกับ Sriwana [8] ที่รายงานว่าการจัดการเรียนรู้โดยใช้โครงงานเป็นฐานร่วมกับเทคโนโลยี IoT สามารถพัฒนาความเป็นนวัตกรรมของผู้เรียนได้อย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม ขนาดอิทธิพลที่พบในงานวิจัยครั้งนี้มีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยทางการศึกษาทั่วไป จึงอาจสะท้อนลักษณะเฉพาะของกลุ่มตัวอย่างที่เป็นผู้สมัครใจเข้าร่วมการวิจัย ซึ่งอาจมีแรงจูงใจด้านเทคโนโลยีสูงกว่านักศึกษาทั่วไป รวมทั้งอาจได้รับอิทธิพลจากการใช้แบบแผนการวิจัยแบบกลุ่มเดียววัดก่อนและหลังการทดลองที่ไม่มีกลุ่มควบคุม ดังนั้นควรตีความผลด้วยความระมัดระวัง และควรมีการศึกษาซ้ำโดยใช้การออกแบบการวิจัยที่เข้มแข็งมากขึ้นในอนาคต

2. นักศึกษามีความพึงพอใจต่อการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งอยู่ในระดับมากที่สุด

ผลการวิจัยพบว่า นักศึกษามีความพึงพอใจต่อการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเรียนรู้ด้วย IoT เปิดโอกาสให้ผู้เรียนได้ลงมือปฏิบัติ

จริง มีปฏิสัมพันธ์กับอุปกรณ์จริง และสามารถสร้างผลงานที่เป็นรูปธรรมได้ด้วยตนเอง ทำให้ผู้เรียนเห็นความเชื่อมโยงระหว่างเนื้อหาทางทฤษฎีกับการประยุกต์ใช้ในสถานการณ์จริง ส่งผลให้เกิดแรงจูงใจและความรู้สึกมีคุณค่าในการเรียนรู้

ผลดังกล่าวสอดคล้องกับ Ghashim และ Arshad [1] ที่ระบุว่า IoT ช่วยเปลี่ยนบทบาทของผู้เรียนจากผู้รับสารไปเป็นผู้สร้างองค์ความรู้ผ่านการลงมือปฏิบัติ และสอดคล้องกับ Hsiao et al. [2] ที่พบว่าการใช้เครื่องมือการเรียนรู้ที่พัฒนาบนพื้นฐาน IoT ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้และการมีส่วนร่วมของผู้เรียน

เมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่า ด้านประโยชน์ต่อการออกแบบนวัตกรรมมีค่าเฉลี่ยสูงสุด ($M = 4.72$) อาจเนื่องจากผู้เรียนสามารถนำความรู้และทักษะที่ได้รับไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนาต้นแบบนวัตกรรมได้จริง ผู้เรียนจึงรับรู้ถึงคุณค่าของกิจกรรมการเรียนรู้ในเชิงวิชาชีพและการนำไปใช้ในอนาคต สอดคล้องกับแนวคิด Education 2030 ของ OECD [16] ที่เน้นว่าการศึกษาควรพัฒนาความสามารถในการสร้างคุณค่าใหม่ (Creating New Value) และการแก้ปัญหาในโลกจริง

ในทางตรงกันข้าม ด้านการทำงานร่วมกันมีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุด แม้ยังอยู่ในระดับมากที่สุดก็ตาม ($M = 4.55$) ซึ่งอาจสะท้อนให้เห็นว่า การพัฒนานวัตกรรม IoT จำเป็นต้องอาศัยความรู้ทางเทคนิคและการแบ่งบทบาทการทำงานที่ชัดเจน ผู้เรียนบางส่วนอาจยังขาดประสบการณ์ในการทำงานเป็นทีม หรือมีความแตกต่างด้านความรู้พื้นฐานและทักษะดิจิทัล ส่งผลให้การทำงานร่วมกันมีความท้าทายมากกว่าด้านอื่น ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับข้อค้นพบของ Buachoom [7] ที่รายงานว่าผู้เรียนมักประสบปัญหาในการประสานงาน การวางแผน และการจัดการเวลาระหว่างการพัฒนาชิ้นงาน IoT

