



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนาขเรืออากาศ

NKRAFA JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

ปีที่ 21 ฉบับที่ 1 ม.ค. - มิ.ย. 68



NKRAFA

ISSN 3057 - 0905 (Print)

ISSN 3057 - 0913 (Online)

- ชื่อวารสาร:** วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ
- ISSN:** 3057-0905 (Print)
3057-0913 (Online)
- เจ้าของ:** กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
999 หมู่ 5 ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 2224 ตำบลมิตรภาพ อำเภอมวกเหล็ก สระบุรี 18180
เว็บไซต์ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/nkrafa-sct>
อีเมล nkrafa.scijournal@gmail.com
- วัตถุประสงค์:** 1. เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. เพื่อส่งเสริมด้านการค้นคว้าด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- ขอบเขต:** วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ รับผิดชอบบทความวิชาการและบทความวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยี การบินและป้องกันประเทศหรือศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง โดยมีกลุ่มเป้าหมาย คือ คณาจารย์ นักศึกษา นักวิจัย ทั้งภายใน และภายนอกสถาบัน
- กำหนดออก:** ปีละ 2 ฉบับ
ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน
ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม
- จัดพิมพ์โดย:** กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

ทุกบทความได้รับการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Reviewers) กลั่นกรองบทความทั้งหมด 3 ท่าน ด้วยวิธีการที่ไม่ทราบชื่อกันและกัน (Double Blind Review) ก่อนตีพิมพ์และเผยแพร่ในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ ทางวารสารไม่มีนโยบายในการเก็บค่าธรรมเนียมในการตีพิมพ์ทุกขั้นตอน กองบรรณาธิการไม่สงวนสิทธิ์ในการคัดลอกบทความแต่ให้อ้างอิงบทความให้ครบถ้วน

ที่ปรึกษา: พล.อ.ท. จักรกฤษณ์ ธรรมวิชัย
พล.อ.ต. รศ.สมเกียรติ สุกางโอง
พล.อ.ต. ผศ.วัชรินทร์ โกมุตผล
น.อ. ศ.ธนากร พิระพันธุ์
น.อ. ศ.ประสาทพร วงษ์คำข้าง
อ.ชาติรี วงษ์แก้ว

บรรณาธิการ: น.อ. ผศ.ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง

รองบรรณาธิการ: ร.อ. ผศ.ภูมินันท์ บัวงาม

กองบรรณาธิการ:

ร.อ. ผศ.ดร.วิศรุต คล้ายแจ้ง	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
ร.ท.ดร.ธนธร ชื่นยินดี	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
ผศ.ดร.ธงจุฑา สุวรรณประเสริฐ	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ดร.ชัยศิริ สนิทพลกลาง	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ดร.ศิริวิมล สายเวช	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ดร.เกวลี สืบญาติ	วิทยาลัยวิทยาศาสตร์การแพทย์เจ้าฟ้าจุฬาภรณ ราชวิทยาลัยจุฬาภรณ์
ดร.ปิยตรา อวยจินดา	วิทยาลัยวิทยาศาสตร์การแพทย์เจ้าฟ้าจุฬาภรณ ราชวิทยาลัยจุฬาภรณ์
รศ.ดร.สันติ เชื้อเตื้อะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.พยุ่ง มีสัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.พงษ์พิสิฐ วุฒิธิษฐโชติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ณัฐพล บุญนำ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.รัตนศักดิ์ เหมะ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.นพรัตน์ โพธิ์ชัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ภักคินี ชิตสกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อ.สมโภชน์ วงษ์เขียด	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร.ณัฐวุฒิ ผ่องหนู	มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตอุดรธานี
ดร.กมลภัสสร มั่นศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
รศ.ดร.พงศกร สุนทรายุทธ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.วงศ์วิศรุต เชื่องสตุ่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุดาภรณ์ ภูแพร่	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ดร.ปิยดา โพธิ์ศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ผศ.กรรณิการ์ อ่อนสำลี	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ผศ.ดร.พัชรินทร์ บัวเย็น	มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
ผศ.ดร.รสนิน เพตะกร	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

ผศ.ดร.เศรษฐวิทย์ ภูฉายา
รศ.ดร.คมเดช ภาพัฒนบุรี
ผศ.ดร.บุญฤทธิ์ ชูประดิษฐ์
ผศ.ดร.อดิสร แก้วภักดี
อ.กวินทร์ จิวสุวรรณ
อ.สาวิตรี พิบุลศิลป์
ดร.ภูวสิทธิ์ ตุ่นแก้ว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

กองจัดการวารสาร

ร.อ. หญิง พัทธมน ปิ่นเพชร
ร.ท. นัฐวัตร ถนอมชาติ

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

ตรวจทานภาษาของบทความ

อ.ธีระพงศ์ คงด้วง
ร.ท. ณัฐวุฒิ นาคแก้ว

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

น.อ. รศ.ฐานันต์ บัวภิบาล	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
น.ท. ผศ.ดร.พายุ์พ ศิรินาม	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
ร.อ. ธนานพ ลิมสุวรรณโรจน์	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
ร.อ. ชัยญูวัจน์ สถิติภัทรสมบัติ	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
อ.จริยากรณ์ หวังศุภกิจโกศล	สถาบันการบินพลเรือน
ผศ.ดร. อติศร แก้วภักดี	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
ผศ.ดร. พุฒิพงษ์ ธนวีระกุล	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
ผศ.ดร.เศรษฐวิทย์ ภูฉายา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร. คมเดช ภาพัฒน์บุรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อ.วงศธร ภาธรสุวรรณ	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ดร.ศุภวัฒน์ คชประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผศ.ขวัญจิต ออกเวหา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
ผศ.กรรณิการ์ อ่อนสำลี	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ดร.ธนวัฒน์ พงษ์ศักดิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
อ.ณภัทรชกร สารพัฒน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ผศ.ดร.ภาวิณี เทียมดี	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ผศ.ดร.ณัฐกิตต์ อยู่ด้วง	สถาบันเทคโนโลยีแห่งสุวรรณภูมิ
อ.อภิรัฐ ศิระวรกุล	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ผศ.ดร.ชัยศิริ สนิทพลกลาง	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
อ. จุฬาวลัย นนตะพันธ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ดวงพร กาชาสปี	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร. ภาคิน จำปาศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร. ผุสดี บุญรอด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร. ชยธัช เผือกสามัญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร. ถกถ ตั้งผาติ	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ดร. อร์ดี ศรีกิมแก้ว	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผศ. ปรีชา วงศ์หิรัญเดชา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร. สุมิตรา นวลมีศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผศ.ดร.ชินนทร์ ตั้งพานทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร. กสิณ รังสิกรรพุม	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร. ธารชуда พันธุ์นิกุล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผศ.ดร. ขวัญชัย หนาแน่น
อ.จุฑาพร เกษร
ผศ.ดร.สุคนธ์รัตน์ เพชรรัตน์
ผศ.ดร.ณัฐรัตน์ ปาณานนท์
ผศ. สิริวัชร จิยาศักดิ์
ผศ.ดร.นิกร กรรณิกากลาง
ผศ.ดร. ชิตพงศ์ เวชไธสงค์
อ. หทัย แก้วภรณ์
ดร.สุริยา จิรสติสิน
ผศ.ดร. จูติพงศ์ จำรัส
ผศ.ดร. สุระสิทธิ์ ทรงม้า

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยราชมงคลศรีวิชัย
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยสวนดุสิต

บทบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ ขอขอบคุณผู้อ่าน ผู้เขียน ผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้การสนับสนุนวารสารด้วยดีเสมอมา วารสารยังคงยึดมั่นในการเผยแพร่ผลงานวิชาการคุณภาพด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยี เพื่อเป็นช่องทางแลกเปลี่ยนผลงานทางวิชาการระดับชาติและนานาชาติ

ในปี 2568 วารสารได้รับการจัดให้อยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 2 (2568-2572) แสดงถึงมาตรฐานที่ดี และศักยภาพการพัฒนา อีกทั้งได้ปรับเปลี่ยนเลข ISSN เป็น 3057-0905 (Print) และ 3057-0913 (Online) เพื่อรองรับรูปแบบ Online First Publication ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพการเข้าถึงในฐานข้อมูลวิชาการ

ฉบับนี้มีบทความผ่านการพิจารณา 10 เรื่อง จากหน่วยงานภายนอก 7 เรื่อง และภายในกองทัพอากาศ 3 เรื่อง ทั้งนี้ กองบรรณาธิการขอเชิญอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ และนิสิตนักศึกษา ร่วมส่งผลงานเพื่อขับเคลื่อนองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีคุณภาพและจรรยาบรรณในฉบับถัดไป

นาวาอากาศเอก



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง)

บรรณาธิการ

สารบัญ

	หน้า
บทความวิจัย	
ทฤษฎีการปรากฏค่าของสตาร์อาร์บอริซิตีของกราฟ	1
The Interpolation Theorems for the Star Arboricity	
ธีระศักดิ์ ขอพลอยกลาง	
Teerasak Khoployklang	
การคำนวณหาระยะยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลาภายใต้แรงภายนอกฟังก์ชันไซน์	9
ในการเคลื่อนที่สั่นแบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย	
Calculation the Equation of Spring Collapse Distance as a Function of Time via	
External Force Squared Sine Function in Simple Harmonic Motion	
อาทิตย์ หู้เต็ม, เจษฎาพร ปาคำวัง, กาญจน์ คุ่มทรัพย์	
Artit Hutem, Jetsadaporn Pakamwang, Kan Khoomsab	
ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดที่มีผลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้า	
ในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร	
Marketing Mix Factors Affecting Satisfaction in Using Freight Transport Services in	24
Nong Chok District, Bangkok	
ชิดชนก อินทอง	
Chidchanok Inthong	
การพิมพ์ผ้าฝ้ายด้วยสีพิมพ์จากมูลกระบือ	37
Printing Cotton Fabric with Buffalo Dung	
ณรัช พรนิธิบุญ, ปิยะพงษ์ ยงเพชร, ปันณรภัฏ ฤกษ์ภักดี	
Narat Pornitibun, Piyaphong Yongphet, Pannraphat Takolpuckdee	
Development of Microfluidic Paper-Based Analytical Devices for Simultaneous	54
Colorimetric Ammonium and Nitrate Detection	
Ruangsak Yucha, Patcha Permpipat, Parintron Muansuwan,	
Rachaphon Chaianongsak, Akarapong Prakobkij, Nattasa Kitchawengkul,	
Panomwan Panseeta	
นวัตกรรมการจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ	67
Innovation Weed Management using Alternating Current	
อนุชา ริกากรณ์, ยศภัทรชัย คณิตปัญญาเจริญ, ธนิต เมธีบุญกุล	
Anucha Rikakorn, Yodphatarachai Kanitpunyacharoen, Thanit Metheenukul	

สารบัญ(ต่อ)

การออกแบบระบบห้องเรียนอัจฉริยะสำหรับการเรียนการสอน เพื่อพัฒนาศักยภาพของนักเรียน นายเรืออากาศ	78
Designing a Smart Classroom System for Teaching and Learning to Improve Potential of Air Cadets	
สิริยุญา ถนอมพลกรัง, ธนาณพ ลิ้มสุวรรณโรจน์, สุภาวดี ลีลายุทธ	
Sirunya Thanompolkrang, Tananop Limsuwanroj, Supavadee Leelayut	
ระบบแจ้งเตือนแสดงผลสภาพอากาศ สำหรับการฝึกนักเรียนนายเรืออากาศ โดยใช้ IoT	94
Weather Alert System for Air Cadet Training Using IoT	
เฉลิมขวัญ ศรีพันธุ์, สิริวิชญ์ ต้นตรา, ภูมิพัฒน์ จบกมลศึก	
Chalermkwan Siripanth, Sirawich Tantra, Poomipat Jobkonsuek	
การพัฒนาระบบประเมินความสามารถด้านเทคโนโลยีสารสนเทศสำหรับนักเรียนนาย เรืออากาศ	107
Development of an Information Technology Competency Evaluation System for Air Cadet	
ชญาวัดจัน สติภักดิ์สมบัติ, ชวพงษ์ ขุนสูงเนิน, เทวา กาญจนชม	
Chanyawat Sathidbhattarasombad, Chawaphong Khunsoongnoen,	
Tewa Kanjanachom	
การตรวจวัดสารระเหยจากการคั่วเมล็ดกาแฟด้วยเครื่องมือสำหรับตรวจวัดคุณภาพอากาศ ชนิดพกพา	121
Measuring of Volatile Compound from Roasting of Coffee Beans Using Portable Air Quality Device	
พลาธิป คัคโนภาส, นภัสนันท์ เขียวเขว้า	
Palathip Kakanopas, Napassanan Khiawkhwao	
คำแนะนำสำหรับผู้แต่งในการส่งบทความ	

ทฤษฎีการปรากฏค่าของสตาร์อาร์บอริซิตีของกราฟ

The Interpolation Theorems for the Star Arboricity

ธีระศักดิ์ ขอพลอยกลาง^{1*}

¹ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

Teerasak Khoployklang^{1*}

¹Department of Mathematics Chandra Kasem Rajabhat University

teerasak.k@chandra.ac.th

Received 08 September 2024

Revised 05 December 2024

Accepted 07 December 2024

บทคัดย่อ

การวิจัยเรื่องทฤษฎีการปรากฏค่าของสตาร์อาร์บอริซิตีของกราฟครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพิสูจน์ว่าสตาร์อาร์บอริซิตีเป็นพารามิเตอร์ของกราฟที่สอดคล้องกับทฤษฎีการปรากฏค่าบนคลาสของกราฟอย่างง่าย และกราฟเชื่อมโยงอย่างง่ายที่มี m เส้น และ n จุด ผลการวิจัยพบว่า สตาร์อาร์บอริซิตีเป็นกราฟพารามิเตอร์ที่ปรากฏทุกค่าบนคลาสของกราฟอย่างง่าย $G(m, n)$ และกราฟเชื่อมโยง $CG(m, n)$ ที่มี m เส้น และ n จุด เมื่อให้ $s = \min\{sa(G) | G \in G(m, n)\}$ และ $t = \max\{sa(G) | G \in G(m, n)\}$ แล้ว สำหรับทุก ๆ ค่า r ซึ่ง $s \leq r \leq t$ จะมีกราฟ $G \in G(m, n)$ ที่มีค่า $sa(G) = r$ เมื่อพิจารณาบนคลาสของกราฟเชื่อมโยงที่มี m เส้น และ n จุด จะได้ว่า ถ้าให้ $s' = \min\{sa(G) | G \in CG(m, n)\}$ และ $t' = \max\{sa(G) | G \in CG(m, n)\}$ แล้ว จะมีกราฟ $G' \in CG(m, n)$ ที่มีค่า $sa(G') = r'$ สำหรับทุก ๆ ค่า r' โดยที่ $s' \leq r' \leq t'$

คำสำคัญ: ทฤษฎีกราฟ อาร์บอริซิตี สตาร์อาร์บอริซิตี ทฤษฎีการปรากฏค่า

Abstract

The purpose of this research is to prove that the star arboricity is an interpolation graph parameter on the class of simple and connected graphs with m edges and n vertices. The result of this research shows that the star arboricity is an interpolation graph parameter on the class of simple and connected graphs with m edges and n vertices denoted by $G(m, n)$ and $CG(m, n)$, respectively. As a result, for $s = \min\{sa(G) | G \in G(m, n)\}$ and $t = \max\{sa(G) | G \in G(m, n)\}$, there exists a graph $G \in G(m, n)$ with $sa(G) = r$ for all $s \leq r \leq t$. In the same way, for $s' = \min\{sa(G) | G \in CG(m, n)\}$ and $t' = \max\{sa(G) | G \in CG(m, n)\}$, there exists a graph $G' \in CG(m, n)$ with $sa(G') = r'$ for all $s' \leq r' \leq t'$.

Keywords: Graph theory, Arboricity, Star arboricity, Interpolation theory

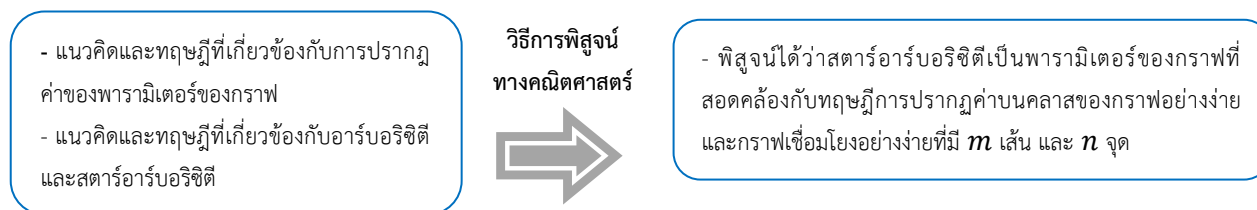
1. บทนำ

ทฤษฎีการปรากฏค่าของพารามิเตอร์ของกราฟ (Interpolation theory of graph parameters) นั้นได้ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี 1980 โดย ชาร์ทรานด์ [1] เริ่มจากการศึกษาปัญหาที่กล่าวว่า “ถ้า G เป็นกราฟที่มี กราฟต้นไม้ m ต้นของ G อันหนึ่งมี m ลีฟ (Leaf) และกราฟต้นไม้ n ต้นของ G อีกอันมี n ลีฟ โดยที่ $m < n$ แล้ว จะมีกราฟต้นไม้ k ต้นของ G ที่มี k ลีฟ โดยที่ $m < k < n$ หรือไม่” ปัญหาดังกล่าว ชาร์ทรานด์ สามารถหาคำตอบและแสดงการพิสูจน์ได้ว่า สามารถหากราฟต้นไม้ k ต้นของ G ที่มี k ลีฟได้ และได้นำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการ The Theory and Application of Graphs: Fourth International Conference ในปี 1980 จากการนำเสนอผลงานการพิสูจน์ดังกล่าวของชาร์ทรานด์ได้นำไปสู่การศึกษาทฤษฎีการปรากฏค่าของพารามิเตอร์ของกราฟอีก นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาบนคลาส (Class) ของกราฟที่แตกต่างกันอีกหลายคลาส อาทิเช่น คลาสของกราฟเชื่อมโยง (Class of connected graphs) และคลาสของกราฟปกติ (Regular graph) เป็นต้น [2-7]

ปัญหาทฤษฎีการปรากฏค่าของพารามิเตอร์ของกราฟ คือการพิจารณาดังต่อไปนี้ ถ้าหากพารามิเตอร์ของกราฟนั้นมีค่าอยู่ระหว่างจำนวนเต็ม m และ n แล้ว จะมีกราฟที่มีค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่มีค่าเท่ากับ k ทุก ๆ ค่า k ที่อยู่ระหว่าง m และ n หรือไม่ ถ้ามีสำหรับทุกค่า k จะกล่าวว่าเป็น กราฟพารามิเตอร์ที่ปรากฏทุกค่า (An interpolation graph parameter) กราฟพารามิเตอร์ตัวนั้นจะเป็นพารามิเตอร์ที่สอดคล้องกับทฤษฎีการปรากฏค่าบนคลาสของกราฟที่พิจารณา เนื่องจากทฤษฎีการปรากฏค่าของกราฟนั้น มีส่วนสำคัญเกี่ยวกับการยืนยันได้ว่ากราฟที่มีค่าพารามิเตอร์ในขอบเขตที่หาได้นั้น มีกราฟอยู่จริงในทุก ๆ ค่า ภายในขอบเขตของค่าพารามิเตอร์นั้น ในปี 2011 พารามิเตอร์อาร์บอริซิตีนั้นมีผู้ศึกษาและแสดงการพิสูจน์แล้วว่า อาร์บอริซิตีเป็นพารามิเตอร์ของกราฟที่สอดคล้องกับทฤษฎีการปรากฏค่าบนคลาสของกราฟอย่างง่าย (Class of simple graphs) และกราฟเชื่อมโยงอย่างง่าย (Class of simple connected graphs) ที่มี m เส้น และ n จุด [8] เป็นกราฟพารามิเตอร์ที่สอดคล้องกับทฤษฎีการปรากฏค่าบนคลาสของกราฟปกติที่มี n จุด และดีกรี r [9] นอกจากนี้ ทั้งสองงานวิจัยข้างต้นยังได้ทำการแสดงถึงขอบเขตของค่าอาร์บอริซิตี บนคลาสของกราฟอย่างง่าย กราฟเชื่อมโยงอย่างง่าย และกราฟปกติเช่นกัน การวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยมีความสนใจจะศึกษาทฤษฎีการปรากฏค่าของสตาร์อาร์บอริซิตีของกราฟ โดยจะพิสูจน์ว่าสตาร์อาร์บอริซิตีเป็นกราฟพารามิเตอร์ที่ปรากฏทุกค่า นั่นคือ เป็นพารามิเตอร์ของกราฟที่สอดคล้องกับทฤษฎีการปรากฏค่าบนคลาสของกราฟอย่างง่ายและกราฟเชื่อมโยงอย่างง่ายที่มี m เส้น และ n จุด โดยงานวิจัยในครั้งนี้จะใช้กระบวนการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ประกอบกับทฤษฎีการปรากฏค่าของพารามิเตอร์ของกราฟ ซึ่งเทคนิคในการพิสูจน์จะสร้างกราฟที่มีจุดเป็นกราฟที่อยู่ในคลาสที่พิจารณาโดยจุดสองจุดจะมีเส้นเชื่อมก็ต่อเมื่อสองจุดนั้นเป็นกราฟที่ได้จากการสร้างมาจากอีกกราฟหนึ่ง หลังจากนั้นจะใช้ทฤษฎีการปรากฏค่าของพารามิเตอร์ของกราฟมาช่วยพิสูจน์บนกราฟที่สร้างขึ้น

2. ขอบเขตงานวิจัย

การวิจัยเรื่องทฤษฎีการปรากฏค่าของ สตาร์อาร์บอริซิตีของกราฟ ขอบเขตทางด้านเนื้อหาประกอบด้วย บทนิยาม แนวคิด และทฤษฎีเกี่ยวกับ อาร์บอริซิตี สตาร์อาร์บอริซิตี และทฤษฎีการปรากฏค่าของพารามิเตอร์ของกราฟ โดยมีกรอบแนวคิดการวิจัยแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมีรายละเอียดดังนี้

3.1 บทนิยามและทฤษฎีบทพื้นฐาน

งานวิจัยฉบับนี้จะใช้สัญลักษณ์และบทนิยามพื้นฐานของทฤษฎีกราฟตามหนังสือ Graph Theory ของ Bondy and Murty (1976) [10]