นอกจากนี้ ผลการวิจัยครั้งนี้สะท้อนให้เห็นว่าการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งไม่เพียงส่งผลต่อผลสัมฤทธิ์ด้านการออกแบบนวัตกรรมเท่านั้น แต่ยังช่วยสร้างประสบการณ์การเรียนรู้ที่

ผู้เรียนรับรู้ว่ามีคุณค่าและสามารถนำไปใช้ได้จริง ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21 และสอดคล้องกับแนวคิดการเรียนรู้เชิงออกแบบที่มุ่งให้ผู้เรียนเรียนรู้ผ่านการสร้างสรรค์ผลงานและการแก้ปัญหาในบริบทจริง

อย่างไรก็ดี แม้ว่าการวิจัยครั้งนี้จะพบว่าการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งส่งผลเชิงบวกต่อความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมของนักศึกษาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ผลการศึกษาดังกล่าวไม่ได้สอดคล้องกับข้อค้นพบบางส่วนของงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งรายงานว่า การนำ IoT มาใช้ในการศึกษายังเผชิญข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความพร้อมของโครงสร้างพื้นฐาน ความแตกต่างของทักษะดิจิทัลของผู้เรียน ปัญหาด้านเทคนิค และความพร้อมของผู้สอน [1, 4, 15] ความแตกต่างของผลการวิจัยอาจเกิดจากบริบทของการจัดการเรียนรู้ในงานวิจัยครั้งนี้ที่มีการออกแบบกิจกรรมตามกระบวนการคิดเชิงออกแบบอย่างเป็นระบบ มีการจัดเตรียมอุปกรณ์ IoT ให้เพียงพอ และให้คำแนะนำระหว่างการปฏิบัติกิจกรรมอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ผู้เรียนสามารถใช้เทคโนโลยีเพื่อสนับสนุนการสร้างสรรค์นวัตกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าบริบทที่ผู้เรียนต้องเผชิญข้อจำกัดด้านเทคนิคหรือทรัพยากรการเรียนรู้ นอกจากนี้ กลุ่มตัวอย่างนี้เป็นนักศึกษาที่สมัครใจเข้าร่วมการทดลอง ซึ่งอาจมีแรงจูงใจและความสนใจด้านเทคโนโลยีสูงกว่าผู้เรียนทั่วไป จึงอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้ผลวิจัยแตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้

3. ผลกระทบของตัวแปรกวนต่อผลการวิจัย

แม้ว่าผลการวิจัยจะพบว่าการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งส่งผลให้ความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมของนักศึกษาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและมีขนาดอิทธิพลอยู่ในระดับสูงมาก (Cohen's $d = 2.90$) แต่ผลการวิจัยอาจได้รับอิทธิพลจากตัวแปรกวนบางประการที่ไม่สามารถควบคุมได้อย่างสมบูรณ์

ประการแรก ผู้เรียนอาจมีความแตกต่างกันในด้านประสบการณ์เดิมเกี่ยวกับเทคโนโลยี IoT และทักษะดิจิทัลพื้นฐาน แม้ว่าผู้วิจัยจะเก็บข้อมูลดังกล่าว

ไว้ประกอบการวิเคราะห์แล้วก็ตาม ผู้เรียนที่มีพื้นฐานด้านเทคโนโลยีมากกว่าอาจสามารถเรียนรู้และพัฒนาต้นแบบนวัตกรรมได้รวดเร็วกว่าผู้เรียนที่มีประสบการณ์น้อย

ประการที่สอง ความแตกต่างด้านผลการเรียนเฉลี่ยสะสมและศักยภาพในการเรียนรู้ของผู้เรียนอาจส่งผลต่อความสามารถในการทำความเข้าใจเนื้อหาและการประยุกต์ใช้ความรู้ในการออกแบบนวัตกรรม ซึ่งอาจมีส่วนทำให้ผลสัมฤทธิ์หลังเรียนแตกต่างกัน