บทนิยาม 3.1.1 กราฟ (Graph) G ประกอบด้วยเซตจำกัด $V(G)$ ที่ไม่เป็นเซตว่าง และเซตของ $E(G)$ ซึ่งเป็นเซตของคู่อันดับที่ไม่เป็นอันดับ (Unordered pair) ของสมาชิกใน $V(G)$ โดยที่เซตของ $E(G)$ อาจจะเป็นเซตว่างก็ได้ สมาชิกของ $V(G)$ เรียกว่า จุด (Vertex) สมาชิกของ $E(G)$ เรียกว่า เส้น (Edge) ถ้า $|V(G)| = n$ แล้วกราฟ G เป็นกราฟที่มีอันดับ (Order) n นั่นคือกราฟ G มีจุดเป็นจำนวน n จุด ถ้า $|E(G)| = m$ แล้วกราฟ G เป็นกราฟที่มีขนาด (Size) m นั่นคือกราฟ G มีเส้นเป็นจำนวน m เส้น ถ้าทุกเส้นในกราฟ G เชื่อมโยง 2 จุดที่ต่างกันจะเรียกรูปกราฟ G ว่า กราฟอย่างง่าย (Simple graph) ถ้า u และ v เป็นจุดของกราฟ ประกอบเป็นเส้นของกราฟจะเขียนแทนได้ด้วย $\{u, v\}$ เพื่อความสะดวกในการพิจารณาอาจเขียนแทนเส้น $\{u, v\}$ ด้วย uv

บทนิยาม 3.1.2 ดีกรี (Degree) ของจุด v ในกราฟ G เขียนแทนด้วย $\deg_G v$ คือ จำนวนเส้นทั้งหมดที่เข้ามาเชื่อมต่อกับจุด v จุดที่มีดีกรีเป็น 0 จะเรียกว่า จุดเอกเทศ (Isolated vertex) จุดที่มีดีกรีเป็น 1 เรียกว่า จุดปลาย (End vertex) ดีกรีสูงสุด (Maximum degree) ของจุดในกราฟ G จะเขียนแทนด้วย $\Delta(G)$ ดีกรีต่ำสุด (Minimum degree) ของจุดในกราฟ G จะเขียนแทนด้วย $\delta(G)$

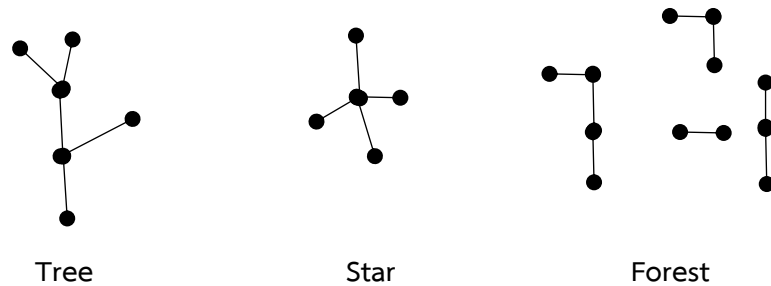
บทนิยาม 3.1.3 ให้จุด u และ v เป็น 2 จุดในกราฟ G โดยไม่จำเป็นต้องแตกต่างกัน แนวเดิน $u - v$ คือ ลำดับของจุดและเส้นโดยที่แนวเดิน $u - v : u = u_0, e_0, u_1, e_1, u_2, e_2, \dots, u_{k-1}, e_{k-1}, u_k = v$ โดยที่ e_i เป็นเส้นของกราฟ G สำหรับทุก ๆ $0 \leq i < k$

แนวเดินที่มีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเป็นจุดเดียวกันและจุดภายในแนวเดินไม่ซ้ำกัน จะเรียกว่า วง หรือวงจร (Cycle) และแนวเดินที่มีจุดยอดไม่ซ้ำกันจะเรียกว่า วิถี (Path)

กราฟอย่างง่ายที่ทุก ๆ 2 จุดใด ๆ ในกราฟมีแนวเดินเชื่อมโยงถึงกันจะเรียกว่า กราฟเชื่อมโยง (Connected graph)

กราฟเชื่อมโยงที่ไม่มีวัฏจักร จะเรียกว่า กราฟต้นไม้ (Tree) กราฟต้นไม้ที่มีเพียงจุดเดียวที่มีดีกรีมากกว่า 1 โดยที่จุดที่เหลือมีดีกรีเป็น 1 จะเรียกว่า กราฟดาว (Star) กราฟที่ทุก ๆ ส่วนประกอบเป็นกราฟต้นไม้จะเรียกว่า กราฟป่า (Forest)

บทนิยาม 3.1.4 พารามิเตอร์ของกราฟ (Graph parameter) คือ ฟังก์ชันที่มีโดเมนเป็นกราฟ และมีเรนจ์เป็นจำนวนเต็ม โดยกราฟที่สมมูลฐานกันจะมีค่าพารามิเตอร์เท่ากัน



รูปที่ 2 กราฟต้นไม้ (Tree) กราฟดาว (Star) และกราฟป่า (Forest)

บทนิยาม 3.1.5 อาร์บอริซิตีของกราฟ (Arboricity of graphs) คือ จำนวนเซตของเส้นที่น้อยที่สุดที่ถูกแบ่งกันโดยแต่ละเซตนั้นเป็นกราฟป่า เขียนแทนด้วย $a(G)$

สัญกรณ์ $[A]$ จะแทนจำนวนเต็มที่น้อยที่สุดที่มากกว่าเท่ากับ A และ $\lfloor A \rfloor$ จำนวนเต็มที่มากที่สุดที่น้อยกว่าเท่ากับ A

ทฤษฎีบท 3.1.6 [11] สำหรับทุก ๆ กราฟ G ที่มีจำนวนจุด $n > 1$ จะได้

$$a(G) = \max \lfloor q_n / (n - 1) \rfloor$$

เมื่อ $q_n = \max \{ |E(H)| \mid H \text{ เป็นกราฟย่อยของ } G \text{ ที่มี } |V(H)| = n \}$

บทนิยาม 3.1.7 สตาร์อาร์บอริซิตีของกราฟ (Star arboricity of graphs) คือ จำนวนเซตของเส้นที่น้อยที่สุดที่ถูกแบ่งกันโดยแต่ละเซตนั้นกราฟป่าที่มีส่วนประกอบเป็นกราฟดาว เขียนแทนด้วย $sa(G)$

บทนิยาม 3.1.8 ลิเนียร์อาร์บอริซิตี (Linear arboricity) คือ จำนวนเซตของเส้นที่น้อยที่สุดที่ถูกแบ่งกันโดยแต่ละเซตนั้นเป็นกราฟป่าที่มีส่วนประกอบเป็นกราฟวิถี เขียนแทนด้วย $la(G)$

3.2 ทฤษฎีการปรากฏค่าของพารามิเตอร์ของกราฟ

บทนิยาม 3.2.1 ให้ $\mathcal{G}$ เป็นคลาสของกราฟที่กำหนด จะเรียกฟังก์ชัน $T : \mathcal{G} \rightarrow \mathcal{G}$ ว่า การแปลงกราฟบนคลาส $\mathcal{G}$ (A graph transformation on $\mathcal{G}$) นิยามกราฟ $T - graph$ เป็นกราฟที่มีเซตของจุดเป็น $\mathcal{G}$ และสำหรับ $G_1, G_2 \in \mathcal{G}$ จะมีเส้นเชื่อมก็ต่อเมื่อ $(G_1, G_2) \in T$ ถ้า T เป็นฟังก์ชันสมมาตรแล้ว $T - graph$ เป็นกราฟไม่มีทิศทาง

บทนิยาม 3.2.2 สำหรับจำนวนเต็มบวก m และ n โดยที่ $m < n$ ให้ $G(m, n)$ และ $CG(m, n)$ แทนคลาสของกราฟอย่างง่ายและกราฟเชื่อมโยงที่มี m เส้น n จุด ตามลำดับ ให้ $G \in G(m, n)$ โดยที่ $e \in E(G)$ และ $e' \notin E(G)$ แล้ว $G^{T(e, e')}$ แทนกราฟที่มี $V(G^{T(e, e')}) = V(G)$ และ $E(G^{T(e, e')}) = E(G) - e + e'$ โดยที่ $T(e, e')$ จะเรียกว่า การแปลงกราฟแบบข้าม (Jumping Transformation)

$T_{(m,n)}$ เป็นความสัมพันธ์บน $G(m,n)$ จะนิยาม $(G_1, G_2) \in T_{(m,n)}$ ถ้า $G_1 \neq G_2$ และ G_1 ได้มาจาก G_2 ด้วยการแปลงกราฟแบบข้าม เพราะ $T_{(m,n)}$ เป็นฟังก์ชันสมมาตร ดังนั้น $T_{(m,n)} - graph$ เป็นกราฟไม่มีทิศทาง และ $CT_{(m,n)} - graph$ เป็นกราฟย่อยของ $T_{(m,n)} - graph$ ซึ่งเป็นกราฟที่ก่อกำเนิดด้วยเซต $CG(m,n)$

ทฤษฎีบท 3.2.3 [7] ให้ $G_1, G_2 \in G(m,n)$ แล้ว จะได้ว่า $G_1 = G_2$ หรือ $G_1 = G_2^{T(e_1, e_1')T(e_2, e_2') \dots T(e_k, e_k')}$ โดยที่ $T(e_1, e_1')T(e_2, e_2') \dots T(e_{k-1}, e_{k-1}')T(e_k, e_k')$ เป็นลำดับจำกัด สำหรับจำนวนเต็ม k ซึ่ง $1 \leq k \leq \binom{n}{2}$

บทแทรก 3.2.4 [7] $T_{(m,n)} - graph$ เป็นกราฟเชื่อมโยง

ทฤษฎีบท 3.2.5 [7] ให้ $G_1, G_2 \in CG(m,n)$ แล้ว จะได้ $G_1 = G_2$ หรือ $G_1 = G_2^{T(e_1, e_1')T(e_2, e_2') \dots T(e_k, e_k')}$ โดยที่ $T(e_1, e_1')T(e_2, e_2') \dots T(e_{k-1}, e_{k-1}')T(e_k, e_k')$ เป็นลำดับจำกัด สำหรับจำนวนเต็ม k ซึ่ง $1 \leq k \leq \binom{n}{2}$

บทแทรก 3.2.6 [7] $CT_{(m,n)} - graph$ เป็นกราฟเชื่อมโยง

บทนิยาม 3.2.7 กำหนดให้ $\mathbb{G}$ เป็นคลาสของกราฟอย่างง่าย และฟังก์ชัน $\theta : \mathbb{G} \rightarrow \mathbb{Z}$ ถ้า $\theta(G_1) = \theta(G_2)$ สำหรับทุก ๆ $G_1, G_2 \in G(m,n)$ ซึ่ง $G_1 \neq G_2$ แล้ว θ เรียกว่า กราฟพารามิเตอร์ (A graph parameter)

บทนิยาม 3.2.8 กำหนดให้ $\mathbb{G}$ เป็นคลาสของกราฟอย่างง่าย และฟังก์ชัน $\theta : \mathbb{G} \rightarrow \mathbb{Z}$ แล้ว จะเรียก θ ว่า กราฟพารามิเตอร์ที่ปรากฏทุกค่า (An interpolation graph parameter) บนคลาส $\mathbb{J} \subseteq \mathbb{G}$ ถ้ามีจำนวนเต็ม a และ b โดยที่ $\{\theta(G) : G \in \mathbb{J}\} = [a, b] = \{x \in \mathbb{Z} : a \leq x \leq b\}$

ทฤษฎีบท 3.2.9 [7] กำหนดให้ $G(m,n)$ เป็นคลาสของกราฟอย่างง่ายที่มี m เส้น และ n จุด และ θ เป็นกราฟพารามิเตอร์แล้ว θ เป็นกราฟพารามิเตอร์ที่ปรากฏทุกค่าบน $G(m,n)$ ถ้า $|\theta(G^{T(e, e')}) - \theta(G)| \leq 1$ สำหรับทุก ๆ $G \in G(m,n)$ และ $T(e, e')$ เป็นการแปลงกราฟแบบข้าม โดยที่ $e \in E(G)$ และ $e' \notin E(G)$

ทฤษฎีบท 3.2.10 [7] กำหนดให้ $CG(m,n)$ เป็นคลาสของกราฟอย่างง่ายที่มี m เส้น และ n จุด และ θ เป็นกราฟพารามิเตอร์แล้ว θ เป็นกราฟพารามิเตอร์ที่ปรากฏทุกค่าบน $CG(m,n)$ ถ้า $|\theta(G^{T(e, e')}) - \theta(G)| \leq 1$ สำหรับทุก ๆ $G \in CG(m,n)$ และ $T(e, e')$ เป็นการแปลงกราฟแบบข้าม โดยที่ $e \in E(G)$ และ $e' \notin E(G)$

ทฤษฎีบท 3.2.11 [7] กำหนดให้ $\mathbb{J} \subseteq G(m,n)$ โดยที่เซตย่อยของ $T_{(m,n)} - graph$ ที่ก่อกำเนิดโดย $\mathbb{J}$ เป็นกราฟเชื่อมโยง ถ้า θ เป็นกราฟพารามิเตอร์บน $\mathbb{J}$ และ $|\theta(G^{T(e, e')}) - \theta(G)| \leq 1$ สำหรับแต่ละกราฟ $G \in \mathbb{J}$ และ $T(e, e')$ เป็นการแปลงกราฟแบบข้าม โดยที่ $e \in E(G)$ และ $e' \notin E(G)$ แล้ว θ เป็นกราฟพารามิเตอร์ที่ปรากฏทุกค่าบนคลาส $\mathbb{J}$

4. การดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยมีดังนี้

1. พบนักวิชาการทางคณิตศาสตร์เพื่อประชุม สัมมนา เพื่อให้ได้ประเด็นที่จะทำการศึกษา
2. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับประเด็นที่ศึกษา เพื่อกำหนดเป้าหมาย กรอบแนวคิดในการวิจัย และตั้งข้อคาดการณ์
3. พบที่ปรึกษา เพื่อให้คำแนะนำเกี่ยวกับเป้าหมายที่กำหนด กรอบแนวคิด และข้อคาดการณ์ที่ตั้งไว้

4. สืบค้นข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาสนับสนุนและเป็นแนวทางการศึกษา (พิสูจน์)
5. พิสูจน์ข้อคาดการณ์และตรวจสอบ
6. สรุปผลการศึกษา

5. ผลการวิจัย

จากการศึกษาทฤษฎีการปรากฏค่าของสตาร์อาร์บอริซิติ์ของกราฟ ผู้วิจัยได้ผลการพิสูจน์ทฤษฎีการปรากฏค่าของสตาร์อาร์บอริซิติ์ของกราฟ ได้ผลการพิสูจน์ดังต่อไปนี้

ทฤษฎีบท 5.1 ให้ T เป็นการแปลงกราฟแบบข้ามบนกราฟ $G \in G(m, n)$ แล้ว $sa(G^T) \leq sa(G) + 1$

พิสูจน์ กำหนดให้ $T = T(e, e')$ เป็นการแปลงกราฟแบบข้ามบนกราฟ G โดยที่ $e \in E(G)$ และ $e' \notin E(G)$ และ $sa(G) = k > 0$ เพราะกราฟย่อยของแต่ละกราฟจะไม่มีค่าสตาร์อาร์บอริซิติ์ที่สูงกว่าตัวกราฟนั้น ๆ จะได้ว่า กราฟย่อย $G - e$ ของ G จะมีค่า $sa(G - e) \leq k$ ดังนั้น เซตของ $E(G - e)$ สามารถพาร์ทิชันได้เป็น l เซตย่อย นั่นคือ $E_1, E_2, \dots, E_l$ โดยที่ $l \leq k$ และกราฟย่อยของ G ที่ก่อกำเนิดโดย E_i สำหรับทุก ๆ $1 \leq i \leq l$ จะเป็นกราฟป่าที่มีส่วนประกอบเป็นกราฟดาว

เมื่อกราฟย่อย $G - e$ ถูกเพิ่มเส้น e' เข้าไปจะได้ $G - e + e' = G^{T(e, e')} = G^T$ และให้เซต $E(G - e)$ สามารถที่จะพาร์ทิชันได้เป็น l เซตย่อย นั่นคือ $E'_1, E'_2, \dots, E'_l$ โดยที่ $l \leq k$ สำหรับบาง $1 \leq j \leq l$ จะมี $E'_j = E_j \cup \{e'\}$ และ $E'_i = E_i$ สำหรับทุก ๆ $1 \leq i \leq l$ ซึ่ง $i \neq j$ จะพิจารณาการพาร์ทิชันเซตของ $E(G^T)$ เป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 มีเซต E'_i สำหรับบาง $1 \leq i \leq l$ ซึ่งทำให้กราฟย่อยของ G^T ที่ก่อกำเนิดโดย $E_i \cup \{e'\}$ เป็นกราฟป่าที่มีส่วนประกอบเป็นกราฟดาว แล้วจะได้ว่า G^T สามารถพาร์ทิชันได้เป็น l เซตย่อย โดยที่ $l \leq k$ และกราฟย่อยของ G^T ที่ก่อกำเนิดโดย E_i สำหรับทุก ๆ $1 \leq i \leq l$ เป็นกราฟป่าที่มีส่วนประกอบเป็นกราฟดาว ดังนั้น ในกรณีนี้ $sa(G^T) \leq l$

กรณีที่ 2 เซต E'_i สำหรับทุก ๆ $1 \leq i \leq l$ ทำให้กราฟย่อยของ G^T ที่ก่อกำเนิดโดย $E_i \cup \{e'\}$ ไม่เป็นกราฟป่าที่มีส่วนประกอบเป็นกราฟดาว แล้วจะได้ว่า G^T ต้องพาร์ทิชันได้เป็น $l + 1$ เซตย่อย โดยที่ $l \leq k$ นั่นคือ $E'_1, E'_2, \dots, E'_l, E'_{l+1}$ โดยที่ $E'_i = E_i$ สำหรับทุก ๆ $1 \leq i \leq l$ และ $E'_{l+1} = \{e'\}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากราฟย่อยของ G^T ที่ก่อกำเนิดโดย E'_i สำหรับทุก ๆ $1 \leq i \leq l + 1$ เป็นกราฟป่าที่มีส่วนประกอบเป็นกราฟดาว ดังนั้น ในกรณีนี้ $sa(G^T) \leq l + 1$

จากทั้ง 2 กรณีจะได้ว่า $sa(G^T) \leq l + 1 \leq k + 1 = sa(G) + 1$

จากผลของทฤษฎีบทข้างต้นจะทำให้ได้บทแทรกดังต่อไปนี้

บทแทรก 5.2 ให้กราฟ $G \in G(m, n)$ และ T เป็นการแปลงกราฟแบบข้ามบน G แล้ว $|sa(G^T) - sa(G)| \leq 1$

พิสูจน์ เนื่องจาก $sa(G) - 1 \leq sa(G - e)$ และ $sa(G - e) \leq sa(G - e + e') = sa(G^T)$ และโดยผลของทฤษฎีบท 5.1 จะทำให้ได้ว่า $sa(G) - 1 \leq sa(G^T) \leq sa(G) + 1$ นั่นคือ $-1 \leq sa(G^T) - sa(G) \leq 1$ หรือ $|sa(G^T) - sa(G)| \leq 1$

จากผลของบทแทรก 5.2 อาศัยบทแทรก 3.2.4 และทฤษฎีบท 3.2.9 ทำให้ได้ทฤษฎีบทต่อไปนี้

ทฤษฎีบท 5.3 กำหนดให้ $G(m, n)$ เป็นคลาสของกราฟอย่างง่ายที่มี m เส้น และ n จุดแล้ว สตาร์อาร์บอริซิติ์ เป็นกราฟพารามิเตอร์ที่ปรากฏทุกค่าบน $G(m, n)$ และจะได้ว่า ถ้ากำหนดให้ $s = \min\{sa(G) | G \in G(m, n)\}$

และ $t = \max\{sa(G) | G \in G(m, n)\}$ แล้ว สำหรับทุก ๆ ค่า r โดยที่ $s \leq r \leq t$ จะมี $G \in G(m, n)$ ที่มีค่า $sa(G) = r$

พิสูจน์ ให้ $T_{(m,n)} - graph$ เป็นกราฟไม่มีทิศทางที่มีเซตของจุดคือ $G(m, n)$ สำหรับ $G_1, G_2 \in G(m, n)$ โดยที่ $G_1 \neq G_2$ ซึ่ง G_1 และ G_2 จะมีเส้นเชื่อมก็ต่อเมื่อ G_1 ได้มาจาก G_2 ด้วยการแปลงกราฟแบบข้าม โดยบทแทรก 3.2.4 จะได้ว่า $T_{(m,n)} - graph$ เป็นกราฟเชื่อมโยง และโดยผลของบทแทรก 5.2 จะได้ว่า $|sa(G^T) - sa(G)| \leq 1$ สำหรับทุก ๆ $G \in G(m, n)$ โดยทฤษฎีบท 3.2.9 จะได้ว่า sa เป็นกราฟพารามิเตอร์ที่ปรากฏทุกค่าบนคลาส $G(m, n)$ นั่นคือ ถ้ากำหนดให้ $s = \min\{sa(G) | G \in G(m, n)\}$ และ $t = \max\{sa(G) | G \in G(m, n)\}$ แล้ว สำหรับทุก ๆ ค่า r ซึ่ง $s \leq r \leq t$ จะมี $G \in G(m, n)$ ที่มีค่า $sa(G) = r$

นอกจากนี้ ด้วยผลของบทแทรก 5.2 อาศัยบทแทรก 3.2.6 และทฤษฎีบท 3.2.10 ทำให้ได้ทฤษฎีบทต่อไปนี้
ทฤษฎีบท 5.4 กำหนดให้ $CG(m, n)$ เป็นคลาสของกราฟเชื่อมโยงที่มี m เส้น และ n จุดแล้ว สตาร์อาร์บอริซิติ เป็นกราฟพารามิเตอร์ที่ปรากฏทุกค่าบน $CG(m, n)$ และจะได้ว่า ถ้ากำหนดให้ $s' = \min\{sa(G) | G \in CG(m, n)\}$ และ $t' = \max\{sa(G) | G \in CG(m, n)\}$ แล้ว สำหรับทุก ๆ ค่า r' ซึ่ง $s' \leq r' \leq t'$ จะมีกราฟ $G' \in CG(m, n)$ ที่มีค่า $sa(G') = r'$

พิสูจน์ ให้ $T_{(m,n)} - graph$ เป็นกราฟไม่มีทิศทางที่มีเซตของจุดคือ $G(m, n)$ สำหรับ $G_1, G_2 \in G(m, n)$ โดยที่ $G_1 \neq G_2$ ซึ่ง G_1 และ G_2 จะมีเส้นเชื่อมก็ต่อเมื่อ G_1 ได้มาจาก G_2 ด้วยการแปลงกราฟแบบข้าม และกำหนดให้ $CT_{(m,n)} - graph$ เป็นกราฟย่อยของ $T_{(m,n)} - graph$ ที่ก่อกำเนิดด้วยเซต $CG(m, n)$ โดยบทแทรก 3.2.6 จะได้ว่า $CT_{(m,n)} - graph$ เป็นกราฟเชื่อมโยง และโดยผลของบทแทรก 5.2 จะได้ว่า $|sa(G^T) - sa(G)| \leq 1$ สำหรับทุก ๆ $G \in CG(m, n)$ โดยทฤษฎีบท 3.2.10 จะได้ว่า sa เป็นกราฟพารามิเตอร์ที่ปรากฏทุกค่าบนคลาส $CG(m, n)$ นั่นคือ ถ้ากำหนดให้ $s' = \min\{sa(G) | G \in CG(m, n)\}$ และ $t' = \max\{sa(G) | G \in CG(m, n)\}$ แล้ว สำหรับทุก ๆ ค่า r' โดยที่ $s' \leq r' \leq t'$ จะมีกราฟ $G' \in CG(m, n)$ ที่มีค่า $sa(G') = r'$