ประการที่สาม การจัดกิจกรรมในลักษณะการทำงานกลุ่มอาจทำให้เกิดอิทธิพลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้เรียน เช่น การแลกเปลี่ยนความรู้ การช่วยเหลือกันภายในกลุ่ม หรือภาวะผู้นำของสมาชิกบางคน ซึ่งอาจส่งผลต่อระดับการเรียนรู้และการพัฒนาความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมของผู้เรียนแต่ละคนแตกต่างกัน

นอกจากนี้ การวิจัยครั้งนี้ใช้แบบแผนการวิจัยแบบกลุ่มเดียววัดก่อนและหลังการทดลอง (One-Group Pretest-Posttest Design) ซึ่งอาจได้รับผลกระทบจากภัยคุกคามต่อความตรงภายใน เช่น ผลของการทดสอบก่อนเรียน (Testing Effect) การเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติของผู้เรียน (Maturation Effect) และเหตุการณ์ภายนอกที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง (History Effect) ดังนั้น แม้ว่าผลการวิจัยจะสะท้อนแนวโน้มเชิงบวกของการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง แต่ควรตีความผลด้วยความระมัดระวัง และควรมีการศึกษาซ้ำโดยใช้รูปแบบการวิจัยที่มีกลุ่มควบคุมเพื่อยืนยันผลการวิจัยในอนาคต

ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

1. อาจารย์ผู้สอนในระดับอุดมศึกษาสามารถนำแนวทางการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ร่วมกับกระบวนการคิดเชิงออกแบบ (Design Thinking) ไปประยุกต์ใช้ในการจัดการเรียนการสอน เพื่อส่งเสริมความสามารถในการออกแบบนวัตกรรม การคิดสร้างสรรค์ และการแก้ปัญหาเชิงระบบของผู้เรียน

2. สถาบันการศึกษาควรสนับสนุนการจัดสภาพแวดล้อมการเรียนรู้ที่เอื้อต่อการพัฒนา

นวัตกรรม เช่น การจัดหาอุปกรณ์ IoT เซนเซอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ระบบเครือข่าย และแพลตฟอร์มคลาวด์ เพื่อให้ผู้เรียนได้ฝึกปฏิบัติและพัฒนาต้นแบบนวัตกรรมจากสถานการณ์จริง

3. ผู้สอนควรออกแบบกิจกรรมการเรียนรู้ที่เปิดโอกาสให้ผู้เรียนได้ดำเนินการตามกระบวนการ Design Thinking อย่างครบถ้วน ตั้งแต่การศึกษาปัญหา การกำหนดปัญหา การสร้างแนวคิด การพัฒนาต้นแบบ และการทดสอบปรับปรุง เพื่อให้เกิดการเรียนรู้เชิงลึกและสามารถเชื่อมโยงองค์ความรู้สู่การสร้างนวัตกรรมได้อย่างเป็นรูปธรรม

4. เนื่องจากผลการวิจัยพบว่าด้านการทำงานร่วมกันมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าด้านอื่น แม้จะอยู่ในระดับมากที่สุดก็ตาม ผู้สอนจึงควรส่งเสริมกิจกรรมการเรียนรู้แบบทีม การกำหนดบทบาทหน้าที่ในกลุ่ม และการใช้เครื่องมือดิจิทัลเพื่อสนับสนุนการทำงานร่วมกันให้มากขึ้น

5. ผลการวิจัยสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการพัฒนาหลักสูตรหรือรายวิชาที่มุ่งพัฒนาทักษะด้านนวัตกรรม เทคโนโลยีดิจิทัล และทักษะแห่งศตวรรษที่ 21 สำหรับนักศึกษาระดับอุดมศึกษา