6. สรุป

จากการดำเนินการวิจัยที่มีวัตถุประสงค์เพื่อพิสูจน์ว่าสตาร์อาร์บอริซิติเป็นกราฟพารามิเตอร์ที่ปรากฏทุกค่าซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการปรากฏค่าบนคลาสของกราฟอย่างง่ายและกราฟเชื่อมโยงอย่างง่ายที่มี m เส้น และ n จุด ผลการวิจัยพบว่า จากผลของทฤษฎีบท 5.3 และ 5.4 สตาร์อาร์บอริซิติเป็นกราฟพารามิเตอร์ที่ปรากฏทุกค่า ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการปรากฏค่าบนคลาสของกราฟอย่างง่ายและกราฟเชื่อมโยงอย่างง่ายที่มี m เส้น และ n จุด ดังนั้น จะได้ว่าถ้าให้ $s = \min\{sa(G) | G \in G(m, n)\}$ และ $t = \max\{sa(G) | G \in G(m, n)\}$ แล้ว สำหรับทุก ๆ ค่า r ซึ่ง $s \leq r \leq t$ จะมีกราฟ $G \in G(m, n)$ ที่มีค่า $sa(G) = r$ และ ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาบนคลาสของกราฟเชื่อมโยงอย่างง่ายที่มี m เส้น และ n จุด จะได้ว่า ถ้า $s' = \min\{sa(G) | G \in CG(m, n)\}$ และ $t' = \max\{sa(G) | G \in CG(m, n)\}$ แล้ว จะมีกราฟ $G' \in CG(m, n)$ ที่มีค่า $sa(G') = r'$ สำหรับทุก ๆ ค่า r' ซึ่ง $s' \leq r' \leq t'$

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการปฏิบัติ

7.1.1 นักวิจัยสามารถนำแนวทางในการพิสูจน์ไปใช้ในการพิสูจน์พารามิเตอร์ของกราฟตัวอื่น ๆ ว่าเป็นพารามิเตอร์ที่ปรากฏทุกค่าบนคลาสของกราฟอย่างง่ายและกราฟเชื่อมโยงที่มี m เส้น และ n จุดหรือไม่ หรือการ

พิสูจน์ว่า ลิเนียร์อาร์บอริซิตี้ ลิเนียร์ k อาร์บอริซิตี้ และสตาร์อาร์บอริซิตี้เป็นกราฟพารามิเตอร์ที่ปรากฏทุกค่าบนคลาสอื่น ๆ ของกราฟ เช่น คลาสของกราฟปกติ หรือ คลาสของกราฟเชิงระนาบ เป็นต้น

7.1.2 ในการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับทฤษฎีกราฟโดยเฉพาะที่เกี่ยวกับพารามิเตอร์ของกราฟนั้น มักจะใช้การพิสูจน์อุปนัยเชิงคณิตศาสตร์ หากผู้วิจัยต้องการให้การเขียนการพิสูจน์ที่ชัดเจนขึ้นอาจจะต้องใช้วิธีการแสดงรูปเพื่อความชัดเจนมากยิ่งขึ้นประกอบกันได้

7.2. ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

7.2.1 ยังมีปัญหาอื่นที่สัมพันธ์กับทฤษฎีการปรากฏค่าของกราฟพารามิเตอร์ คือปัญหาการหาค่าสุดขีดของกราฟพารามิเตอร์ (Extremal Problem) นั่นก็คือปัญหาการหาค่าขอบเขตของกราฟพารามิเตอร์บนคลาสที่กำหนด จากงานวิจัยครั้งนี้สามารถต่อยอดในการทำงานวิจัยในการหาค่าขอบเขตของลิเนียร์อาร์บอริซิตี้ ลิเนียร์ k อาร์บอริซิตี้ บนคลาสของกราฟอย่างง่ายและกราฟเชื่อมโยงที่มี m เส้น และ n จุด โดยการหาขอบเขตบนและขอบเขตล่างในเทอมของจำนวนจุดจำนวนเส้นของกราฟ

7.2.2 นักวิจัยสามารถทำการวิจัยโดยการพิจารณาเพียงกราฟพารามิเตอร์เดียวบนคลาสของกราฟโดยการพิจารณาเป็น 2 ประเด็นคือ การพิจารณาว่ากราฟพารามิเตอร์นั้นเป็นกราฟพารามิเตอร์ที่ปรากฏทุกค่าบนคลาสของกราฟที่พิจารณาหรือไม่ และการศึกษาปัญหาค่าขีดสุดของกราฟพารามิเตอร์บนคลาสของกราฟที่พิจารณา

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวัชน อัครสัมฤทธิ์ ผู้เป็นที่ปรึกษาตลอดการดำเนินการวิจัย ณาจารย์หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาคณิตศาสตร์ เจ้าหน้าที่ และบุคลากรของคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม ที่ให้การช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ในการดำเนินงานวิจัยจนงานวิจัยสำเร็จด้วยดี ท้ายที่สุด ขอขอบพระคุณอธิการบดี รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและการพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำงานวิจัย และให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Chartrand, "The theory and application of graphs," in *The Fourth International Conference on the Theory and Application of graphs*, Western Michigan University, Kalamazoo, Michigan, May 6-8, 1980.
- [2] N. Punnnim, "Degree Sequences and Chromatic Numbers of Graphs," *Graphs and Combinatorics*, Vol. 18, no. 3, pp. 597-603, October 2002.
- [3] N. Punnnim, "The Clique Numbers of Regular Graphs," *Graphs and Combinatorics*, Vol. 18, no. 4, pp. 781-785, December 2002.
- [4] N. Punnnim, "On Maximum Induced Forests in Graphs," *Southeast Asian Bulletin of Mathematics*, Vol. 27, no. 4, pp. 667-674, October 2003.
- [5] N. Punnnim, "The Matching Number of Regular Graphs," *Thai Journal of Mathematics*, Vol. 2, no. 1, pp. 133-140, January 2004.
- [6] N. Punnnim, "Interpolation Theorems on Graph Parameters," *Southeast Asian Bulletin of Mathematics*, Vol. 28, no. 3, pp. 533-538, January 2004.
- [7] N. Punnnim, "Interpolation Theorems in Jump Graphs," *Australasian Journal of Combinatorics*, Vol. 39, no. 1, pp. 103-111, January 2007.
- [8] A. Chaemchan, "Bounds on the Arboricities of Connected Graphs," *Australasian Journal of*

Combinatorics, Vol. 49, pp. 209-215, February 2011.

- [9] A. Chantasartassmee and N. Punnim, "An Intermediate Value Theorem for the Arboricities," *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*. Vol. 2011, no. 1, pp. 1-7, June 2011.
- [10] J. A. Bondy and U. S. R. Murty, *Graph theory with applications*, London: Macmillan, 1976.
- [11] C. S. J. Nash-William, "Edge-disjoint Spanning Trees of Finite Graphs," *Journal of the London Mathematical Society*, Vol. 1, no. 1, pp. 445-450, December 1961.

การคำนวณหาระยะยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลาภายใต้แรงภายนอกฟังก์ชันไซน์
ในการเคลื่อนที่สั่นแบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

Calculation the Equation of Spring Collapse Distance as a Function of Time
via External Force Squared Sine Function in Simple Harmonic Motion

อาทิตย์ หูเต็ม^{1*}, เจษฎาพร ปาคำวัง² และ กาญจน์ คุ่มทรัพย์³

^{1,3}สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

²สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

Artit Hutem^{1*}, Jetsadaporn Pakamwang² and Kan Khoomsab³

^{1,3}Division of Science Education, Faculty of Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University

²Division of Computer Science, Faculty of Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University

artithutem@pcru.ac.th

Received 28 September 2024

Revised 09 November 2024

Accepted 17 December 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณหาสมการระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระบบวัตถุ
มวล m_a เคลื่อนที่ด้วยแรงภายนอก $f_0 \sin(\omega_f t)$ เข้าชนปลายสปริงที่มีค่าคงที่สปริง k ซึ่งติดกับมวล m_b ซึ่งใน
งานวิจัยนี้ใช้กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่สองเขียนสมการการเคลื่อนที่ แล้วใช้คณิตศาสตร์เรื่องสมการเชิงอนุพันธ์
อันดับที่สองแบบไม่เอกพันธ์มาคำนวณหาสมการระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา และคำนวณหา
สมการการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ตอนที่วัตถุสองก้อนชนกันที่สปริงขึ้นกลาง ซึ่งผลจากการคำนวณค่า
ระยะทางยุบตัวของสปริงจะมีการสั่นที่เกิดจำนวนลูกคลื่นลดลง เมื่อค่าคงที่สปริงมีขนาดเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: การกระจัด, ระยะทางยุบตัวของสปริง, แรงภายนอกเริ่มต้น

Abstract

This research aims to calculate the equation of spring collapse distance as a function of time. In a system of objects, mass m_a moves with an external force $f_0 \sin(\omega_f t)$ against the end of a spring attached to mass m_b . In this research, Newton's second law of motion is used to write the equations of motion of this system. We use the mathematics of nonhomogeneous second-order differential equations to calculate the equation of displacement of the spring as a function of time and to calculate the equation of displacement between mass m_a and mass m_b when the two objects collide at the intermediate spring. The result of the calculation of the spring compression distance will have a decrease in the number of ripples when the spring constant increases.

Keywords: Displacement, Spring-collapse Distance, Initial External Force

1. บทนำ

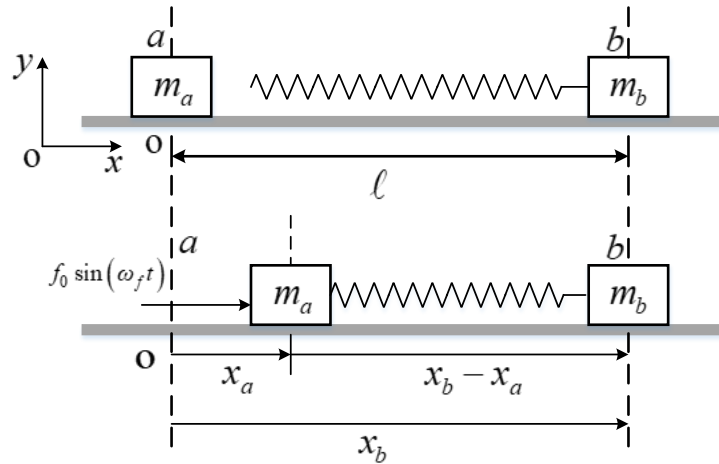
รายวิชาการศาสตร์คลาสสิก 1 ในหัวข้อเกี่ยวกับกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน และการเคลื่อนที่สั่นแบบฮาร์มอนิก ได้มีการอธิบายและแสดงวิธีการคำนวณเกี่ยวกับอนุภาคมวล m_1 ที่เคลื่อนที่เข้าชนกับวัตถุมวล m_2 ที่ติดสปริงกับมวล m_3 ซึ่งในรายวิชาการศาสตร์คลาสสิก 1 ได้อธิบายหลักการของโมเมนตัมหลักการดังกล่าวได้มีการนำไปออกเป็นข้อสอบคัดเลือกโอลิมปิกในการสอบแข่งขัน สอวน. [1] ประจำปี พ.ศ. 2547 (รอบที่ 1) วิชาฟิสิกส์ สอบวันอาทิตย์ ที่ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2547 เวลา 08.00 น.-10.00 น. โจทย์ที่ใช้ในการแข่งขันทางวิชาการในโครงการต่าง ๆ ที่มักจะถูกออกแบบให้ผู้เรียนฝึกฝนความสามารถในการคิดวิเคราะห์และการแก้ปัญหาเชิงซับซ้อน ซึ่งการออกแบบโจทย์เช่นนี้ไม่ได้จำกัดเฉพาะในบริบทของประเทศไทยเท่านั้น แต่ยังครอบคลุมถึงการแข่งขันในระดับนานาชาติอีกด้วย การวางรากฐานของความเข้าใจในโจทย์ลักษณะนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาทักษะการเรียนรู้คิดวิเคราะห์ของผู้เรียนในรายวิชาฟิสิกส์ในระยะยาว ซึ่งในโครงการสอบแข่งขันฟิสิกส์ สอวน. ได้มีโจทย์เกี่ยวกับการคำนวณหาระยะทางยุบตัวของสปริง และเวลาที่วัตถุมวล m_1 เคลื่อนที่เข้าชนมวล m_2 จนสปริงหดตัว ซึ่งในการวิเคราะห์ระบบแบบนี้ต้องใช้หลักการกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน และคณิตศาสตร์เรื่องสมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งนักเรียน ณ. โรงเรียนแห่งหนึ่งของจังหวัดเพชรบูรณ์ได้เรียนรายวิชาฟิสิกส์ สอวน. (สอวน.คือ ศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาทักษะทางการศึกษาเกี่ยวกับวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ภายใต้พระอุปถัมภ์สมเด็จพระเจ้าพี่นางเธอเจ้าฟ้ากัลยาณิวัฒนา กรมหลวงนราธิวาสราชนครินทร์) ซึ่งข้าพเจ้าได้ทำการสอนในเนื้อหากฎการเคลื่อนที่ของนิวตันซึ่งมีนักเรียนมาถามโจทย์ลักษณะแบบนี้ ซึ่งทำให้ข้าพเจ้าได้เกิดความคิดขยายระบบการเคลื่อนที่ที่เป็นระบบวัตถุมวล m_a เคลื่อนที่ด้วยแรงภายนอก $f_0 \sin(\omega_f t)$ โดยที่ f_0 ขนาดแรงภายนอกเริ่มต้น $\omega_f = 2\pi f$ เป็นค่าความถี่เชิงมุม โดยมีค่าความถี่ f เข้าชนปลายสปริงที่มีค่าคงที่สปริง k ซึ่งติดกับมวล m_b ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่คิดผลของแรงเสียดทาน ดังรูปที่ 1 วัตถุประสงคิในงานวิจัยนี้ต้องการคำนวณหาสมการระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา

2. ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้คือ คำนวณหาสมการระยะทางยุบตัวของสปริงที่ติดกับมวล m_b ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาในระบบวัตถุมวล m_a เคลื่อนที่ด้วยแรงภายนอก $f_0 \sin(\omega_f t)$ ซึ่งมีลักษณะการสั่นแบบสม่ำเสมอ เข้าชนแบบยืดหยุ่นปลายสปริงที่มีค่าคงที่สปริง k ซึ่งติดกับมวล m_b ไม่ตรึงอยู่กับที่ ซึ่งงานวิจัยนี้ไม่ได้คิดแรงเสียดทานระหว่างพื้นกับมวล m_a และมวล m_b ดังรูปที่ 1 และทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลากับตัวแปรต้น เช่น ค่าคงที่สปริง k และค่าแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 เป็นต้น และคำนวณหาสมการการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ตอนที่วัตถุสองก้อนชนกันที่มีสปริงชั้นกลาง

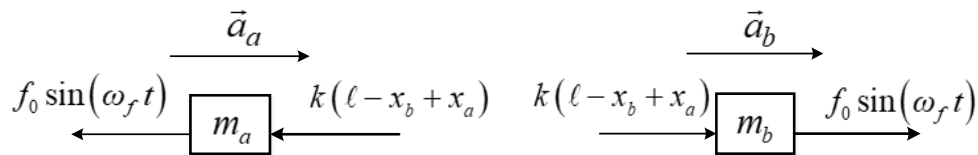
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้พิจารณาตำแหน่ง a มีมวล m_a ถูกแรงภายนอก $f_0 \sin(\omega_f t)$ [6] เคลื่อนที่เข้าชนปลายสปริงที่มีค่าคงที่สปริง k ซึ่งติดกับมวล m_b ณ ตำแหน่ง b เทียบกับจุด o ซึ่งอยู่ในกรอบอ้างอิงเฉื่อย จากรูปที่ 1 กำหนดให้ ℓ คือระยะห่างระหว่างมวล m_a กับ m_b ขณะที่สปริงไม่ยืดไม่หดเป็นค่าคงที่ การบอกตำแหน่งของมวลทั้ง 2 ก้อน เราใช้จุด o เป็นจุดอ้างอิงกรอบเฉื่อย และมวล m_b ไม่ตรึงอยู่กับที่ ซึ่งในขณะที่ ณ ตำแหน่ง a และตำแหน่ง b เคลื่อนที่ได้การกระจัดที่เป็นฟังก์ชันของเวลาเป็น $x_a(t)$ และ $x_b(t)$ ตามลำดับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่คิดผลของแรงเสียดทานของระบบ ในที่นี้กำหนดให้ระยะที่สปริงถูกยุบ $\ell - (x_b - x_a)$ เป็นฟังก์ชันของเวลาดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงการเคลื่อนที่ของวัตถุมวล m_a เคลื่อนที่เข้าชนกับมวล m_b ที่ติดสปริง ซึ่งไม่คิดผลของแรงเสียดทาน

สปริงก็ออกแรงผลักมวล m_a ด้วยขนาดของแรงคืนตัว $k(\ell - x_b + x_a)$ และ $f_0 \sin(\omega_f t)$ สปริงก็ออกแรงผลักมวล m_b ด้วยขนาดของแรงคืนตัว $k(\ell - x_b + x_a)$ และ $f_0 \sin(\omega_f t)$ [11,13]



รูปที่ 2 แสดงการแตกแรงภายนอก กับแรงคืนตัวของสปริงที่กระทำต่อวัตถุมวล m_a และ m_b

จากรูปที่ 1 พิจารณาการเคลื่อนที่ของมวล m_a โดยใช้กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่สอง $\Sigma \vec{F} = m_a \vec{a}$ [6-7] สมการการเคลื่อนที่ของวัตถุมวล m_a ดังนี้

$$-f_0 \sin(\omega_f t) - k(\ell - x_b(t) + x_a(t)) = m_a \frac{d^2 x_a(t)}{dt^2} \quad (1)$$

พิจารณาการเคลื่อนที่ของมวล m_b โดยใช้กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่สอง $\Sigma \vec{F} = m_b \vec{a}$ [8-10] สมการการเคลื่อนที่ของวัตถุมวล m_b [3-4] ดังนี้

$$f_0 \sin(\omega_f t) + k(\ell - x_b(t) + x_a(t)) = m_b \frac{d^2 x_b(t)}{dt^2} \quad (2)$$

นำวัตถุมวล m_b คูณสมการที่ (1) จะได้

$$-f_0 m_b \sin(\omega_f t) - k m_b (\ell - x_b(t) + x_a(t)) = m_a m_b \frac{d^2 x_a(t)}{dt^2} \quad (3)$$

นำวัตถุมวล m_a คูณสมการที่ (2) จะได้

$$f_0 m_a \sin(\omega_f t) + k m_a (\ell - x_b(t) + x_a(t)) = m_a m_b \frac{d^2 x_b(t)}{dt^2} \quad (4)$$

นำสมการที่ (4) ลบ สมการที่ (3) จะได้

$$m_a m_b \left(\frac{d^2 x_b}{dt^2} - \frac{d^2 x_a}{dt^2} \right) = k(m_a + m_b)(\ell - x_b + x_a) + f_0(m_a + m_b) \sin(\omega_f t) \quad (5)$$

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ ℓ คือ ระยะห่างระหว่างมวล m_a กับ m_b ขณะที่สปริงไม่ยืดไม่หดเป็นค่าคงที่ จากสมการที่ (5) ทางซ้ายมือตรงผลต่างของอนุพันธ์อันดับที่สองสามารถเขียนระยะสปริงที่ถูกยุบ เป็น $\ell - (x_b(t) - x_a(t))$ แทนลงในสมการที่ (5) ดังนี้

$$\begin{aligned} -\frac{d^2}{dt^2}(\ell - (x_b(t) - x_a(t))) &= \frac{k(m_a + m_b)}{m_a m_b}(\ell - (x_b(t) - x_a(t))) + \frac{f_0(m_a + m_b)}{m_a m_b} \sin(\omega_f t) \\ \frac{d^2}{dt^2}(\ell - (x_b(t) - x_a(t))) + \frac{k(m_a + m_b)}{m_a m_b}(\ell - x_b(t) + x_a(t)) &= -\frac{f_0(m_a + m_b)}{m_a m_b} \sin(\omega_f t) \end{aligned} \quad (6)$$

กำหนดให้ $\kappa_d(t) = \ell - (x_b(t) - x_a(t))$ และ $\beta = -f_0(m_a + m_b)/m_a m_b$ และ $\omega^2 = k(m_a + m_b)/m_a m_b$ โดยที่ ω เรียกว่าความถี่เชิงมุมในการสั่นของระบบมวล โดยที่

$$\frac{m_a + m_b}{m_a m_b} = \frac{1}{\frac{m_a m_b}{m_a + m_b}} = \frac{1}{\mu_r}$$

โดยที่ μ_r ถูกเรียกว่า มวลลดทอน (reduce mass) เราสามารถเขียนสมการที่ (6) จะได้

$$\frac{d^2 \kappa_d(t)}{dt^2} + \omega^2 \kappa_d(t) = \beta \sin(\omega_f t) \quad (7)$$

สมการที่ (7) เรียกว่า สมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่สองแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งจะมีผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่สอง [2, 5] ดังนี้ $\kappa_d(t) = \kappa_d^c(t) + \kappa_d^p(t)$ ต่อไปทำการหาผลเฉลยทั่วไป $\kappa_d^c(t)$ [12] โดย ทางขวามือของสมการที่ (7) ต้องมีค่าเป็นศูนย์ ดังนี้

$$\frac{d^2 \kappa_d}{dt^2} + \omega^2 \kappa_d = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \kappa_d^c(t) &= A \cos(\omega t) \cos(\varphi) - A \sin(\omega t) \sin(\varphi) \\ \kappa_d^c(t) &= A \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (9)$$

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ $\kappa_{d1}^c(t) = \cos(\omega t)$ และ $\kappa_{d2}^c(t) = \sin(\omega t)$ [12] ทำการหาอนุพันธ์ของ $\kappa_{d1}^c(t)$ และ $\kappa_{d2}^c(t)$ เทียบกับเวลา จะได้ $\kappa_{d1}^{c'}(t) = -\omega \sin(\omega t)$ และ $\kappa_{d2}^{c'}(t) = \omega \cos(\omega t)$ ต่อทำการหาผลเฉลย เฉพาะ $\kappa_d^p(t)$ โดยใช้วิธีรอนเสกียน [2]

$$W = \begin{vmatrix} \kappa_{d1}^c(t) & \kappa_{d2}^c(t) \\ \kappa_{d1}^{c'}(t) & \kappa_{d2}^{c'}(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\omega \sin(\omega t) & \omega \cos(\omega t) \end{vmatrix} = \omega \quad (10)$$

$$W_1 = \begin{vmatrix} 0 & \kappa_{d2}^c(t) \\ f_k^w(t) & \kappa_{d2}^{c'}(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & \sin(\omega t) \\ \beta \sin(\omega_f t) & \omega \cos(\omega t) \end{vmatrix} = -\beta \sin(\omega_f t) \sin(\omega t) \quad (11)$$

$$W_2 = \begin{vmatrix} \kappa_{d1}^c(t) & 0 \\ \kappa_{d1}^{c'}(t) & f_k^w(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos(\omega t) & 0 \\ -\omega \sin(\omega t) & \beta \sin(\omega_f t) \end{vmatrix} = \beta \sin(\omega_f t) \cos(\omega t) \quad (12)$$

$$\frac{du_w^1}{dt} = \frac{W_1}{W} = -\frac{\beta \sin(\omega_f t) \sin(\omega t)}{\omega} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} u_w^1(t) &= -\frac{\beta}{2\omega} \int_0^t 2 \sin(\omega_f t) \sin(\omega t) dt \\ u_w^1(t) &= \frac{\beta}{2\omega} \left(\frac{\sin((\omega_f + \omega)t)}{(\omega_f + \omega)} - \frac{\sin((\omega_f - \omega)t)}{(\omega_f - \omega)} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{du_w^2}{dt} = \frac{W_2}{W} = \frac{\beta \sin(\omega_f t) \cos(\omega t)}{\omega} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} u_w^2(t) &= \frac{\beta}{2\omega} \int_0^t 2 \sin(\omega_f t) \cos(\omega t) dt \\ u_w^2(t) &= \frac{\beta}{2\omega} \left(\frac{(1 - \cos((\omega_f + \omega)t))}{(\omega_f + \omega)} - \frac{(1 - \cos((\omega_f - \omega)t))}{(\omega_f - \omega)} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
\kappa_d^p(t) &= u_w^1(t)\kappa_{d1}^c(t) + u_w^2(t)\kappa_{d2}^c(t) \\
\kappa_d^p(t) &= \frac{\beta \cos(\omega t)}{2\omega} \left(\frac{\sin((\omega_f + \omega)t)}{(\omega_f + \omega)} - \frac{\sin((\omega_f - \omega)t)}{(\omega_f - \omega)} \right) \\
&\quad + \frac{\beta \sin(\omega t)}{2\omega} \left(\frac{(1 - \cos((\omega_f + \omega)t))}{(\omega_f + \omega)} - \frac{(1 - \cos((\omega_f - \omega)t))}{(\omega_f - \omega)} \right)
\end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
\kappa_d(t) &= \kappa_d^c(t) + \kappa_d^p(t) \\
\kappa_d(t) &= A \cos(\omega t + \varphi) + \frac{\beta \cos(\omega t)}{2\omega} \left(\frac{\sin((\omega_f + \omega)t)}{(\omega_f + \omega)} - \frac{\sin((\omega_f - \omega)t)}{(\omega_f - \omega)} \right) \\
&\quad + \frac{\beta \sin(\omega t)}{2\omega} \left(\frac{(1 - \cos((\omega_f + \omega)t))}{(\omega_f + \omega)} - \frac{(1 - \cos((\omega_f - \omega)t))}{(\omega_f - \omega)} \right)
\end{aligned} \tag{18}$$

สมการที่ (18) เรียกว่า ระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา

$$\begin{aligned}
x_b(t) - x_a(t) &= \ell - A \cos(\omega t + \varphi) - \frac{\beta \cos(\omega t)}{2\omega} \left(\frac{\sin((\omega_f + \omega)t)}{(\omega_f + \omega)} - \frac{\sin((\omega_f - \omega)t)}{(\omega_f - \omega)} \right) \\
&\quad - \frac{\beta \sin(\omega t)}{2\omega} \left(\frac{(1 - \cos((\omega_f + \omega)t))}{(\omega_f + \omega)} - \frac{(1 - \cos((\omega_f - \omega)t))}{(\omega_f - \omega)} \right)
\end{aligned} \tag{19}$$

สมการที่ (19) เรียกว่า การกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ตอนที่วัตถุสองก้อนชนกันที่สปริงขึ้นกลาง จากสมการที่ (19) ถ้าเงื่อนไขขอบเขต คือ $t = 0s$ และ $x_b(0) = \ell$ และ $x_a(0) = 0$ แทนลงในสมการที่ (19) จะได้

$$\begin{aligned}
\ell - 0 &= \ell - A - \left(\frac{\beta}{2\omega}(0) - \left(\frac{\beta(0)}{2\omega} \left(\frac{1-1}{(\omega_f + \omega)} - \frac{1-1}{(\omega_f - \omega)} \right) \right) \right) \\
\ell &= \ell - A
\end{aligned} \tag{20}$$

ℓ ระยะทางระหว่างมวล m_a กับ m_b เปลี่ยนแปลงตามค่าแอมพลิจูดเริ่มต้นของการสั่นในผลเฉลยทั่วไป $\kappa_d^c(t)$

4. การดำเนินการวิจัย

จากรูปที่ 1 พิจารณาการเคลื่อนที่ของมวล m_a โดยใช้กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่สอง $\Sigma \vec{F} = m_a \vec{a}$ [14-16] สมการการเคลื่อนที่ของวัตถุมวล m_a ดังสมการที่ (1) และ พิจารณาการเคลื่อนที่ของมวล m_b โดยใช้กฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่สอง $\Sigma \vec{F} = m_b \vec{a}$ สมการการเคลื่อนที่ของวัตถุมวล m_b ดังสมการที่ (2) ทำการคำนวณหา

ระยะทางยุบตัวของสปริงโดยใช้วิธีการปัญหาของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่ 2 แบบไม่เอกพันธ์ และใช้เทคนิคการอินทิเกรต จะได้ระยะทางยุบตัวของสปริง ดังนี้

$$\kappa_d(t) = A \cos(\omega t + \varphi) + \frac{\beta \cos(\omega t)}{2\omega} \left(\frac{\sin((\omega_f + \omega)t)}{(\omega_f + \omega)} - \frac{\sin((\omega_f - \omega)t)}{(\omega_f - \omega)} \right) + \frac{\beta \sin(\omega t)}{2\omega} \left(\frac{(1 - \cos((\omega_f + \omega)t))}{(\omega_f + \omega)} - \frac{(1 - \cos((\omega_f - \omega)t))}{(\omega_f - \omega)} \right)$$

นำสมการระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลาไปทำการเขียนกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม $\kappa_d(t)$ กับตัวแปรต้น เช่น ค่าคงสปริง k และมวล m_a และ m_b และแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 การกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b

$$x_b(t) - x_a(t) = \ell - A \cos(\omega t + \varphi) - \frac{\beta \cos(\omega t)}{2\omega} \left(\frac{\sin((\omega_f + \omega)t)}{(\omega_f + \omega)} - \frac{\sin((\omega_f - \omega)t)}{(\omega_f - \omega)} \right) - \frac{\beta \sin(\omega t)}{2\omega} \left(\frac{(1 - \cos((\omega_f + \omega)t))}{(\omega_f + \omega)} - \frac{(1 - \cos((\omega_f - \omega)t))}{(\omega_f - \omega)} \right)$$

นำสมการการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาไปทำการเขียนกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม $x_b(t) - x_a(t)$ กับตัวแปรต้น เช่น ค่าคงสปริง k และมวล m_a และ m_b และแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 ในงานวิจัยนี้นำสมการที่ (18) ที่เรียกว่าระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา และสมการที่ (19) ที่เรียกว่า การกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ตอนที่วัตถุสองก้อนชนกันที่สปริงชั้นกลางมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น กับตัวแปรตาม และตัวแปรควบคุมในการสั่นของระบบมวล m_a และ m_b ดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 ในกรณีที่ ตัวแปรต้นคือค่าคงสปริง $k_1 = 10$, เป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยม $k_2 = 12 \text{ N/m}$, เป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยม $k_3 = 14 \text{ N/m}$ เป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยม ถ้าค่าคงสปริงเพิ่มขึ้นทำให้ตัวแปรตามคือ ระยะทางยุบตัวของสปริง $\kappa_d(t)$ มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามกราฟที่สอดคล้องรูปที่ 4(a) ต่อมาตัวแปรต้นคือค่ามวล $m_a = 0.065 \text{ kg}$ เป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยม มวล $m_a = 0.068 \text{ kg}$ เป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยม มวล $m_a = 0.071 \text{ kg}$ เป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยม ถ้าค่ามวล m_a มีขนาดเพิ่มขึ้น ทำให้ตัวแปรตาม คือ ระยะทางยุบตัวของสปริง $\kappa_d(t)$ มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามกราฟที่สอดคล้องรูปที่ 3(a) ต่อมาตัวแปรต้นคือค่ามวล $m_b = 0.065 \text{ kg}$ เป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยม มวล $m_b = 0.068 \text{ kg}$ เป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยม มวล $m_b = 0.071 \text{ kg}$ เป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยม ถ้าค่ามวล m_b มีขนาดเพิ่มขึ้น ทำให้ตัวแปรตาม คือ ระยะทางยุบตัวของสปริง $\kappa_d(t)$ มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามกราฟที่สอดคล้องรูปที่ 3(b) ต่อมาตัวแปรต้นคือค่าแรงภายนอกเริ่มต้น $f_0 = 2 \text{ N}$ เป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยม ค่าแรงภายนอกเริ่มต้น $f_0 = 3 \text{ N}$ เป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยม และค่าแรงภายนอกเริ่มต้น $f_0 = 4 \text{ N}$ เป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยม ถ้าค่าแรงภายนอกเริ่มต้นเพิ่มขึ้นทำให้ตัวแปรตาม คือ ระยะทางยุบตัวของสปริง $\kappa_d(t)$ มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามกราฟที่สอดคล้องรูปที่ 4(b) ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวแปรต้นคือค่าคงสปริง $k_1 = 10$, เป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยม $k_2 = 12 \text{ N/m}$, เป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยม $k_3 = 14 \text{ N/m}$ เป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยม ถ้าค่าคงสปริงเพิ่มขึ้นทำให้ตัวแปรตามคือ การกระจัดระหว่างมวล $x_b(t) - x_a(t)$ มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามกราฟที่สอดคล้องรูปที่ 7(a)

ตารางที่ 1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น ตัวแปรตาม และตัวแปรควบคุมของสมการที่ (18) และ (19)

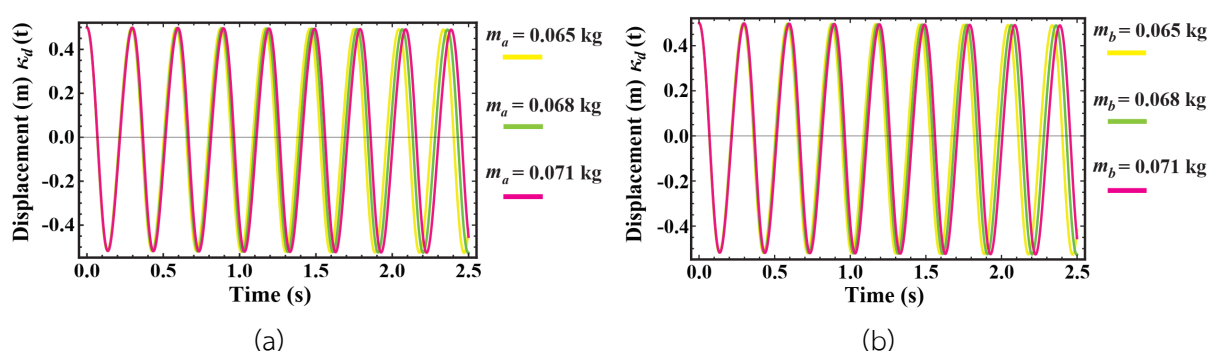
ตัวแปรตาม	ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรต้น
ระยะทางยุบตัวของสปริง $\kappa_d(t)$	$A = 0.5, m_a = 0.065 \text{ kg}, f_0 = 1 \text{ N.},$ $\phi = 0 \text{ rad } m_b = 0.0645 \text{ kg } f = 0.01 \text{ Hz}$	ค่าคงสปริง $k_1 = 10,$  $k_2 = 12 \text{ N/m},$  $k_3 = 14 \text{ N/m}$ 
	$A = 0.5, k = 15 \text{ N/m}, f_0 = 1 \text{ N.}, \phi = 0 \text{ rad}$ $m_b = 0.0645 \text{ kg } f = 0.01 \text{ Hz}$	มวล $m_a = 0.065 \text{ kg}$  $m_a = 0.068 \text{ kg}$  $m_a = 0.071 \text{ kg}$ 
	$A = 0.5, k = 15 \text{ N/m}, f_0 = 1 \text{ N.}, \phi = 0 \text{ rad}$ $m_a = 0.0645 \text{ kg } f = 0.01 \text{ Hz}$	มวล $m_b = 0.065 \text{ kg}$  $m_b = 0.068 \text{ kg}$  $m_b = 0.071 \text{ kg}$ 
	$A = 0.5, m_a = 0.065 \text{ kg}, k = 15 \text{ N/m},$ $\phi = 0 \text{ rad } m_b = 0.0645 \text{ kg } f = 0.01 \text{ Hz}$	แรงเริ่มต้น $f_0 = 2 \text{ N}$  $f_0 = 3 \text{ N}$  $f_0 = 4 \text{ N}$ 
ตัวแปรตาม	ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรต้น
การกระจัดระหว่างมวล $x_b(t) - x_a(t)$	$A = 0.5, m_a = 0.065 \text{ kg}, f_0 = 1 \text{ N.},$ $\phi = 0 \text{ rad } m_b = 0.0645 \text{ kg } f = 0.01 \text{ Hz}$ $\ell = 0.5 \text{ m.}$	ค่าคงสปริง $k_1 = 10$  $k_2 = 12 \text{ N/m}$  $k_3 = 14 \text{ N/m}$ 
	$A = 0.5, k = 15 \text{ N/m}, f_0 = 1 \text{ N.}, \phi = 0 \text{ rad}$ $m_b = 0.0645 \text{ kg } f = 0.01 \text{ Hz } \ell = 0.5 \text{ m.}$	มวล $m_a = 0.065 \text{ kg}$  $m_a = 0.068 \text{ kg}$  $m_a = 0.071 \text{ kg}$ 
	$A = 0.5, k = 15 \text{ N/m}, f_0 = 1 \text{ N.}, \phi = 0 \text{ rad}$ $m_a = 0.0645 \text{ kg } f = 0.01 \text{ Hz } \ell = 0.5 \text{ m.}$	มวล $m_b = 0.065 \text{ kg}$  $m_b = 0.068 \text{ kg}$  $m_b = 0.071 \text{ kg}$ 
	$A = 0.5, m_a = 0.065 \text{ kg}, k = 15 \text{ N/m},$ $\phi = 0 \text{ rad } m_b = 0.0645 \text{ kg } f = 0.01 \text{ Hz}$ $\ell = 0.5 \text{ m.}$	แรงเริ่มต้น $f_0 = 2 \text{ N}$  $f_0 = 3 \text{ N}$  $f_0 = 4 \text{ N}$ 

ต่อมาตัวแปรต้นคือค่ามวล $m_a = 0.065 \text{ kg}$ เป็นเส้นกราฟสีดำ มวล $m_a = 0.068 \text{ kg}$ เป็นเส้นกราฟสีฟ้า มวล $m_a = 0.071 \text{ kg}$ เป็นเส้นกราฟสีแดง ถ้าค่ามวล m_a มีขนาดเพิ่มขึ้น ทำให้ตัวแปรตาม คือ การกระจัดระหว่างมวล $x_b(t) - x_a(t)$ มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามกราฟที่สอดคล้องรูปที่ 6(a) ต่อมาตัวแปรต้นคือค่ามวล $m_b = 0.065 \text{ kg}$ เป็นเส้นกราฟสีดำ มวล $m_b = 0.068 \text{ kg}$ เป็นเส้นกราฟสีฟ้า มวล $m_b = 0.071 \text{ kg}$ เป็นเส้นกราฟสีแดง ถ้าค่ามวล m_b มีขนาดเพิ่มขึ้นทำให้ตัวแปรตาม คือ การกระจัดระหว่างมวล $x_b(t) - x_a(t)$ มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามกราฟที่สอดคล้อง

รูปที่ 6(b) ต่อมาตัวแปรต้นคือค่าแรงภายนอกเริ่มต้น $f_0 = 2\text{ N}$ เป็นเส้นกราฟสีดำ ค่าแรงภายนอกเริ่มต้น $f_0 = 3\text{ N}$ เป็นเส้นกราฟสีฟ้า และค่าแรงภายนอกเริ่มต้น $f_0 = 4\text{ N}$ เป็นเส้นกราฟสีแดง ถ้าค่าแรงภายนอกเริ่มต้นเพิ่มขึ้นทำให้ตัวแปรตาม คือ การกระจัดระหว่างมวล $x_b(t) - x_a(t)$ มีขนาดเปลี่ยนแปลงตามกราฟที่สอดคล้องรูปที่ 7(b)

5. ผลการวิจัย

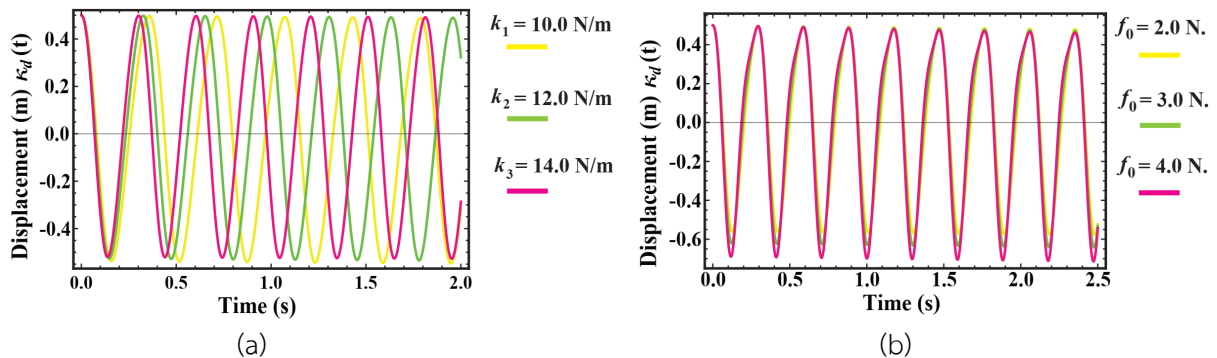
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการแสดงกราฟของสมการระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลากับระหว่างตัวแปรตาม $\kappa_d(t)$ กับตัวแปรต้น เช่น ค่าคงสปริง k และมวล m_a และ m_b และแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ต่อมานำสมการการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาไปทำการเขียนกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม $x_b(t) - x_a(t)$ กับตัวแปรต้น เช่น ค่าคงสปริง k และมวล m_a และ m_b และแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 ตามตารางที่ 1 แสดงกราฟได้ดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6



รูปที่ 3 กราฟแสดงระยะทางยุบตัวของสปริงกับเวลา (a) ในกรณีที่ขนาดของ $m_a > m_b$ มวล m_a เปลี่ยนแปลงจาก $0.065 \rightarrow 0.071\text{ kg}$ (b) ในกรณีที่ขนาดของ $m_a < m_b$ มวล m_b เปลี่ยนแปลงจาก $0.065 \rightarrow 0.071\text{ kg}$

จากรูปที่ 3(a) แสดงกราฟระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลาเมื่อขนาดของมวล m_a เปลี่ยนแปลงจาก 0.065 kg ไปเป็น 0.071 kg ซึ่งขนาดของมวล m_b เท่ากับ 0.0645 kg เส้นกราฟสีเหลือง คือ กราฟระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ เมื่อขนาดของมวล m_a เป็น 0.065 kg ต่อมาเส้นกราฟสีเขียว คือ กราฟระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ เมื่อขนาดของมวล m_a เป็น 0.068 kg ต่อมาเส้นกราฟสีชมพู คือ กราฟระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ เมื่อขนาดของมวล m_a เป็น 0.071 kg ถ้าขนาดค่าของมวล m_a มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เกิดค่าของความยาวคลื่นของการสั่นในตัวแปรระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ มากขึ้น และค่าของระยะทางยุบตัวของสปริง $\kappa_d(t)$ วัดจาก 0.0 การสั่นค่าบวก มีค่าเท่ากับ 0.5 m มีค่าขนาดเท่ากับการสั่นค่าลบ คือค่าเท่ากับ 0.5 m เมื่อมวล m_a เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง เข้าชนปลายสปริงที่ติดกับมวล m_b จะทำให้มวล m_b เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง จากรูปที่ 3(b) แสดงกราฟระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลาเมื่อขนาดของมวล m_b เปลี่ยนแปลงจาก 0.065 kg ไปเป็น 0.071 kg ซึ่งขนาดของมวล m_a เท่ากับ 0.0645 kg เส้นกราฟสีเหลือง คือ กราฟระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ เมื่อขนาดของมวล m_b เป็น 0.065 kg ต่อมาเส้นกราฟสีเขียว คือ กราฟระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ เมื่อขนาดของมวล m_b เป็น 0.068 kg ต่อมาเส้นกราฟสีชมพู คือ กราฟระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ เมื่อขนาดของมวล m_b เป็น 0.071 kg ถ้าขนาดค่าของมวล m_b มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เกิดค่าของความยาวคลื่นของการสั่น

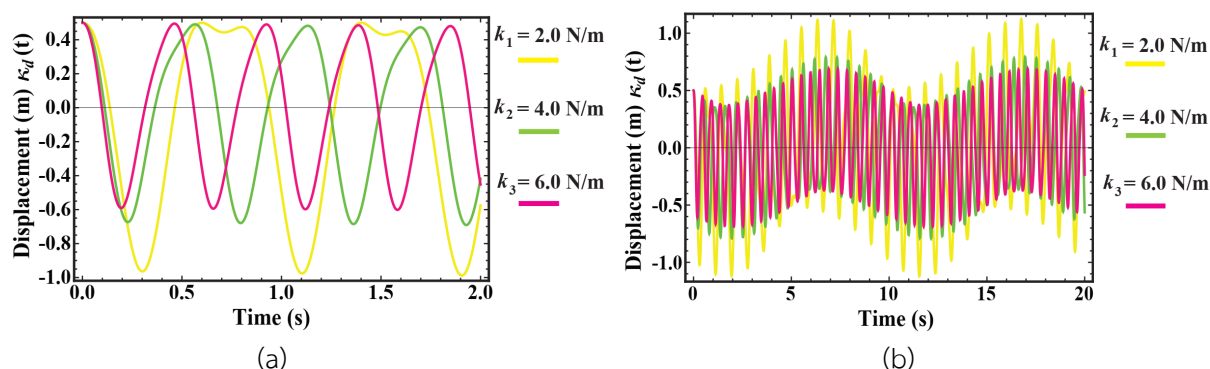
ในตัวแปรระยะทางยวบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ มากขึ้น และค่าของระยะทางยวบตัวของสปริง $\kappa_d(t)$ การสั่นค่าบวก มีค่าเท่ากับ 0.5 m มีค่าขนาดเท่ากับการสั่นค่าลบ คือค่าเท่ากับ 0.5 m



รูปที่ 4 กราฟแสดงระยะทางยวบตัวของสปริงกับเวลา (a) ค่าคงที่ของสปริง k เปลี่ยน $10 \rightarrow 14\text{ N/m}$ (b) ค่าคงที่ของแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 เปลี่ยน $2 \rightarrow 4\text{ N}$