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรศึกษาผลของการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งโดยใช้รูปแบบการวิจัยเชิงทดลองที่มีกลุ่มควบคุม (True Experimental Design หรือ Quasi-Experimental Design) เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวิจัยและลดภัยคุกคามต่อความตรงภายใน

2. ควรขยายกลุ่มตัวอย่างไปยังนักศึกษาในสาขาวิชาอื่นหรือมหาวิทยาลัยอื่น เพื่อศึกษาความสามารถในการประยุกต์ใช้รูปแบบการเรียนรู้ในบริบทที่หลากหลาย และเพิ่มความสามารถในการอ้างอิงผลการวิจัยไปยังประชากรในวงกว้าง

3. ควรศึกษาตัวแปรอื่นที่อาจได้รับอิทธิพลจากการจัดการเรียนรู้โดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เช่น ความคิดสร้างสรรค์ ทักษะการแก้ปัญหา ทักษะการทำงานร่วมกัน สมรรถนะดิจิทัล และความเป็นผู้ประกอบการนวัตกรรม

4. ควรดำเนินการวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed Methods Research) โดยเก็บข้อมูลเชิงคุณภาพเพิ่มเติมจากการสัมภาษณ์ การสังเกต หรือการวิเคราะห์ชิ้นงาน เพื่ออธิบายกลไกและกระบวนการที่ทำให้ผู้เรียนสามารถพัฒนาความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมได้ดียิ่งขึ้น

5. ควรศึกษาผลของการใช้เทคโนโลยี IoT ร่วมกับเทคโนโลยีดิจิทัลอื่น เช่น ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) การวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data Analytics) หรือความเป็นจริงเสมือน (Virtual Reality: VR) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดการเรียนรู้และการพัฒนานวัตกรรมของผู้เรียน

ข้อจำกัดของการวิจัย

1. การวิจัยครั้งนี้ใช้แบบแผนการวิจัยแบบกลุ่มเดียววัดก่อนและหลังการทดลอง (One-Group Pretest-Posttest Design) ซึ่งเป็นการวิจัยก่อนทดลอง (Pre-experimental Design) จึงอาจได้รับอิทธิพลจากปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ทั้งหมด เช่น เหตุการณ์ภายนอกระหว่างการทดลอง (History Effect) การเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติของผู้เรียน (Maturation Effect) และผลจากการทดสอบก่อนเรียน (Testing Effect)

2. กลุ่มตัวอย่างได้มาจากการเลือกแบบอาสาสมัคร (Volunteer Sampling) ซึ่งผู้เข้าร่วมวิจัยอาจมีความสนใจหรือแรงจูงใจด้านเทคโนโลยีสูงกว่านักศึกษาทั่วไป ส่งผลให้การอ้างอิงผลการวิจัยไปยังประชากรทั้งหมดควรดำเนินการด้วยความระมัดระวัง

3. กลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษาภาควิชาเทคโนโลยีการศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง เพียงแห่งเดียว จึงอาจมีข้อจำกัดด้านความสามารถในการสรุปอ้างอิงผลไปยังผู้เรียนในบริบทอื่น

4. แม้ว่าผู้วิจัยจะพยายามควบคุมสภาพการเรียนรู้ให้เหมือนกันทุกกลุ่ม แต่ผู้เรียนอาจมีความแตกต่างกันในด้านประสบการณ์การใช้เทคโนโลยี IoT ทักษะดิจิทัลพื้นฐาน และประสบการณ์การพัฒนาวัตกรรม ซึ่งอาจส่งผลต่อผลลัพธ์ของการวิจัย

5. การประเมินความสามารถในการออกแบบนวัตกรรมเป็นการวัดผลในช่วงเวลาหลังสิ้นสุดการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ทันที ซึ่งยังไม่สามารถสะท้อนความคงทนของความรู้และทักษะในระยะยาวได้ ดังนั้นควรมีการศึกษาติดตามผลในระยะยาวเพิ่มเติมในอนาคต (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 การออกแบบกิจกรรมการเรียนรู้ IoT

เอกสารอ้างอิง

[1] Ghashim, I. A. and Arshad, M. (2023). IoT-based teaching and learning: Modern trends and open challenges. *Sustainability*, vol. 15(21), p.15656.