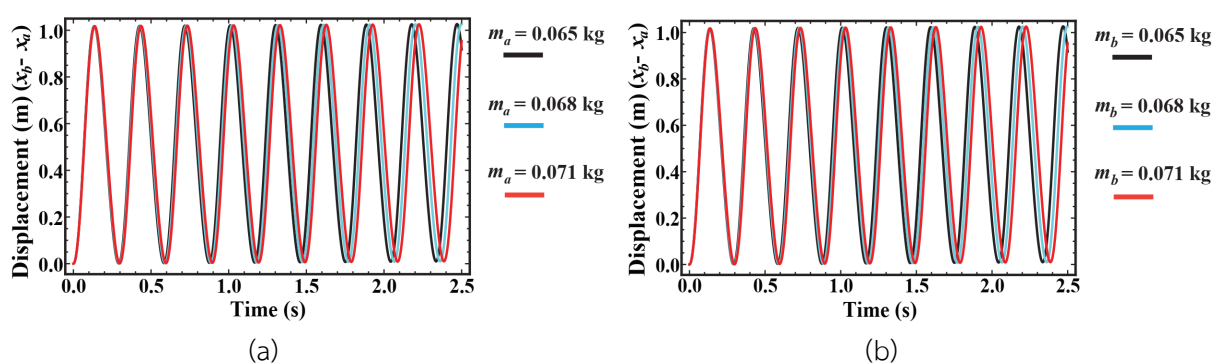
จากรูปที่ 4(a) แสดงกราฟระยะทางยวบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลาเมื่อขนาดของค่าคงที่ของสปริง k เปลี่ยนแปลงจาก 10.0 N/m ไปเป็น 14.0 N/m เส้นกราฟสีเหลือง คือ กราฟระยะทางยวบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ เมื่อค่าคงที่ของสปริง k_1 เป็น 10.0 N/m ต่อมาเส้นกราฟสีเขียว คือ กราฟระยะทางยวบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ เมื่อขนาดของค่าคงที่ของสปริง k_2 เป็น 12.0 N/m ต่อมาเส้นกราฟสีชมพู คือ กราฟระยะทางยวบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ เมื่อขนาดของค่าคงที่ของสปริง k_3 เป็น 14.0 N/m ถ้าค่าคงที่ของสปริงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะทางยวบตัวของสปริงระหว่างวัตถุมวล m_a และมวล m_b มีลักษณะการสั่นลดลง เป็นเพราะค่าคงที่สปริงมีค่ามากขึ้นทำให้สปริงแข็ง เกิดการสั่นของระบบลดลง จากรูปที่ 4(b) แสดงกราฟระยะทางยวบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลาเมื่อค่าคงที่ของแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 เปลี่ยนแปลงจาก 2.0 N ไปเป็น 4 N เส้นกราฟสีเหลือง คือ กราฟระยะทางยวบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ เมื่อค่าคงที่ของแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 เป็น 2.0 N ต่อมาเส้นกราฟสีเขียว คือ กราฟระยะทางยวบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ เมื่อค่าคงที่ของแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 เป็น 3.0 N ต่อมาเส้นกราฟสีชมพู คือ กราฟระยะทางยวบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ เมื่อค่าคงที่ของแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 เป็น 4.0 N ถ้าค่าคงที่ของแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 มีขนาดเพิ่มขึ้นทำให้ระยะทางยวบตัวของสปริง $\kappa_d(t)$ ที่มีวิธีการสั่นไม่สมมาตรมากขึ้น รอบ จุด 0.0 ค่าระยะทางยวบตัวของสปริง $\kappa_d(t)$ ส่วนเป็นบวกมีค่า 0.5 m ซึ่งน้อยกว่า ค่าระยะทางยวบตัวของสปริง $\kappa_d(t)$ ส่วนเป็นลบมีค่า 0.7 m และแอมพลิจูดของการสั่นที่มีค่าเป็นบวกเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าแอมพลิจูดลดลง จะตรงข้ามกับแอมพลิจูดของการสั่นที่มีค่าเป็นลบเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าแอมพลิจูดเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 5(a) ถ้าค่าคงที่ของสปริงเพิ่มขึ้นจากเส้นกราฟสีเหลืองมี $k = 2\text{ N/m}$ เปลี่ยนเป็นเส้นกราฟสีชมพูมี $k = 6\text{ N/m}$ ทำให้ระยะทางยวบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ เกิดการสั่นแบบไม่สมมาตรรอบจุด 0.0 มากขึ้นเพราะค่าคงที่ของสปริงเพิ่มขึ้นทำให้สปริงมีความแข็งเพิ่มขึ้น ณ ความถี่ $f = 0.01\text{ Hz}$ โดยมีขนาดของแรงภายนอกเริ่มต้น $f_0 = 1\text{ N}$. กราฟเส้นสีเหลืองมีรอยแตกตรงแอมพลิจูด เป็นผลจากค่าคงที่ของสปริงที่มีค่าน้อยทำให้ระยะหดตัวและระยะยืดตัวไปมาวิถีของการสั่น เมื่อค่าคงที่ของสปริงมีขนาดเพิ่มขึ้นรอยแตกตรงแอมพลิจูดหายไป เกิดความเสถียรของการสั่น



รูปที่ 5 กราฟระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ (a) ค่าคงที่ของสปริง k เปลี่ยน $2.0 \rightarrow 6.0 \text{ N/m}$ ในช่วงเวลา 0.0 วินาที ถึง 2.0 วินาที โดยมีค่าความถี่ $f = 0.01 \text{ Hz}$ (b) ค่าคงที่ของสปริง k เปลี่ยน $2.0 \rightarrow 6.0 \text{ N/m}$ ในช่วงเวลา 0.0 วินาที ถึง 20.0 วินาที โดยมีค่าความถี่ $f = 0.1 \text{ Hz}$

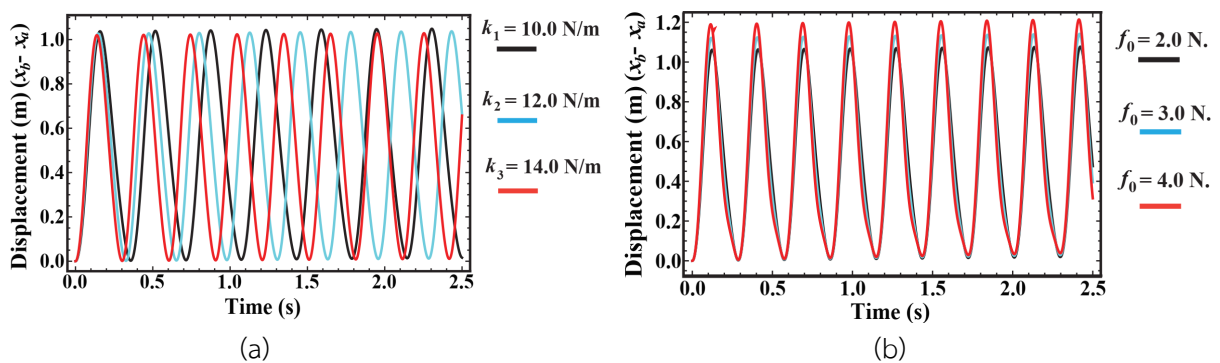
จากรูปที่ 5 (b) ตัวแปรควบคุม คือ ขนาดของค่ามวล m_a เป็น 0.065 kg ขนาดของค่ามวล m_b เท่ากับ 0.0645 kg ขนาดของค่าความถี่ $f = 0.1 \text{ Hz}$ และขนาดของแรงภายนอกเริ่มต้น $f_0 = 1 \text{ N}$. ตัวแปรต้นคือ ถ้าค่าคงที่ของสปริงเพิ่มขึ้นจากเส้นกราฟสีเหลืองมี $k = 2 \text{ N/m}$ เปลี่ยนเป็นเส้นกราฟสีชมพูมี $k = 6 \text{ N/m}$ ทำให้ระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ เกิดการสั่นแบบไม่สมมาตรรอบจุด 0.0 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เป็นเพราะขนาดของแรงภายนอก $f_0 \sin(\omega_f t)$ ถ้า $\omega_f = 2\pi f$ ถ้าค่าความถี่เพิ่มขึ้นจะส่งให้ระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ เกิดการสั่นแบบไม่สมมาตร จากรูปที่ 5(b) เมื่อทำการเพิ่มเวลาจะทำให้เห็นระบบการสั่นของสปริงระหว่างมวลทั้งสองอย่างชัดเจน



รูปที่ 6 กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ (a) ในกรณีที่ขนาดของ $m_a > m_b$ มวล m_a เปลี่ยนแปลงจาก $0.065 \rightarrow 0.071 \text{ kg}$ (b) ในกรณีที่ขนาดของ $m_a < m_b$ มวล m_b เปลี่ยนแปลงจาก $0.065 \rightarrow 0.071 \text{ kg}$

จากรูปที่ 6(a) แสดงกราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาเมื่อขนาดของมวล m_a เปลี่ยนแปลงจาก 0.065 kg ไปเป็น 0.071 kg ซึ่งขนาดของมวล m_b เท่ากับ 0.0645 kg เส้นกราฟสีด้า คือ กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ เมื่อขนาดของมวล m_a เป็น 0.065 kg ต่อมาเส้นกราฟสีฟ้า คือ กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ เมื่อขนาดของมวล m_a เป็น 0.068 kg ต่อมาเส้นกราฟสีแดง คือ กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา

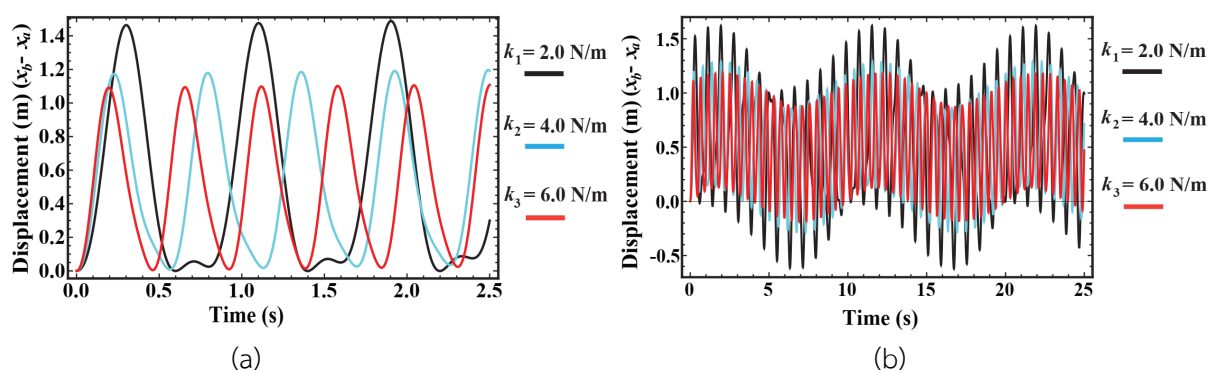
$(x_b - x_a)$ เมื่อขนาดของมวล m_a เป็น 0.071 kg ถ้าขนาดของค่ามวล m_a มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เกิดค่าของความยาวคลื่นของการสั่นในตัวแปรการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\kappa_d(t)$ มากขึ้น และค่าของการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชัน $(x_b - x_a)$ วัดจาก 0.0 การสั่นค่าบวกเท่านั้น มีค่าเท่ากับ 1.0 m จากรูปที่ 6(b) แสดงกราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาเมื่อขนาดของมวล m_b เปลี่ยนแปลงจาก 0.065 kg ไปเป็น 0.071 kg ซึ่งขนาดของมวล m_a เท่ากับ 0.0645 kg เส้นกราฟสีดำ คือ กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ เมื่อขนาดของมวล m_b เป็น 0.065 kg ต่อมาเส้นกราฟสีฟ้า คือ กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ เมื่อขนาดของมวล m_b เป็น 0.068 kg ต่อมาเส้นกราฟสีแดง คือ กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ เมื่อขนาดของมวล m_b เป็น 0.071 kg ถ้าขนาดค่าของมวล m_b มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้เกิดค่าของความยาวคลื่นของการสั่นในตัวแปรกราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ มากขึ้น และค่าของการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชัน $(x_b - x_a)$ วัดจาก 0.0 การสั่นค่าบวกเท่านั้น มีค่าเท่ากับ 1.0 m



รูปที่ 7 กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ (a) ค่าคงที่ของสปริง k เปลี่ยน $10 \rightarrow 14\text{ N/m}$ (b) ค่าคงที่ของแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 เปลี่ยน $2 \rightarrow 4\text{ N}$

จากรูปที่ 7(a) แสดงกราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ เมื่อขนาดของค่าคงที่ของสปริง k เปลี่ยนแปลงจาก 10.0 N/m ไปเป็น 14.0 N/m เส้นกราฟสีดำ คือ กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ เมื่อค่าคงที่ของสปริง k_1 เป็น 10.0 N/m ต่อมาเส้นกราฟสีฟ้า คือ กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ เมื่อขนาดของค่าคงที่ของสปริง k_2 เป็น 12.0 N/m ต่อมาเส้นกราฟสีแดง คือ กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ เมื่อขนาดของค่าคงที่ของสปริง k_3 เป็น 14.0 N/m ถ้าค่าคงที่ของสปริงเพิ่มขึ้นส่งผลให้กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ ระหว่างวัตถุมวล m_a และมวล m_b มีลักษณะการสั่นลดลง เป็นเพราะค่าคงที่สปริงมีค่ามากขึ้นทำให้สปริงแข็ง เกิดการสั่นของระบบลดลง จากรูปที่ 7(b) แสดงกราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ เมื่อค่าคงที่ของแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 เปลี่ยนแปลงจาก 2.0 N ไปเป็น 4 N เส้นกราฟสีดำ คือ กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ เมื่อค่าคงที่ของแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 เป็น 2.0 N ต่อมาเส้นกราฟสีฟ้า คือ กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ เมื่อค่าคงที่ของแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 เป็น 3.0 N ต่อมาเส้นกราฟสีแดง คือ กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ เมื่อค่าคงที่ของแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 เป็น 4.0 N ถ้าค่าคงที่ของแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 มีขนาดเพิ่มขึ้นทำให้กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็น

ฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ ที่มีวิธีการสั่นไม่สมมาตรมากขึ้นตั้งแต่ จุด 0.0 และขนาดของค่ากราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ เพิ่มขึ้น



รูปที่ 8 กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ (a) ค่าคงที่ของสปริง k เปลี่ยน $2 \rightarrow 6 \text{ N/m}$ ในช่วงเวลา 0.0 วินาที ถึง 2.5 วินาที (b) ค่าคงที่ของสปริง k เปลี่ยน $2 \rightarrow 6 \text{ N/m}$ ในช่วงเวลา 0.0 วินาที ถึง 25.0 วินาที

จากรูปที่ 8(a) ถ้าค่าคงที่ของสปริงเพิ่มขึ้นจากเส้นกราฟสีดำมี $k = 2 \text{ N/m}$ เปลี่ยนเป็นเส้นกราฟสีแดงมี $k = 6 \text{ N/m}$ ทำให้กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ เกิดการสั่นแบบไม่สมมาตรรอบจุด 0.0 มากขึ้นเพราะค่าคงที่ของสปริงเพิ่มขึ้นทำให้สปริงมีความแข็งเพิ่มขึ้น ณ ความถี่ $f = 0.01 \text{ Hz}$ โดยมีขนาดของแรงภายนอกเริ่มต้น $f_0 = 1 \text{ N}$. กราฟเส้นสีดำมีรอยแตกตรงแอมพลิจูดฐานล่าง เป็นผลจากค่าคงที่ของสปริงที่มีค่าน้อยทำให้ระยะหดตัวและระยะยืดตัวไปมาวิถีของการสั่นไม่เสถียร แต่พอค่าคงที่ของสปริงมีขนาดเพิ่มขึ้นรอยแตกตรงแอมพลิจูดหายไป เกิดความเสถียรของการสั่น

6. สรุป

ถ้าค่าคงที่ของสปริงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะทางยุบตัวของสปริงระหว่างวัตถุมวล m_a และมวล m_b มีลักษณะการสั่นลดลง เป็นเพราะค่าคงที่สปริงมีค่ามากขึ้นทำให้สปริงแข็ง เกิดการสั่นของระบบลดลง ถ้าขนาดของมวล m_a และมวล m_b มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะทางยุบตัวของสปริงของวัตถุมวล m_a และมวล m_b ณ เวลาตั้งแต่ 0.7 วินาทีเป็นต้นเกิด ค่าความยาวคลื่นของการสั่นเพิ่มขึ้น ถ้าขนาดของแรงภายนอกเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะทางยุบตัวของสปริงของวัตถุมวล m_a และมวล m_b มีลักษณะการสั่นเพิ่มขึ้นลักษณะเส้นกราฟของระยะทางยุบตัวของสปริงไม่มีความสมมาตรเป็นเพราะขนาดของแรงภายนอก ถ้าค่าคงที่ของแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 มีขนาดเพิ่มขึ้นทำให้ระยะทางยุบตัวของสปริง $\kappa_d(t)$ ที่มีวิธีการสั่นไม่สมมาตรมากขึ้น รอบ จุด 0.0 ค่าระยะทางยุบตัวของสปริง $\kappa_d(t)$ ส่วนเป็นบวกมีค่า 0.5 m ซึ่งน้อยกว่า ค่าระยะทางยุบตัวของสปริง $\kappa_d(t)$ ส่วนเป็นลบมีค่า 0.7 m และแอมพลิจูดของการสั่นที่มีค่าเป็นบวกเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าแอมพลิจูดลดลง จะตรงข้ามกับแอมพลิจูดของการสั่นที่มีค่าเป็นลบเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าแอมพลิจูดเพิ่มขึ้น

ถ้าค่าคงที่ของสปริงเพิ่มขึ้นส่งผลให้การกระจัดของวัตถุมวล m_a และมวล m_b มีลักษณะการสั่นลดลง เป็นเพราะค่าคงที่สปริงมีค่ามากขึ้นทำให้สปริงแข็ง เกิดการสั่นของระบบลดลง ถ้าขนาดของมวล m_a และมวล m_b มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การกระจัดของวัตถุมวล m_a และมวล m_b ณ เวลาตั้งแต่ 0.7 วินาทีเป็นต้นเกิด ค่าความยาวคลื่นของการสั่นเพิ่มขึ้น ถ้าขนาดของแรงภายนอกเริ่มต้นมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้การกระจัดของวัตถุมวล m_a และมวล m_b มีลักษณะการสั่นเพิ่มขึ้นลักษณะเส้นกราฟของการกระจัดไม่มีความสมมาตรเป็นเพราะขนาดของแรงภายนอกถ้าค่าคงที่ของแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 มีขนาดเพิ่มขึ้นทำให้กราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$

ที่มีวิธีการสั้นไม่สมมาตรมากขึ้นตั้งแต่ จุด 0.0 และขนาดของค่ากราฟการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $(x_b - x_a)$ เพิ่มขึ้น

7. ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ควรเพิ่มการเขียนโปรแกรมทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการใช้คำสั่ง Manipulate สร้างสื่อการเรียนการสอนให้กับสมการระยะทางยุบตัวของสปริงที่เป็นฟังก์ชันของเวลากับระหว่างตัวแปรตาม $\kappa_d(t)$ กับตัวแปรต้น เช่น ค่าคงสปริง k และมวล m_a และ m_b และแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 และสร้างสื่อการเรียนการสอนให้กับสมการการกระจัดระหว่างมวล m_a และ m_b ที่เป็นฟังก์ชันของเวลาไปทำการพล็อตกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม $x_b(t) - x_a(t)$ กับตัวแปรต้น เช่น ค่าคงสปริง k และมวล m_a และ m_b และแรงภายนอกเริ่มต้น f_0 เป็นต้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ และเวลาในการทำงานวิจัย จนกระทั่งงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] วุทธิพันธุ์ ปรัชญพฤทธิ และ สุวรรณ คูสำราญ, *กลศาสตร์*, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: มูลนิธิส่งเสริมโอลิมปิกวิชาการและพัฒนามาตรฐานวิทยาศาสตร์ศึกษา, 2552.
- [2] K.F. Riley and M.P. Hobson, *Mathematical Methods for Physics and Engineering*, 3th ed. New York: Cambridge University Press, 2006.
- [3] A. Atamp, *Introduction to Classical Mechanics*, 1st ed. United States America: Prentice-Hall, 1990.
- [4] P.S. Goldstein, *Classical Mechanics*, 3th ed. United States America: Prentice-Hall, 2002.
- [5] R.S. Murray and L. John, *Mathematical Handbook of Formulas and Tables*, 2nd ed. New York: McGraw Hill, 1999.
- [6] C. Saptip, P. Moonsri and A. Hutem, "Calculation of displacement and velocity of particle perturbation by time-dependent external force of cosine and sine function," *Journal of Science and Technology Phetchabun Rajabhat University*, vol. 1, no. 2, pp. 1-7, 2021.
- [7] A. Hutem, "Calculation of the time-dependent velocity and displacement of particle move under time-dependent external force of damping oscillation," *Journal of Science and Technology CRRU*, vol. 2, no. 1, pp. 1-7, 2023.
- [8] พลาพันธ์ ปะจายะกฤตย์ และกนก ทองสว่าง, "การไต่-บินเดินทางพร้อมกัน," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ*, ปีที่ 20, ฉบับที่ 1, มกราคม-มิถุนายน, หน้า. 93-107, 2567.
- [9] วรากรณ์ พูลจันทร์, เทียนสิริ เหลืองวิไล, วีระพล วิลามาต, สมภูมิ มีชานา, สุภาวดี สีสายุทธ และสามารณ หมุดและ, "การวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอาคารเมื่อใช้วัสดุปิดผิวที่ต่างกัน โดยใช้ระเบียบวิธีของแถว," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ*, ปีที่ 17, ฉบับที่ 1, มกราคม-มิถุนายน, หน้า 1-10, 2564.
- [10] กนก ทองสว่าง และอิทธิ ยุทธยานนท์, "การวิจัยและพัฒนาแบบจำลองดาวเทียมเชิงวิศวกรรมเพื่อวิเคราะห์ระบบควบคุมท่าทางการโคจรของดาวเทียม," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ*, ปีที่ 20, ฉบับที่ 1, มกราคม-มิถุนายน, หน้า 59-72, 2567.

- [11] A. Hutem, S. Suwanwong and A. Wanaek, "Calculation of Velocity and Displacement as Function of Time of Body in the Vertical Movement Under Gravitational Field," *Journal of Earth Science, Astronomy and Space*, vol. 6, no. 1, pp. 29-46, 2023.
- [12] P. MUSIK, "Development of Computer-Based Experiment Set on Simple Harmonic Motion of Mass on Springs," *TOJET: The Turkish Online Journal of Educational Technology*, vol. 16, no. 4, pp. 1-11, 2017.
- [13] S. Kuaykaew, S. Kerdmee, P. Banyenugam, P. Moonsri and A. Hutem, "The Analytical Description of Projectile Motion of Cricket Ball in a Linear Resisting Medium the Storm Force," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 855, pp. 188-191, 2016.
- [14] A. Hutem and S. Kerdmee, "Physics Learning Achievement Study : Projectile, using Mathematica program of Faculty of Science and Technology Phetchabun Rajabhat University Students," *European Journal of Physics Education*, vol. 4, no.3, pp.22-33, 2013.
- [15] J. Changkham, P. Moonsri and A. Hutem, "Calculation of Time-Dependent Velocity and Displacement of a Partical in Projectile Motion with Air Resistance, Lift Force and External Force," *VRU Research and Development Journal Science and Technology*, vol. 19, no. 2, pp. 90-106, 2024.
- [16] J. Changkham, P. Moonsri and A. Hutem, "Modelling the Projectile Motion under a Time Dependent External," *VRU Research and Development Journal Science and Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 45-59, 2024.

ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดที่มีผลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้า
ในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร
Marketing Mix Factors Affecting Satisfaction in Using Freight Transport Services
in Nong Chok District, Bangkok

ชิตชนก อินทอง^{1*}

¹สาขาวิชาโลจิสติกส์สากลและการจัดการอุตสาหกรรม คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

Chidchanok Inthong^{1*}

¹Global Logistics and Industrial Management Faculty of Business Administration

Mahanakorn University of Technology

chidchanok@mut.ac.th

Received 14 September 2024

Revised 09 December 2024

Accepted 17 December 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดที่มีผลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้บริการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร กลุ่มตัวอย่างประกอบด้วยผู้ใช้บริการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอกจำนวน 400 คน เครื่องมือวิจัยหลักคือแบบสอบถามที่เกี่ยวข้องกับส่วนประสมทางการตลาด 7Ps ได้แก่ ด้านสินค้าและบริการ (Product), ด้านราคา (Price), ด้านสถานที่ให้บริการ (Place), ด้านการส่งเสริมการตลาด (Promotion), ด้านบุคลากร (People), ด้านกระบวนการให้บริการ (Process), และด้านลักษณะกายภาพภายนอก (Physical) โดยใช้สถิติทดสอบ t-test, ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) และการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) ผลการวิจัยพบว่า ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาด 4 ด้าน ได้แก่ ด้านสถานที่ให้บริการ, ด้านการส่งเสริมการตลาด, ด้านบุคลากร, และด้านกระบวนการให้บริการ มีผลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้บริการอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และสามารถพยากรณ์ความพึงพอใจได้ถึง 73.9% ($R^2 = 0.739$)

คำสำคัญ: การขนส่งสินค้า, ส่วนประสมทางการตลาด, ความพึงพอใจ

Abstract

This research aimed to study the marketing mix factors affecting the satisfaction of freight transport service users in Nong Chok District, Bangkok. The sample group consisted of 400 freight transport service users in Nong Chok District. The main research instrument was a questionnaire related to the 7Ps marketing mix: Product, Price, Place, Promotion, People, Process, and Physical. Data were analyzed using t-test, One-way ANOVA, and Multiple Regression Analysis. The results of the research found that the 4Ps: Place, Promotion, People, and Process had a statistical significance

on the customer satisfaction of service users at the 0.05 level and could predict customer satisfaction by 73.9% ($R^2 = 0.739$).

Keywords: Freight Forwarding, Marketing Mix, Satisfaction

1. บทนำ

สัดส่วนปริมาณการขนส่งสินค้าในประเทศไทยในปี 2565 พบว่าปริมาณการขนส่งสินค้าทางถนนยังคงเป็นรูปแบบหลัก คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 79.48 เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 78.72 ในปี 2564 รองลงมาได้แก่ การขนส่งสินค้าทางน้ำ คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 18.55 ลดจากร้อยละ 19.29 ในขณะที่การขนส่งสินค้าทางรางและทางอากาศมีสัดส่วนค่อนข้างน้อย คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 1.96 และ 0.01 ตามลำดับ [1] เป็นผลจากที่ผ่านมา ภาครัฐให้ความสำคัญกับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทางถนนมากกว่ารูปแบบอื่นๆ ส่งผลให้ระยะทางของถนนครอบคลุมถึง 91.6% ของเส้นทางขนส่งทั้งหมดของประเทศไทย ลักษณะของการขนส่งทางถนนที่สามารถส่งตรงจากผู้ส่ง (หรือต้นทาง) ถึงผู้รับ (ปลายทาง) (Door to Door Transport) และเชื่อมโยงการขนส่งรูปแบบอื่นที่ไม่สามารถให้บริการขนส่งจากต้นทางถึงปลายทางได้อย่างสมบูรณ์ เช่น การขนส่งสินค้าทางรางน้ำ และอากาศ จะต้องใช้รถบรรทุกเป็น Feeder ขนถ่ายสินค้าต่อไปยังผู้รับปลายทาง ทำให้การขนส่งทางถนนมีบทบาทสูงต่อภาคขนส่งรวมของประเทศ สะท้อนจากค่าใช้จ่ายสำหรับการขนส่งสินค้าทางถนนที่สูงกว่าการขนส่งรูปแบบอื่นมาโดยตลอด [2] ปริมาณการขนส่งสินค้าในภาพรวมปรับลดลงจากปีก่อนหน้า [1] โดยในปี 2565 มีปริมาณรวม 885,146 พันตัน ลดลงจาก 925,735 พันตัน ในปี 2564 หรือลดจากร้อยละ 4.38 ทั้งนี้ ปริมาณการขนส่งสินค้าในประเทศไทยปรับลดลงเล็กน้อย โดยมีปริมาณ 579,139 พันตัน ลดลงจาก 579,817 พันตัน หรือลดจากร้อยละ 0.12 โดยลดลงจากการขนส่งทางลำน้ำภายในประเทศเป็นหลัก ในขณะที่ปริมาณการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ มีปริมาณ 306,008 พันตัน ลดลงจาก 345,918 พันตัน หรือลดจากร้อยละ 11.54 จากการขนส่งทางน้ำระหว่างประเทศเข้า

SHIPPOP ได้ทำการรวบรวมข้อมูลของขนส่งชั้นนำทั่วประเทศ เพื่อนำมาวิเคราะห์มูลค่าของตลาดขนส่งพัสดุด่วนในไทย พบว่า ในปี 2565 ตลาดขนส่งพัสดุมือถือการเติบโตที่ลดลง ซึ่งก่อนหน้านี้ตลาดขนส่งมีการเติบโตเป็นอย่างมาก เนื่องจากพฤติกรรมผู้บริโภคที่เปลี่ยนไปในช่วงโควิด-19 ผู้บริโภคหันมาซื้อสินค้าออนไลน์มากขึ้น และให้ความสำคัญกับความสะดวกรวดเร็วในการขนส่งสินค้า แต่หลังจากสถานการณ์โควิด-19 เริ่มเข้าสู่ภาวะปกติ ผู้บริโภคก็เริ่มกลับมาใช้ชีวิตปกติมากขึ้น ส่งผลให้ตลาดขนส่งพัสดุมือถือการเติบโตที่ลดลง [3]

จากสภาพปัญหาดังกล่าว มีความเป็นไปได้ว่าจะส่งผลถึงระดับความพึงพอใจของผู้ใช้บริการได้ ซึ่งเป็นประเด็นปัญหาหลักต่อความสำเร็จของธุรกิจผู้ให้บริการภายนอกโลจิสติกส์ด้วย ดังนั้นผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการสร้างความพึงพอใจของลูกค้า ทั้งนี้ผู้วิจัยได้นำแนวคิดของ [4] ที่ศึกษาเกี่ยวกับเรื่องส่วนประสมทางการตลาดมาศึกษาเพื่อวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความพึงพอใจที่จะใช้การขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร เพื่อนำมาปรับปรุง พัฒนาคุณภาพการให้บริการ พร้อมทั้งการสร้างความแตกต่างการให้บริการลูกค้าให้มีความประทับใจ จดจำ เพื่อส่งผลถึงระดับความพึงพอใจสูงสุดให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้บริการ (ลูกค้า) มากที่สุด

2. ขอบเขตงานวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดของผู้ให้บริการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร
- 2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดที่ส่งผลต่อความพึงพอใจของผู้ให้บริการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร

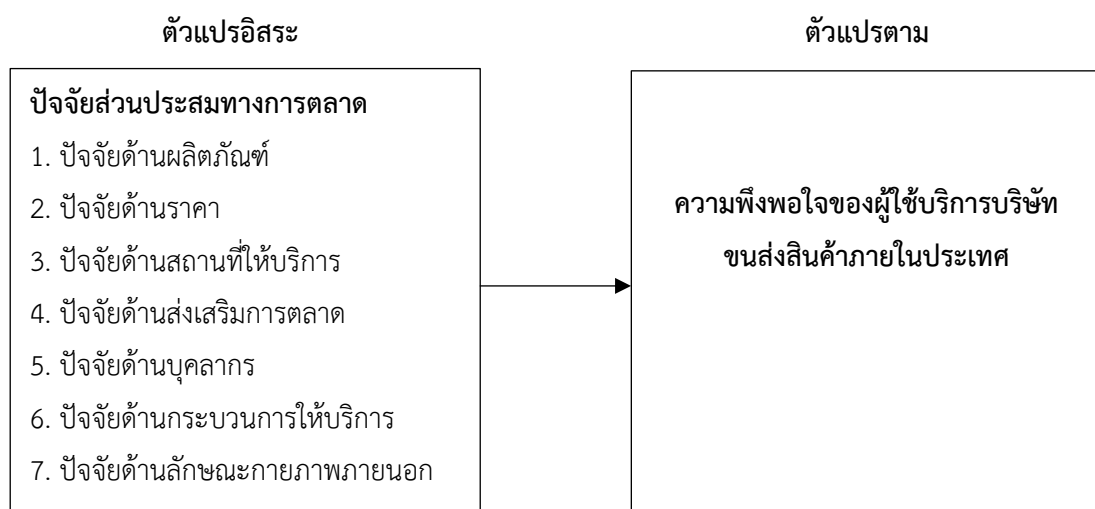
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ขอบเขตด้านเนื้อหาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นเกี่ยวกับปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดมีผลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้า

3.2 ขอบเขตด้านประชากร กลุ่มตัวอย่างที่ และพื้นที่ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ ผู้ใช้บริการการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร

4. กรอบแนวคิดในการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยเรื่อง ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดที่มีผลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้าของผู้ใช้ในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร มีกรอบแนวคิดในการทำวิจัยโดยใช้แนวคิดปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดของ [5] ได้มีกำหนดตัวแปรต้นและตัวแปรตาม เพื่อเป็นเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัยและเป็นแนวทางในการค้นหาคำตอบ ซึ่งประกอบด้วย ปัจจัยด้านผลิตภัณฑ์ ปัจจัยด้านราคา ปัจจัยด้านสถานที่ให้บริการ ปัจจัยด้านส่งเสริมการตลาด ปัจจัยด้านบุคลากร ปัจจัยด้านกระบวนการให้บริการ และปัจจัยด้านลักษณะกายภาพภายนอก สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

5. วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงสำรวจ (Survey Research) โดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูลจากตัวอย่างผู้ใช้บริการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร โดยมีรายละเอียดมีดังนี้

5.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร (Population) ประชากรที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ ประชากรที่อยู่อาศัย ทำงาน หรือกำลังศึกษาในพื้นที่เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร

กลุ่มตัวอย่าง ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ บุคคลทั่วไปที่เป็นผู้ใช้บริการบริษัทขนส่งสินค้าในพื้นที่เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร เนื่องจากประชากรมีขนาดใหญ่และไม่ทราบจำนวนที่แน่นอน ดังนั้นขนาดของกลุ่มตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากสูตรของ W.G. Cochran โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่น 95% และระดับค่าความคลาดเคลื่อน

ไม่เกิน 5% [6] ซึ่งสูตรที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ

$$n = \frac{P(1-P)Z^2}{e^2} \quad (1)$$

เมื่อ n คือขนาดกลุ่มตัวอย่างที่จะศึกษา

P คือสัดส่วนของประชากรที่ผู้วิจัยกำลังสุ่ม 0.5

Z คือระดับความเชื่อมั่นที่กำหนดไว้ Z มีค่าเท่ากับ 1.96

ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ระดับ .05)

e คือค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้เกิดขึ้นจากการสุ่มตัวอย่าง เป็น 0.05

แทนค่า

$$n = \frac{0.5(1-0.5)1.96^2}{0.05^2} \quad (2)$$

$$n \approx 385$$

ในการวิจัยครั้งนี้ต้องใช้กลุ่มตัวอย่างอย่างน้อย 385 คน แต่เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ผล ผู้วิจัยจึงได้ปรับขนาดเป็นจำนวน 400 ตัวอย่าง ซึ่งถือว่าผ่านเกณฑ์ที่กำหนด

วิธีการสุ่มตัวอย่าง มีรายละเอียด ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างการสุ่มแบบชั้นภูมิ (Stratified Random Sampling) คือ ทำการเก็บกลุ่มตัวอย่างแบบออนไลน์ โดยผู้วิจัยจะสร้างแบบสอบถามจาก Google doc และกระจายแบบสอบถาม โดยการเก็บข้อมูลจากการส่งลิงค์ของแบบสอบถามให้กับกลุ่มคนที่อาศัยอยู่เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร ซึ่งก่อนการดำเนินการ ผู้วิจัยจะแจ้งกับผู้ที่จะทำการตอบแบบสอบถามว่าผู้ที่จะตอบจะต้องเป็นผู้ที่อาศัยอยู่ในเขตหนองจอกเท่านั้น

ขั้นตอนที่ 2 ใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบบังเอิญ โดยทำการกระจายแบบสอบถาม เพื่อให้ได้จำนวนกลุ่มตัวอย่างตามจำนวนที่ต้องการ โดยไม่มีหลักเกณฑ์ ซึ่งกลุ่มตัวอย่างจะเป็นผู้ใดก็ได้ที่สามารถให้ข้อมูลรายละเอียดของแบบสอบถามได้

5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยและคุณภาพของเครื่องมือ

การวิจัยนี้ใช้แบบสอบถามในการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยผู้วิจัยได้ศึกษาหาความรู้ ค้นคว้า ทบทวนวรรณกรรม แนวคิดและทฤษฎี เอกสารทางวิชาการ รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อกำหนดกรอบแนวคิดของงานวิจัยที่แสดงให้เห็นตัวแปรที่เกี่ยวข้อง และนำไปสู่การให้ความหมายของนิยามศัพท์เฉพาะ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการสร้างแบบสอบถาม ซึ่งการวิจัยนี้เป็นวิจัยเชิงสำรวจที่ใช้แบบสอบถามทั้งปลายปิดและปลายเปิด โดยแบบสอบถามปลายปิดผู้วิจัยมีตัวเลือกคำตอบให้ผู้ตอบได้เลือกตอบ ส่วนแบบสอบถามปลายเปิด ผู้วิจัยจะกำหนดเฉพาะคำถามให้ผู้ตอบแบบสอบถามสามารถแสดงความคิดเห็นในการตอบได้ โดยแบบสอบถามถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 เป็นการสอบถามข้อมูลส่วนบุคคลของผู้ตอบแบบสอบถาม โดยผู้ตอบแบบสอบถามจะเลือกคำตอบที่ตรงกับความเป็นตัวตนของผู้ตอบแบบสอบถามมากที่สุด

ส่วนที่ 2 เป็นคำถามเกี่ยวกับพฤติกรรมการใช้บริการบริษัทขนส่งสินค้าของผู้ใช้บริการในเขตหนองจอก

กรุงเทพมหานคร เป็นคำถามลักษณะปลายปิด

ส่วนที่ 3 เป็นข้อคำถามเกี่ยวกับความคิดเห็นของปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดที่มีผลความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้าของผู้ใช้ในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร จำนวน 22 ข้อ เป็นข้อคำถามแบบมาตรวัดแบบลิเคิร์ต (Likert Scale) 5 ระดับ

ส่วนที่ 4 เป็นข้อคำถามเกี่ยวกับความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้าของผู้ใช้ในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร เป็นข้อคำถามแบบมาตรวัดแบบลิเคิร์ต (Likert Scale) 5 ระดับ

มาตรวัดแบบลิเคิร์ต 5 ระดับ ดังนี้

1.00 – 1.80 หมายถึง เห็นด้วยน้อยที่สุด	3.41 – 4.20 หมายถึง เห็นด้วยมาก
1.81 – 2.60 หมายถึง เห็นด้วยน้อย	4.21 – 5.00 หมายถึง เห็นด้วยมากที่สุด
2.61 – 3.40 หมายถึง เห็นด้วยปานกลาง	

5.3 การเลือกตัวอย่างและการเก็บข้อมูล

ผู้วิจัยดำเนินการทดสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) เพื่อตรวจสอบความตรงของเนื้อหาที่ครอบคลุมวัตถุประสงค์ของการศึกษา โดยการดำเนินการตรวจสอบหาความเที่ยงตรงโดยผู้เชี่ยวชาญประเมินค่าความสอดคล้องของเนื้อหา กับวัตถุประสงค์ของการวิจัย (Index of Item – Objective Congruence : IOC) ซึ่งเมื่อหาค่าเฉลี่ยแล้วตัดข้อคำถามที่มีค่า IOC ซึ่งมากกว่า 0.5 ทุกข้อ จากนั้นทำการทดสอบความเชื่อมั่นของเครื่องมือโดยนำแบบสอบถามไปทดลองเก็บข้อมูลการสำรวจเบื้องต้นประมาณ 30 ตัวอย่าง แล้วนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่นของครอนบาคอัลฟา (Cronbach' alpha) มีค่าเท่ากับ 0.954 ซึ่งมากกว่า 0.7 [7] จากนั้นจะทำการปรับปรุงรายละเอียดแล้วนำไปเก็บรวบรวมข้อมูลกับกลุ่มตัวอย่าง

5.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลจากแบบสอบถามแล้ว จึงได้นำข้อมูลนั้นมาประมวลผลด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistic) ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

1.1 ใช้ค่าร้อยละ (Percentage) และค่าความถี่ (Frequency) กับตัวแปรที่มีระดับการวัดเชิงกลุ่ม ได้แก่ ปัจจัยส่วนบุคคล เพศ อายุ สถานภาพ ระดับการศึกษา อาชีพ และรายได้ต่อเดือน

1.2 ใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) กับตัวแปรที่มีระดับการวัดเชิงปริมาณ ได้แก่ ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาด และ ความพึงพอใจของผู้ใช้บริการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร

2. สถิติอนุมาน (Inferential Statistic) ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

2.1 ลักษณะประชากรศาสตร์ส่งผลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้าของผู้ใช้บริการ ในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร จำแนกตามเพศ ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติการทดสอบ t-test และ สถิติความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดมีความสัมพันธ์เชิงบวกต่อความพึงพอใจของผู้ใช้บริการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis)

6. ผลการวิจัย

จากการวิจัยเรื่อง ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดที่มีผลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร สามารถสรุปผลการวิจัย ได้ดังนี้

6.1 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเชิงพรรณนา

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลส่วนบุคคลของกลุ่มตัวอย่างโดยการหาค่าความถี่ (Frequency) และค่าร้อยละ (Percentage) ได้ดังนี้

ตารางที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม

	ปัจจัยส่วนบุคคล	จำนวน	ร้อยละ
เพศ	ชาย	145	36.2
	หญิง	255	63.8
อายุ	น้อยกว่า 20 ปี	79	19.8
	20 - 29 ปี	208	52.0
	30 - 39 ปี	80	20.2
	40 - 49 ปี	22	5.5
	50 - 59 ปี	5	1.2
	60 ปีขึ้นไป	6	1.5
สถานภาพ	โสด	265	66.3
	สมรส	130	32.5
	หย่าร้าง / หม้าย / แยกกันอยู่	5	1.2
ระดับการศึกษา	ต่ำกว่ามัธยมศึกษา	25	6.2
	มัธยมศึกษาตอนปลาย	84	21.0
	ปวช.อนุปริญญา / ปวส.	32	8.0
	ปริญญาตรี	220	55.0
	ปริญญาโท	29	7.2
	ปริญญาเอก	10	2.5
อาชีพ	นักเรียน / นักศึกษา	200	50.0
	ข้าราชการ / พนักงานรัฐวิสาหกิจ	38	9.5
	พนักงาน / ลูกจ้างบริษัทเอกชน	123	30.8
	ประกอบธุรกิจส่วนตัว / ค้าขาย	36	9.0
	อื่น ๆ	3	0.8

	ปัจจัยส่วนบุคคล	จำนวน	ร้อยละ
รายได้ต่อเดือน	น้อยกว่า 10,000 บาท	113	28.2
	10,001 - 20,000 บาท	192	48.0
	20,001 - 30,000 บาท	67	16.8
	30,001 - 40,000 บาท	16	4.0
	40,001 - 50,000 บาท	2	0.5
	50,000 บาทขึ้นไป	10	2.5

จากตารางที่ 1 พบว่าผู้ตอบส่วนมากเป็นเพศหญิง เป็นจำนวน 255 คน คิดเป็นร้อยละ 63.8 รองลงมา คือ เพศชาย เป็นจำนวน 145 คนคิดเป็นร้อยละ 36.2

ด้านอายุ ผู้ตอบส่วนมากอายุ 20-29 ปี เป็นจำนวน 208 คน เป็นร้อยละ 52.0 รองลงมาคือ อายุ 30-39 ปี จำนวน 80 คนคิดเป็นร้อยละ 20.0 ถัดมาคือ อายุต่ำกว่า 20 ปี จำนวน 79 คนคิดเป็นร้อยละ 19.8 ถัดมาคือ อายุ 40-49 ปีจำนวน 22 คนคิดเป็นร้อยละ 5.5 ถัดมาคือ อายุ 60 ปีขึ้นไปจำนวน 6 คนคิดเป็นร้อยละ 1.5 และผู้ที่มีอายุ 50-59 ปีมีจำนวนน้อยที่สุด คือ 5 คนคิดเป็นร้อยละ 1.2 โดยลำดับ

ด้านสถานภาพ ผู้ตอบส่วนมากมีสถานะโสด เป็นจำนวน 265 คน คิดเป็นร้อยละ 66.3 รองลงมาคือ สถานภาพสมรส จำนวน 130 คน คิดเป็นร้อยละ 32.5 ถัดมาคือ สถานภาพหย่าร้าง / หม้าย / แยกกันอยู่ จำนวน 5 คน คิดเป็นร้อยละ 1.2

ด้านระดับการศึกษา ผู้ตอบส่วนมากจบการศึกษาระดับปริญญาตรี จำนวน 220 คน คิดเป็นร้อยละ 55.0 รองลงมาคือ ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจำนวน 84 คนคิดเป็นร้อยละ 21.0 ถัดมาคือ ระดับปวช.อนุปริญญา / ปวส. จำนวน 32 คนคิดเป็น ร้อย 8.0 ถัดมาคือ ระดับปริญญาโทจำนวน 29 คนคิดเป็นร้อยละ 7.2 ถัดมาคือ ระดับต่ำกว่ามัธยมศึกษา จำนวน 25 คนคิดเป็นร้อยละ 6.2 ระดับสุดท้ายคือ ปริญญาเอก จำนวน 10 คน คิดเป็นร้อยละ 2.5

ด้านอาชีพ ผู้ตอบส่วนมากทำอาชีพนักเรียนและนักศึกษา จำนวน 200 คนคิดเป็นร้อยละ 50.0 รองลงมา คือ พนักงานและลูกจ้างบริษัทเอกชน จำนวน 123 คนคิดเป็นร้อยละ 30.8 ถัดมาคือ ข้าราชการและพนักงานรัฐวิสาหกิจจำนวน 38 คนคิดเป็นร้อยละ 9.5 ถัดมาคือ ประกอบธุรกิจส่วนตัวและค้าขายจำนวน 36 คนคิดเป็นร้อยละ 9.0 และกลุ่มตัวอย่างที่ประกอบอาชีพอื่นๆที่ไม่ได้ระบุมามีจำนวนน้อยที่สุด คือ 3 คนคิดเป็นร้อยละ 0.8

ด้านรายได้ ผู้ตอบส่วนมากมีรายได้ 10,001-20,000 บาท จำนวน 192 คน คิดเป็นร้อยละ 48.0 รองลงมา คือ น้อยกว่า 10,000 บาท ถัดมาคือ 20,001-30,000 บาท จำนวน 67 คนคิดเป็นร้อยละ 16.8 ถัดมาคือ 30,001-40,000 บาท จำนวน 16 คนคิดเป็นร้อยละ 4.0 ถัดมาคือ 50,000 บาทขึ้นไป จำนวน 10 คนคิดเป็นร้อยละ 2.5 และผู้ที่มีรายได้ตั้งแต่ 40,001-50,000 บาท มีจำนวนน้อยที่สุด คือ 2 คนคิดเป็นร้อยละ 0.5

6.2 การวิเคราะห์ปัจจัยส่วนประสมการตลาดที่มีผลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้า

จากตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ระดับของปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดที่มีผลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานครพบว่าระดับของปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดที่มีผลต่อความความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้า ในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานครทั้ง 7 กลุ่มมีคะแนนรวมค่าเฉลี่ยความคิดเห็นแต่ละกลุ่มในระดับมากถึงมากที่สุดทุกกลุ่มโดยกลุ่มที่มีระดับคะแนนสูงที่

สุดคือ ด้านกระบวนการให้บริการ ($\bar{X} = 4.68$, $SD = 0.432$) รองลงมาคือ ด้านสถานที่ให้บริการ ($\bar{X} = 4.58$, $SD = 0.515$)

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยส่วนประสมการตลาดที่มีผลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้า

รายการวัดระดับปัจจัยส่วนประสมการตลาดที่มีผลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้า	รหัส	ค่าสถิติผลการวัดระดับ		
		แรงจูงใจ		
		$\bar{X}$	SD.	แปลผล
รายการปัจจัยส่วนประสมการตลาด				
1. ด้านสินค้าและบริการ	GPD	4.50	0.460	มากที่สุด
มีการบริการที่ได้มาตรฐานทุกครั้ง	PD1	4.54	0.560	มากที่สุด
มารยาทและความสุภาพของพนักงาน	PD2	4.39	0.599	มากที่สุด
มีการบริการตามลำดับก่อน – หลัง อย่างถูกต้อง	PD3	4.56	0.625	มากที่สุด
2. ด้านราคา	GPR	4.36	0.545	มากที่สุด
ราคาเหมาะสมกับคุณภาพของการให้บริการ	PR1	4.46	0.616	มากที่สุด
ราคาเหมาะสมกับจำนวนที่ใช้บริการ	PR2	4.41	0.651	มากที่สุด
ราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับร้านอื่น	PR3	4.22	0.795	มากที่สุด
3. ด้านสถานที่ให้บริการ	GPL	4.58	0.515	มากที่สุด
มีทำเลใกล้บ้าน	PL1	4.62	0.560	มากที่สุด
เดินทางสะดวก	PL2	4.53	0.632	มากที่สุด
4. ด้านส่งเสริมการตลาด	GPM	3.97	0.713	มาก
มีการโฆษณา มีการประชาสัมพันธ์ผ่านสื่อต่างๆ	PM1	4.16	0.833	มาก
มีช่วงโปรโมชั่นลดราคา	PM2	3.93	0.837	มาก
การโฆษณาเป็นที่น่าสนใจ	PM3	3.89	0.864	มาก
มีรูปแบบการส่งเสริมการตลาดที่หลากหลาย	PM4	3.91	0.878	มาก
5. ด้านบุคลากร	GPE	4.52	0.453	มากที่สุด
มารยาทของพนักงานในขณะที่ให้บริการ	PE1	4.54	0.568	มากที่สุด
การแต่งกายของพนักงานในขณะที่ให้บริการ	PE2	4.49	0.529	มากที่สุด
บุคลิกและสีหน้าท่าทางที่แสดงออกในขณะที่ให้บริการ	PE3	4.51	0.616	มากที่สุด
6. ด้านกระบวนการให้บริการ	GPC	4.68	0.432	มากที่สุด
มีความรวดเร็วในการจัดส่ง	PC1	4.70	0.528	มากที่สุด
สินค้าไม่ได้รับความเสียหาย	PC2	4.66	0.604	มากที่สุด
ระบบติดตามสินค้ามีประสิทธิภาพและความถูกต้อง	PC3	4.68	0.557	มากที่สุด
7. ด้านลักษณะกายภาพภายนอก	GPH	4.44	0.493	มากที่สุด
เห็นแหล่งที่ตั้งได้ง่าย	PH1	4.54	0.611	มากที่สุด
มีป้ายประชาสัมพันธ์ต่างๆ ชัดเจน	PH2	4.44	0.626	มากที่สุด
ที่จอดรถกว้างและสะดวกสบาย	PH3	4.35	0.734	มากที่สุด
สถานที่มีความสะอาด	PH4	4.42	0.707	มากที่สุด

ถัดมาคือ ด้านสินค้าและบริการ ($\bar{X} = 4.50$, $SD = 0.460$) ถัดมาคือ ด้านลักษณะกายภาพภายนอก ($\bar{X} = 4.44$, $SD = 0.493$) ถัดมาคือ ด้านราคา ($\bar{X} = 4.36$, $SD = 0.545$) และด้านส่งเสริมการตลาด ($\bar{X} = 3.97$, $SD = 0.713$) เมื่อพิจารณารายการวัดของแต่ละกลุ่มรายการวัดที่มีคะแนนระดับของปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดสูงที่สุดในแต่ละกลุ่มคือ มีการบริการตามลำดับก่อน – หลัง อย่างถูกต้อง มีคะแนนสูงสุดในด้านสินค้าและบริการ ($\bar{X} = 4.56$, $SD = 0.625$) ราคาเหมาะสมกับคุณภาพของการให้บริการ มีคะแนนสูงสุดในด้านราคา ($\bar{X} = 4.14$, $SD = 0.713$) มีทำเลใกล้บ้าน มีคะแนนสูงสุดในด้านสถานที่ให้บริการ ($\bar{X} = 4.62$, $SD = 0.560$) มีการโฆษณา มีการประชาสัมพันธ์ผ่านสื่อต่างๆ มีคะแนนสูงสุดในด้านการส่งเสริมการตลาด ($\bar{X} = 4.16$, $SD = 0.833$) ด้านมารยาทของพนักงาน มีคะแนนสูงสุดในด้านบุคลากร ($\bar{X} = 4.54$, $SD = 0.568$) มีความรวดเร็วในการจัดส่ง มีคะแนนสูงสุดในด้านกระบวนการให้บริการ ($\bar{X} = 4.70$, $SD = 0.528$) และ เห็นแหล่งที่ตั้งได้ง่าย มีคะแนนสูงสุดในด้านลักษณะกายภาพภายนอก ($\bar{X} = 4.54$, $SD = 0.611$)

6.3 การวิเคราะห์ความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้า

จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ระดับของผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้าพบว่า ระดับของความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้า มีคะแนนรวมค่าเฉลี่ยความคิดเห็นอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.60$, $SD = 0.373$) เมื่อพิจารณารายการวัดของระดับของความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้า พบว่าพึงพอใจต่อความพอใจเพียงของพนักงานของสาขานั้นๆ มีคะแนนสูงสุด ($\bar{X} = 4.70$, $SD = 0.528$) รองลงมาคือ พึงพอใจต่อการขนส่งที่รวดเร็ว ($\bar{X} = 4.62$, $SD = 0.560$) และพึงพอใจต่อที่จอดรถสำหรับผู้ใช้บริการที่มีอย่างเพียงพอ ($\bar{X} = 4.49$, $SD = 0.560$)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้า

ความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้า	รหัส	ค่าสถิติผลการวัดระดับแรงจูงใจ		
		$\bar{X}$	SD.	แปลผล
รายการความพึงพอใจ				
ความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้า	GSA	4.60	0.373	มากที่สุด
พึงพอใจต่อความพอใจเพียงของพนักงานของสาขานั้นๆ	SA1	4.70	0.528	มากที่สุด
พึงพอใจต่อที่จอดรถสำหรับผู้ใช้บริการที่มีอย่างเพียงพอ	SA2	4.49	0.529	มากที่สุด
พึงพอใจต่อการขนส่งที่รวดเร็ว	SA3	4.62	0.560	มากที่สุด

6.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อทดสอบสมมติฐาน

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยทำการทดสอบสมมติฐานตามที่กำหนดไว้ คือ

H1: ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดมีอิทธิพลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้บริการบริษัทขนส่งสินค้าภายในประเทศ

จากตารางที่ 4 พบว่า การตรวจสอบข้อมูลเบื้องต้นว่าตัวแปรอิสระไม่มีความสัมพันธ์กันเองในระดับที่สูงมาก (ไม่เกิด Multicollinearity) ทำการตรวจสอบ Multicollinearity จะใช้ค่า Variance Inflation Factor (VIF) และค่า Tolerance โดยมีเกณฑ์การตรวจสอบ ดังนี้ VIF ที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 10 หากเกินกว่านี้แสดงว่า ตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันเองในระดับที่สูงมาก และหากค่า Tolerance < 0.2 แสดงว่าเกิด Multicollinearity จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่า VIF สูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.670 ซึ่งไม่เกิน 10 และค่า Tolerance ที่มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.599 ซึ่งไม่ต่ำกว่า 0.2 แสดงว่าตัวแปรไม่มีความสัมพันธ์กันเองในระดับสูงหรือไม่เกิด Multicollinearity

ตารางที่ 4: การวิเคราะห์สมมติฐาน ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดมีอิทธิพลต่อความพึงพอใจของผู้ใช้บริการบริษัทขนส่งสินค้าภายในประเทศ

ตัวแปรอิสระ	B	Std. Error	Beta	t-value	p-value	Collinearity Statistics	
						Tolerance	VIF
ค่าคงที่ (Constant)	0.542	0.115	-	3.705	0.000	-	-
1. ด้านสินค้าและบริการ (GPD)	0.029	0.027	0.036	1.076	0.283	0.599	1.670
2. ด้านราคา (GPR)	-0.014	0.021	-0.021	-0.694	0.488	0.739	1.354
3. ด้านสถานที่ให้บริการ (GPL)	0.324	0.022	0.448	14.746	0.000**	0.723	1.383
4. ด้านการส่งเสริมการตลาด (GPM)	-0.031	0.015	-0.060	-2.058	0.040**	0.788	1.269
5. ด้านบุคลากร (GPE)	0.257	0.025	0.313	10.138	0.000**	0.700	1.428
6. ด้านกระบวนการให้บริการ (GPC)	0.327	0.025	0.380	12.833	0.000**	0.761	1.314
7. ด้านลักษณะกายภาพภายนอก (GPH)	-0.013	0.025	-0.017	-0.504	0.614	0.619	1.616

R = 0.860 $R^2 = 0.739$ Adjusted R Square = 0.734 Std. Error of the Estimate = 0.19229

** นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ดังนั้น ผลการทดสอบสมมติฐานการวิจัยด้วยการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณของส่วนประสมทางการตลาดทั้ง 7 ด้าน ได้แก่ 1) ด้านสินค้าและบริการ (PD) 2) ด้านราคา (PR) 3) ด้านสถานที่ให้บริการ (PL) 4) ด้านการส่งเสริมการตลาด (PM) 5) ด้านบุคลากร (PE) 6) ด้านกระบวนการให้บริการ (PC) และ 7) ด้านลักษณะกายภาพภายนอก (PH) พบว่า ส่วนประสมทางการตลาดสามารถพยากรณ์ความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร มีจำนวน 4 ด้าน ได้แก่ 1) ด้านสถานที่ให้บริการ (PL) 2) ด้านการส่งเสริมการตลาด (PM) 3) ด้านบุคลากร (PE) และ 4) ด้านกระบวนการให้บริการ (PC) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และสามารถพยากรณ์ส่งผลได้ ร้อยละ 73.9 ($R^2 = 0.739$) ส่วนปัจจัย 1) ด้านสินค้าและบริการ (PD) 2) ด้านราคา (PR) และ 3) ด้านลักษณะกายภาพภายนอก (PH) ไม่สามารถพยากรณ์ความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร ทั้งนี้ สามารถเขียนเป็นสมการพยากรณ์ ดังนี้

(ความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร) = 0.542 + 0.324 (GPL) + -0.031(GPM) + 0.257 (GPE) + 0.327 (GPC)

7. สรุปการวิจัย

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเรื่อง ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดที่มีผลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้า ในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลปัจจัยส่วนบุคคล พบว่า ผู้ตอบส่วนมากเป็นเพศหญิง ส่วนมากมีช่วงอายุระหว่าง 20-29 ปี ส่วนมากมีสถานภาพโสด การศึกษาระดับปริญญาตรี ส่วนใหญ่เป็นนักเรียนและนักศึกษา มีรายได้ที่รับต่อเดือน ประมาณ 10,001-20,000 บาท

2. ผลการวิเคราะห์เกี่ยวกับปัจจัยส่วนประสมทางการตลาด พบว่าระดับของปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดที่มีผลต่อความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานครพบว่าระดับของปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดที่มีผลต่อความความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้า ในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานครทั้ง 7 กลุ่มมีคะแนนรวมค่าเฉลี่ยความคิดเห็นแต่ละกลุ่มในระดับมากถึงมากที่สุดทุกกลุ่มโดยกลุ่มที่มีระดับคะแนนสูงที่สุดคือ ด้านกระบวนการให้บริการ รองลงมาคือ ด้านสถานที่ให้บริการ ด้านบุคลากร ด้านสินค้าและบริการ ด้านลักษณะกายภาพภายนอก ด้านราคา และด้านส่งเสริมการตลาด โดยลำดับ

3. ผลการทดสอบสมมติฐานการวิจัยด้วยการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณของส่วนประสมทางการตลาดทั้ง 7 ด้าน พบว่า ส่วนประสมทางการตลาดสามารถพยากรณ์ความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานครมีจำนวน 4 ด้าน ได้แก่ 1) ด้านสถานที่ให้บริการ (PL) 2) ด้านการส่งเสริมการตลาด (PM) 3) ด้านบุคลากร (PE) และ 4) ด้านกระบวนการให้บริการ (PC) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และสามารถพยากรณ์ส่งผลได้ ร้อยละ 73.9 ($R^2 = 0.739$)

8. อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดของผู้ใช้บริการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร พบว่า ผู้ใช้บริการขนส่งสินค้ามีความเห็นเกี่ยวข้องกับความพึงพอใจจากการใช้บริการขนส่งสินค้าโดยภาพรวมอยู่ในระดับมากถึงมากที่สุด ซึ่งเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยได้แก่ ด้านกระบวนการให้บริการ รองลงมาคือ ด้านสถานที่ให้บริการ ด้านบุคลากร ด้านสินค้าและบริการ ด้านลักษณะกายภาพภายนอก ด้านราคา และด้านส่งเสริมการตลาด โดยลำดับ กล่าวคือ หากสาขาสามารถบริการได้อย่างรวดเร็ว สินค้าไม่ได้รับความเสียหาย และมีระบบติดตามการขนส่ง รวมถึงสาขาที่ตั้งอยู่ใกล้แหล่งที่พักอาศัยและสามารถเดินทางได้อย่างสะดวกสบายก็จะส่งผลให้เกิดความพึงพอใจต่อการใช้บริการอีกทั้งหากพนักงานสามารถบริการลูกค้าด้วยใจบริการ มีลักษณะท่าทางที่เหมาะสมก็จะส่งผลต่อความพึงพอใจ นอกจากนี้หากพนักงานบริการได้ตรงตามความต้องการหรือเป็นตามที่เราจะสั่งผลให้ผู้ให้บริการเกิดความพึงพอใจ และยิ่งกว่านั้น หากการใช้บริการขนส่งสินค้ามีราคาที่เหมาะสมและมีโปรโมชั่นที่น่าสนใจก็จะส่งผลให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจในการใช้บริการ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [8-13] ที่พบว่าปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดที่ส่งผลต่อความพึงพอใจ นอกจากนี้ยังพบว่า ส่วนประสมทางการตลาดสามารถพยากรณ์ความพึงพอใจในการใช้บริการขนส่งสินค้าในเขตหนองจอก กรุงเทพมหานครมีจำนวน 4 ด้าน ได้แก่ ด้านสถานที่ให้บริการ ด้านการส่งเสริมการตลาด ด้านบุคลากร และ ด้านกระบวนการให้บริการ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และสามารถพยากรณ์ส่งผลได้ ร้อยละ 73.9 ($R^2 = 0.739$) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการให้บริการของผู้ประกอบการขนส่งสินค้าเป็นไปอย่างมีคุณภาพ ใส่ใจในการให้บริการ พนักงานให้ความสำคัญกับการบริการลูกค้า รวมถึงมีค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม มีการส่งเสริมทางการตลาดที่น่าสนใจ และที่ตั้งของกิจการเป็นแหล่งใกล้ชุมชน มีคมนาคมที่สะดวก ก็จะส่งผลให้ผู้ให้บริการเกิดความพึงพอใจ สอดคล้องกับงานวิจัยของ [8] ที่พบว่าที่พบว่าปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดที่ส่งผลต่อความพึงพอใจ จากข้อมูลของผลการวิจัยส่งผลให้ผู้ประกอบการขนส่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อพัฒนาการบริการในทุกๆ ด้านให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจสูงสุด โดย

การอบรมพนักงานเพื่อให้บริการได้ตรงตามความต้องการของลูกค้าอย่างสุภาพ รวมถึงมีการออกแบบการส่งเสริมการตลาดเพื่อจูงใจผู้ใช้บริการซึ่งจะส่งผลให้ผู้ใช้บริการหันมาใช้บริการอย่างต่อเนื่อง

9. ข้อเสนอแนะ

9.1 เนื่องจากในการวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ ซึ่งไม่สามารถได้ข้อมูลในลักษณะเชิงลึก ควรมีการวิจัยเพิ่มเติมในส่วนของการวิจัยเชิงคุณภาพ อาทิ ใช้การสัมภาษณ์เชิงลึก หรือการประชุมกลุ่มย่อยทั้งกับผู้ที่เคยและไม่เคยใช้บริการเพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งเสริมและปัจจัยที่เป็นอุปสรรค เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาบริการให้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้บริการ

9.2 ผลจากการวิจัยครั้งนี้โดยวิธีวิเคราะห์จากปัจจัยส่วนประสมทางการตลาด 7Ps อาจทำให้ผลการวิจัยไม่ครอบคลุมกับความเป็นจริงในยุคปัจจุบันดังนั้นการทำวิจัยในครั้งต่อไปควรพิจารณาปัจจัยทางด้านอื่น ๆ ด้วย

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] กองยุทธศาสตร์การพัฒนาระบบโลจิสติกส์, "รายงานโลจิสติกส์ของประเทศไทยประจำปี 2565" [ออนไลน์]. Available: <https://www.nesdc.go.th/download/logistics/report/LogisticsReportTH.pdf>. (เข้าถึงเมื่อ: 14 กันยายน, 2567).
- [2] วิจัยกรุงศรี, "แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรมปี 2565-2567: ธุรกิจบริการขนส่งสินค้าทางถนน" [ออนไลน์]. Available: <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/logistics/road-freight-transportation/io/road-freight-transportation-2022-2024> (เข้าถึงเมื่อ: 14 กันยายน, 2567).
- [3] SHIPPOP. "อัปเดตภาพรวม Thailand E-Commerce Logistics 2023 by SHIPPOP : ขนส่งพัสดุด่วนในประเทศไทยเป็นอย่างไร" [ออนไลน์]. Available: <https://blog.shippop.com/thailand-e-commerce-logistics-2023/> (เข้าถึงเมื่อ: 14 กันยายน, 2567).
- [4] P. Kotler, *Kotler on marketing*. UK: Simon and Schuster, 2012.
- [5] ศิริวรรณ เสรีรัตน์, ศุภร เสรีรัตน์, งามอาจ ปะพานิช และ ปริญ ลักขิตานนท์, *การบริหารการตลาดยุคใหม่*. กรุงเทพมหานคร: บ.ธรรมสาร จำกัด, 2546.
- [6] กัลยา วานิชย์บัญชา, *สถิติสำหรับงานวิจัย*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [7] M. Tavakol and R. Dennick, "Making sense of Cronbach's alpha," *International journal of medical education*, vol. 2, pp. 53-55, 2011.
- [8] มณีรัตน์ คงเวียง, "ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจใช้บริการขนส่งด่วนของบริษัท KERRY EXPRESS ในอำเภอคลองหลวง กรณีศึกษา สาขาป้อมซัสโก้ พหลโยธิน กม.37," ใน *การประชุมนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 17*, กรุงเทพมหานคร, มหาวิทยาลัยรังสิต: 2565, น. 249-255.
- [9] ราณี ศรีไพบูลย์, ชาญเดช เจริญวิริยะกุล และ สุดาวรรณ สมใจ, "คุณภาพการให้บริการและความพึงพอใจ ด้านการขนส่งสินค้าของบริษัท เคอรี่เอ็กซ์เพรส จำกัด," ใน *การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 11*, กรุงเทพมหานคร, มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา: 2562, น. 605-611.
- [10] อธิษฐ อินปัญญา, "การศึกษาเปรียบเทียบปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความพึงพอใจการให้บริการขนส่งพัสดุของบริษัท ไปรษณีย์ไทย จำกัด และ บริษัทเคอรี่เอ็กซ์เพรส จำกัด," *สารนิพนธ์มหาบัณฑิต*, มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา, 2562.

- [11] ณัฐกิตต์ อยู่ด้วง, ธนธร ชื่นยินดี, ไตรมาส พูลผล และ พุฒิพงษ์ ธนวีระกุล, "ปัจจัยทางการตลาดที่มีผลต่อพฤติกรรมการตัดสินใจซื้อเวชภัณฑ์ยารักษาโรคโควิด-19 กรณีศึกษา โรงพยาบาลรัฐบาลตัวอย่าง," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ*, vol. 20, no. 1, pp. 48–58, 2024.
- [12] R. Pardiyono, "Study of Student Satisfaction from the Marketing Mix Aspect," *Journal of Business, Management, & Accounting*, vol. 2, no. 1, pp. 109-115, 2020.
- [13] B. Afandi and A. A. Parhusip, "The effect of 4p marketing mix on satisfaction J&T Express Saentis Service Users, Medan Branch," *Jurnal Multidisiplin Sahombu*, vol. 3, no. 1, pp. 35-45, 2023.