[2] Hsiao, H. C., Shieh, M. D., Wu, C. H., Hsiao, Y. T., and Chang, J. F. (2025). Innovative design of Internet of things-based intelligent teaching tools using quality function deployment. *Engineering Proceedings*, vol. 108, p. 17.

[3] Sarnok, K. and Jeerungsuwan, N. (2019). Design of learning styles using Internet of Thing (IoT) and cloud computing to support meaningful learning for higher education students. *Journal of Southern Technology*, vol. 12(1), pp. 92-102.

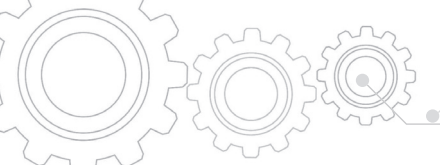
[4] Imwilaiwan, A. (2020). Behavior and problems of internet accessing in educational Institution in Internet of Things (IOT). *Mahachula Academic Journal*, vol. 7(3), pp. 186-97.

[5] Aiempjinda, J., Punngam, A., and Phumphongkhochasorn, P. (2024). Causal factors and guidelines for using Internet of Things (IoT) technology in school administration: The secondary educational service area lower central region 1. *Journal of Multidisciplinary in Humanities and Social Sciences*, vol. 7(4), pp. 2431-2446.

[6] Kaewta, C., Makdee, D., Inthasaen, K., Makdee, T. and Wannathong, A. (2020). The development of training courses on the application of IoT platforms to create learners' digital innovations. *Journal of humanities and social sciences surin rajabhat university*. vol. 22(2), pp. 39-52.

[7] Buachoom, E. (2024). Development of integrated IoT robotics activities based on STEAM education to enhance engineering design process skills for students in the digital age. *Journal of Inclusive and Innovative Education*, vol. 8(3), pp. 137-151.

[8] Sriwanna, S. (2024). Development of a project-based computational science teaching model in develop IoT technology to enhance computational performance and innovation for high school students with



different skill levels. *CRMA Journal*, vol. 22, pp. 47-57.

[9] Uttamasiriseni, C. and Tanyaporn hirun, N. (2021). The development of IoT smart trash system model for online solid waste management at the primary school: The development of IOT smart trash system model for online solid waste management at the primary school. *Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal*, vol. 7(1), pp. 54-63.

[10] Pangerd, S. and Duangmeun, W. (2022). IoT prototype for post-test's satisfaction of students' kindergarten. *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 29(2), pp. 40-46.

[11] Brown, T. (2008). Design thinking. *Harvard Business Review*, vol. 86(6), pp. 84-92.

[12] Plattner, H., Meinel, C. and Leifer, L. (2011). *Design thinking: Understand, improve, apply*. Springer.

[13] Institute of Design at Stanford. (2018). *An introduction to design thinking process guide*. Hasso Plattner Institute of Design at Stanford University.

[14] Jayousi, S., Lucattini, P., Petti, L., Bruni, F. and Mucchi, L. (2025). Smart learning by design: A framework for IoT-driven adaptive classrooms. *Education Sciences*, vol. 15(10), p. 1338.

[15] Paliktzoglou, V. and Vlachopoulou, O. (2024). Exploring the educational transformations: A systematic literature review on the influence of the Internet of Things in higher education. *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, vol. 11(1), pp. 1-9.

[16] OECD. (2018). *The future of education and skills: Education 2030*. OECD Publishing.



งานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

โทรศัพท์ 043-283700 กด 83120 โทรสาร 043-338870

อีเมล gs.eng.kkc@rmuti.ac.th, gs.eng.rmuti.kkc@gmail.com

Website : www.eng.rmuti.ac.th