การพิมพ์ผ้าฝ้ายด้วยสีพิมพ์จากมูลกระบือ Printing Cotton Fabric with Buffalo Dung

ณรัช พรนิธิบุญ¹, ปิยะพงษ์ ยงเพชร² และ ปันณรภัฏ ทกลกักดี^{3*}

^{1, 2, 3} คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

Narat Pornitibun¹, Piyaphong Yongphet² and Pannraphat Takolpuckdee^{3*}

^{1, 2, 3} Faculty of Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage
Pannraphat@vru.ac.th

Received 09 May 2024

Revised 18 December 2024

Accepted 16 January 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษากระบวนการสกัดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระบือ เพื่อการศึกษาสารช่วยติดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระบือ และเพื่อวิเคราะห์คุณภาพสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระบือ และเพื่อเป็นต้นแบบนำไปใช้เชิงพาณิชย์ ผลการสังเคราะห์สีพิมพ์จากมูลกระบือ สามารถจัดรูปแบบกระบวนการผลิตเป็น 11 ขั้นตอน โดยใช้อุณหภูมิการสกัดอยู่ที่ 90 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที แล้วนำมาอบด้วยอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที และนำมาบดละเอียด เพื่อเตรียมปรับสภาพมูลกระบือให้เหมาะสมก่อนใช้งาน เพื่อเข้าสู่กระบวนการผสมกับแป้งพิมพ์สำเร็จต่อไป ผลการใช้สารช่วยย้อมติดสีพิมพ์ ประกอบกับผลการวัดค่าสีระบบ CIE (L*a*b*) โดยเครื่อง Hunter Lab ปัจจุบันที่นำมาเปรียบเทียบ คือ สารส้ม และเฟอร์รัสซัลเฟต พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่นที่ 0.05 และผลการวัดคุณภาพสีพิมพ์ด้วยมาตรฐาน ISO 105 – C10 Test A 2006 คุณภาพในการทนซักอยู่ในระดับที่ 4 – 5 คือ ดีถึงดีมาก และผลการทดสอบทนต่อการขัดถู ด้วยมาตรฐาน ISO 150-X12 2016 พบว่ามีความทนต่อการซักในสภาวะแห้งได้ดีกว่า โดยประโยชน์ของผลการสังเคราะห์สีพิมพ์จากมูลกระบือสามารถนำไปใช้สู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อสร้างรายได้และเป็นแนวทางการรับรองมาตรฐานผลิตภัณฑ์ต่อไป

คำสำคัญ: มูลกระบือ, สารช่วยย้อม, พิมพ์สกรีน

Abstract

This research aimed to study the natural dye extraction process from buffalo dung, investigate mordants for enhancing dye fixation, and analyze the quality of the natural dye derived from buffalo dung, with the goal of developing a commercial prototype. In order to prepare the material for further processing with pre-mixed printing paste, the synthesis method for creating dye from buffalo dung was divided into 11 parts. These procedures included extraction at 90°C for 45

minutes, drying at 150°C for 60 minutes, and grinding into a fine powder. With a Hunter Lab apparatus, CIE (L*a*b*) color measurements were used to assess the use of mordants, particularly alum and ferrous sulfate. The results showed no statistically significant difference at a confidence level of 0.05. The dye's quality was evaluated using ISO 105-C10 Test A 2006 guidelines, and it showed washing fastness levels ranging from 4 to 5, which were classified as good to very good. Abrasion resistance testing under ISO 150-X12 2016 standards revealed that the dye performed better under dry conditions. The findings highlighted the potential of buffalo dung-derived dye in product development for income generation and as a pathway toward product standard certification.

Keywords: Buffalo Dung, Dyeing Agent, Screen Printing

1. บทนำ

กระป๋องเป็นสัญลักษณ์สำคัญของวิถีการเกษตรและชีวิตของคนไทยมาตั้งแต่โบราณ มีบทบาทสำคัญในกระบวนการผลิตข้าวและช่วยฟื้นฟูแรงงานในหลายขั้นตอนการเกษตร แต่เทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงและการใช้เครื่องจักรทุนแรงที่มีประสิทธิภาพได้เข้ามา ทำให้เกษตรกรต้องใช้เงินทุนมากขึ้น และเกษตรกรที่ยากจนไม่สามารถดำเนินการผลิตได้ โดยเฉพาะในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีเกษตรกร ร้อยละ 20 ที่ต้องเช่า กระป๋องในอัตราค่าเช่าสูง และบางครั้งยังไม่สามารถชำระค่าเช่าได้ ทำให้เกษตรกรต้องเผชิญกับภาระหนี้สินและความยากจนในการดำรงชีวิต เป็นสาเหตุหนึ่งของปัญหาทางสังคมและเศรษฐกิจในพื้นที่นี้ไปในทิศทางที่ไม่ดีขึ้นโดยรวมของประเทศ การสนับสนุนและพัฒนาเทคโนโลยีเกษตรและการส่งเสริมแนวทางใหม่ในการเกษตรอาจช่วยแก้ปัญหานี้ให้กับเกษตรกรในภาคตะวันออกเฉียงเหนือในอนาคต [1] กระป๋องไทยนับว่าเป็นสัตว์เลี้ยงที่มีความสำคัญต่อระดับเกษตรกรรายย่อยในชนบทอยู่ตลอดมา โดยนับว่าเป็นส่วนหนึ่งในระบบการผลิตการเกษตรที่มีการเพาะปลูกเป็นรายได้หลัก กระป๋อง (ควาย) ถูกใช้เป็นแรงงานในภาคการเกษตร การใช้มูลกระป๋องเป็นปุ๋ยเพื่อไปใช้ในเชิงเกษตรเหลือก็ออกจำหน่าย และเมื่อมีความจำเป็นก็สามารถขายเป็นรายได้อีกทางหนึ่ง ในขณะเดียวกันสามารถใช้ผลผลิตเหลือใช้ที่ได้ในไร่นาซึ่งทำให้มีราคาถูกมาใช้เป็นอาหารเลี้ยงกระป๋องเพื่อเปลี่ยนให้เป็นเนื้อสัตว์ที่มีราคาสูงได้จะสังเกตได้ว่ากระป๋องพื้นเมืองที่เลี้ยงด้วยอาหารแบบเดียวกันและอยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกันนั้น กระป๋องยังคงสภาพเดิม ซึ่งอาจเนื่องมาจากการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมทำให้กระป๋องมีความ แตกต่างจากโคและเอื้องประโยชน์ในการนำเอาสารอาหารไปเปลี่ยนแปลงเป็นเนื้อได้ดีกว่าโค อย่างไรก็ตาม จากข้อเท็จจริงซึ่งเป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าการเลี้ยงกระป๋องของเกษตรกรได้ถูกละเลยจากภาครัฐ และแม้แต่เกษตรกรเองก็นิยมและหันไปเลี้ยงสัตว์พันธุ์ต่างประเทศ การเลี้ยงกระป๋องของเกษตรกรยังเป็นไปแบบพื้นบ้านไม่มีระบบการผลิตในเชิงธุรกิจ ทั้งนี้เนื่องจากมาจากการมองข้ามความสำคัญดังกล่าวซึ่งอาจจะเกี่ยวข้องกับลักษณะทางเศรษฐกิจและสังคมของเกษตรกรเองด้วย [2]

จากปัญหาในกระบวนการบริหารจัดการมูลกระป๋อง พบว่า กระป๋อง 1 ตัว จะสามารถถ่ายมูลต่อวันในปริมาณ 25-30 กิโลกรัมต่อวัน มูลกระป๋องดังกล่าวที่ยังขาดการบริหารจัดการในการนำไปใช้ประโยชน์และยังมีผลต่อสิ่งแวดล้อมทั้งกลิ่นและเป็นแหล่งพาหะนำโรคได้ [3] จากการศึกษาค้นพบว่ามูลกระป๋องสามารถนำไปใช้ประโยชน์ นอกจากนำมาทำ

เป็นปุย และสามารถนำไปเป็นวัสดุผสมดินเพื่อขึ้นโครงสร้างเป็นผนังยังฉางข้าว และพืชผลทางการเกษตร ผ่านภูมิปัญญาด้านเกษตร และด้านหัตถกรรม เพื่อลดค่าใช้จ่ายในครัวเรือน หรือลดต้นทุนในการใช้วัสดุแต่ไม่เกิดการสร้างมูลค่าเท่าที่ควร

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเห็นความสำคัญของมูลกระปือไทยและจะนำไปใช้ประโยชน์ เพื่อนำมาพัฒนาเป็นสีพิมพ์สกรีนธรรมชาติและเป็นทางเลือกใหม่ในอุตสาหกรรมสิ่งทอเชิงสร้างสรรค์ ที่ผนวกไปด้วยภูมิปัญญาและวิถีชีวิตต่อไปด้วยกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการนำไปถ่ายทอดองค์ความรู้ซึ่งสามารถสร้างรายได้ให้กับท้องถิ่น

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

- 2.1 เพื่อศึกษากระบวนการสกัดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระปือ
- 2.2 เพื่อการศึกษาสารช่วยติดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระปือ
- 2.3 เพื่อทดสอบคุณภาพสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระปือ

3. ขอบเขตงานวิจัย

- 3.1 พื้นที่ในการศึกษาในมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี
- 3.2 วัตถุดิบมูลกระปือ อายุ 17 ปี จากในมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี
- 3.3 ระยะเวลาในการดำเนินงานระหว่างเดือน มีนาคม – พฤษภาคม 2567

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

4.1 วิธีพิมพ์ผ้าด้วยเทคนิค (สกรีน)

เทคนิควิธีพิมพ์สกรีน (Screen Printing) สามารถแบ่งได้ 3 แบบ คือ

4.1.1 พิมพ์สกรีนสีเดียวหรือหลายสี (Single or Multi Color) พิมพ์ด้วยหมึกสีทึบ แต่ละสีเกิดจากการพิมพ์สกรีนสีละ 1 ครั้ง โดยการพิมพ์จำนวนมากที่เป็นลักษณะสีเดียวกัน

4.1.2 วิธีพิมพ์แบบหมึกชุดสอด้สี (Process Color) พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ชุด สอดสีใช้หมึกกึ่งโปร่งแสง ประกอบด้วย สีดำ สีคราม สีบานเย็น และสีเหลือง การพิมพ์ด้วยหมึกประเภทนี้จะเป็นการพิมพ์โดยใช้แม่สกรีนพิมพ์ซ้อนหรือเหลื่อมกันเพื่อให้เกิดการผสมผสานกันระหว่างหมึกพิมพ์ได้สีต่าง ๆ ออกมามากมายตามต้นฉบับ

4.1.3 วิธีพิมพ์สกรีนเทคนิคพิเศษ (Special Effect) เป็นวิธีพิมพ์สกรีนในชั้นงาน บางชนิดงานที่พิมพ์สกรีนด้วยวิธีทั่วไป เช่น การพิมพ์สกรีนบนวัสดุรูปทรงวงรี บนวัสดุผิวโค้ง และบนวัสดุที่ผิวไม่เรียบหรือมีผิวสัมผัส เป็นต้น

4.2 การใช้สีในวิธีพิมพ์สกรีน

สุภารัตน์ รักชลธิและคณะได้ศึกษา [3] สีพิมพ์ (Based Ink) เป็นเรื่องสำคัญที่สุดในการพิมพ์สกรีนในทุกวิธีการ หมึกพิมพ์ สีพิมพ์ มีความเข้มข้นและความละเอียดสูง มีอยู่หลากหลายประเภทเพื่อให้เลือกใช้ได้เหมาะสม กับวิธีพิมพ์สกรีนบนวัสดุต่าง ๆ เช่น ผ้า ไม้ กระดาษ กระจก โลหะ แผ่นวงจรไฟฟ้า และพลาสติก เป็นต้น วิธีเตรียมสีพิมพ์สกรีน ได้แก่ สารข้น ตัวสี สารช่วยติด ดังนั้นวิธีพิมพ์สกรีนต้องเลือกหมึกให้เหมาะสมและถูกต้อง กับชนิดและประเภทของวัสดุชิ้นงาน ประเภทหมึกพิมพ์สกรีนมีให้ เลือกหลายชนิด อาจจำแนกตามคุณสมบัติอยู่ 4 ชนิด ดังนี้

4.2.1 สีพิมพ์สกรีนใช้น้ำ (Water-Based Ink) เป็นหมึกพิมพ์สกรีนมีองค์ประกอบของน้ำเป็นตัวทำละลาย ทำให้หมึกพิมพ์สกรีนอยู่ในลักษณะของเหลว หมึกพิมพ์สกรีนใช้น้ำที่ผลิตมีคุณสมบัติของเนื้อสี พร้อมเฉดสีที่แตกต่าง

กัน เนื้อสีแห้งด้วยวิธีการระเหยของน้ำ ถ้ากรณีเนื้อสีมีความเข้มข้นปริมาณมากเกินไปจนความเหมาะสม ให้นำนํ้ายาผสมสี (Softy) ทำละลายเพื่อให้เนื้อสีไม่มีกลิ่นเคมี สีพิมพ์สกรีนเชื่อนํ้ามันเหมาะสมกับวิธีพิมพ์สกรีนบนวัสดุ เช่น ผ้าพลาสติก และกระดาษ โดยสามารถทำละลายได้ด้วยน้ำ วิธีใช้งานสีพิมพ์สกรีนเชื่อนํ้า จำแนกประเภทสีได้ ดังนี้

4.2.1.1 สีพิมพ์สกรีนธรรมดา สีที่มีลักษณะจมน เหมาะสำหรับการพิมพ์สกรีนผ้าสีขาว หรือผ้าสีอ่อน และวิธีพิมพ์สกรีนกระดาษบางชนิด เนื้อสีพิมพ์จะจมลงบนเนื้อผ้า ทำให้เกิดความเรียบเนียนต่อบนผิวสัมผัสมีคุณสมบัติทนทานต่อการขัดถู

4.2.1.2 สีพิมพ์สกรีนแบบลอย เหมาะสมกับวิธีพิมพ์สกรีนผ้าสีดำหรือสีเข้ม เมื่อสีพิมพ์สกรีนแห้งจะลอยและเฉดสีเด่นชัดมีความสดของสีเมื่อดูด้วยตาเปล่า

4.2.2 สีพิมพ์สกรีนเชื่อนํ้ามัน วิธีพิมพ์สกรีนสีเชื่อนํ้ามัน (Solvent-Based Ink) หมึกพิมพ์สกรีนที่ต้องทำละลายนํ้ามัน และใช้นํ้ายาโซลเว้นท์ (Solvent) เนื้อสีพิมพ์สกรีนจะทำปฏิกิริยากับอุณหภูมิห้อง วิธีการจัดกลืนของสีพิมพ์สกรีนเชื่อนํ้ามันโดยวิธีนํ้ามันที่เป็นตัวทำละลาย โดยแยกประเภทได้ดังนี้

4.2.2.1 สีพิมพ์สกรีนครุโลท์ (Ddlte Ink) ใช้ระยะเวลานานของการระเหยของสีพิมพ์สกรีน ต้องผสมนํ้ามันเพื่อเร่งปฏิกิริยาหรือนํ้ามันสนในการล้างทำความสะอาด เหมาะกับวัสดุงานพิมพ์สกรีนบนโลหะ กระดาษ ไม้ กระดาษ และพลาสติก

4.2.2.2 สีพิมพ์สกรีนพีวีซี (PVC) มีลักษณะสีพิมพ์สกรีนที่แห้งเร็วโดยใช้นํ้ามันผสมเพื่อเร่งปฏิกิริยาใช้นํ้ามันสำหรับล้างบล็อกสกรีน ผิวสัมผัสสีพิมพ์สกรีน มีลักษณะแบบโปร่งแสง และทึบแสง เหมาะสำหรับการพิมพ์สกรีนบนอะคริลิก กระดาษ หนังเทียม บนขวดพลาสติก และสติ๊กเกอร์

4.3 สารข้น

สารข้น (Thickening Agent) [4] เป็นสารที่มีลักษณะหนืดสูง สารดังกล่าวมีคุณสมบัติดูดความชื้นและน้ำได้ดี ทำให้สารข้นที่อยู่ในแป้งพิมพ์สกรีนจะเป็นตัวทำปฏิกิริยากับสี สารเคมี ที่มีคุณสมบัติทำละลาย เพื่อทำให้แป้งพิมพ์สกรีนติดในวัสดุอย่างสม่ำเสมอ [4] สารข้นเป็นสารที่มีเอกลักษณ์พิเศษ คือช่วยทำให้นํ้ามีความหนืดสูงขึ้นลักษณะเดียวกับแป้งเปียก โดยลักษณะพิเศษนี้จึงนำสารข้นมาใช้ประโยชน์ในการพิมพ์สกรีนลวดลายละเอียดต่าง ๆ

4.4 สารมอร์แดนท์

สารมอร์แดนท์ [5] คือ สารธรรมชาติแต่ละชนิดที่เลือกมาผสมใช้เส้นใยธรรมชาติมีคุณสมบัติติดสีและมีความคงทนต่อการซักล้าง ขัดถู และไม่ทนต์ต่อแสงยูวี ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายในของพืชและเส้นใยที่นำมาใช้ย้อม จึงมีการใช้ สารประกอบต่าง ๆ มาเป็นตัวช่วยในการทำให้เส้นใยดูดซับสีให้สีเกาะเส้นใยได้แน่นขึ้น มีความทนทาน ต่อแสงและการขัดถูเพิ่มขึ้น ซึ่งเรียกว่าสารช่วยย้อมและสารช่วยให้สีติด สารเหล่านี้นอกจากจะเป็นตัว จับยึดสีและเพิ่มการติดสีในเส้นใยแล้วยังช่วยเปลี่ยนเฉดสีให้เข้มจางหรือสดใสสว่างขึ้น

4.4.1 สารช่วยย้อม หรือสารกระตุ้นสี เป็นสารที่ช่วยให้สีติดกับเส้นด้ายดีขึ้นและ เปลี่ยนเฉดสีธรรมชาติให้เปลี่ยนแปลงไปจากสีเดิม ในสมัยโบราณจะใช้น้ำเกลือหรือปัสสาวะสัตว์ลงไปจนถึงย้อม ปัจจุบันมีการใช้สารที่ได้จากสีเคมีและสารธรรมชาติดังนี้

4.4.1.1 สารช่วยย้อมเคมี (มอร์แดนท์) หมายถึงวัตถุธาตุที่ใช้ผสมสีเพื่อให้สีติด แน่นกับผ้าที่ย้อม ส่วนใหญ่เป็นเกลือของโลหะพวกอลูมิเนียม เหล็ก ทองแดง ดีบุกและโครเมียม สำหรับมอร์แดนท์ที่แนะนำให้ใช้สำหรับการย้อมระดับอุตสาหกรรมในครัวเรือนเป็นสารเคมีเกรดการค้าซึ่งมีราคาถูก คุณภาพเหมาะสมกับงาน มีวิธีการใช้งานที่สะดวกโดยการชั่ง ตวง วัดพื้นฐาน แล้วนำไปละลายน้ำตามอัตราส่วนที่ต้องการและหาซื้อได้ง่ายจากร้านค้าสารเคมี

ทางวิทยาศาสตร์ หรือทาง การแพทย์ทั่วไป สารมอร์แดนท์ที่ใช้กันทั่วไป คือ

1) สารส้ม (มอร์แดนท์อลูมิเนียม) จะช่วยจับยึดติดสีกับเส้นด้ายและช่วยให้สีสดใส และสว่างขึ้น มักใช้กับการย้อมสีน้ำตาล - เหลือง - เขียว

2) เฟอร์รัสซัลเฟต (มอร์แดนท์เหล็ก) เหล็กจะช่วยย้อมสีติดเส้นด้ายและ ช่วยเปลี่ยนเฉดสีย้อมธรรมชาติจากเดิมพีช เป็นสีโทนเทา - ดำ ซึ่งมอร์แดนท์เหล็กมีข้อดี คือสามารถควบคุม ปริมาณการใช้ได้ แต่มีข้อควรระวัง คือไม่ควรใช้ในปริมาณที่มากเกินไปเพราะเหล็กจะทำให้เส้นด้ายเปื่อย

4.5 วิธีย้อมสีพิมพ์

วิธีทำให้สีติดบนผ้าและเส้นด้ายดี [6] นั้นจะต้องควบคุมอุณหภูมิที่ประกอบหลัก และมีระยะเวลาเป็นปัจจัยเสริม ดังต่อไปนี้

4.5.1 อุณหภูมิที่เหมาะสม จะเกิดปฏิกิริยาฟิล์มของสารชั้นพองตัว แต่ต้องควบคุมให้เหมาะสม ทำให้สารชั้นที่พิมพ์สกรีนเกิดการกระจายตัวออก ซึ่งจะทำให้ลวดลายหลุดกรอบของเส้นบล็อกสกรีน

4.5.2 อุณหภูมิทำให้สีพิมพ์เป็นสารแขวนลอยหรือสารละลาย เพื่อเป็นตัวกลางทำให้เกิดปฏิกิริยาการกระจายติดเส้นใยได้เหมาะสม

4.5.3 อุณหภูมิทำให้เส้นใยเกิดปฏิกิริยาดูดซับสีพิมพ์สกรีนได้ดี ทำให้เส้นใยสามารถรับติดสีเข้าไปภายในเส้นใยได้ดี

4.5.4 อุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของสีได้ดี สามารถเติมสารประเภทดูดความชื้น ทำให้สีพิมพ์สกรีนกระจายติดในเส้นใยได้ดีขึ้น

4.6 สีธรรมชาติ

สีธรรมชาติ หมายถึง สารที่สกัดได้จากวัสดุธรรมชาติ เช่น พืช สัตว์ และแร่ธาตุ ที่สามารถทำละลายในน้ำ และสามารถนำมาใช้เพื่อย้อมผ้า ผ่านกระบวนการต้ม หมัก สามารถให้สีติดในเส้นใยได้ดี สอดคล้องกับประวัติศาสตร์การใช้สีจากธรรมชาติที่มีมานานกว่า 2,000 ปี และมีการบันทึกครั้งแรกเกี่ยวกับการใช้สีครามในประเทศจีนมีอายุมากกว่า 6,000 ปี ในราชวงศ์ฉิน [7] สีธรรมชาติที่ประวัติศาสตร์ของไทยมีความหลากหลายในทั้งสีและแหล่งที่มาเนื่องจากมี

การสกัดสารจากวัสดุธรรมชาติที่แตกต่างกัน เช่น พืช สัตว์ และแร่ธาตุ [8] การสกัดสีจากพืชบางชนิดไม่เหมาะสมและไม่คงทน ต่อการซักล้าง หรือทนต่อแสง ทำให้ได้สีออกเข้มหมอง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สีย้อมสังเคราะห์หรือสีเคมีในภาคอุตสาหกรรมสิ่งทอ การใช้สีย้อมสังเคราะห์ทำให้ผ้าทอสดใสจึงนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เมื่อนำมาใช้เป็นระยะเวลานานสีสังเคราะห์ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงทำให้ต้องกลับมาอนุรักษ์ในการใช้สีธรรมชาติ แต่กระบวนการและองค์ความรู้การสกัดสีจากธรรมชาติกลับลดลง [9],[10] การแบ่งสีธรรมชาติตามแหล่งที่มาได้ 3 ประเภทดังนี้

4.6.1 การใช้สีจากพืช (Vegetable Dyes) หาวัสดุธรรมชาติที่ใช้สกัดสารสีได้ง่าย และสามารถให้สีสันทันทีหลากหลายได้จากส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ราก เปลือกกราก ลำต้น เปลือกลำต้น แก่นไม้ ใบ ดอก ผล และเมล็ด การใช้สีจากพืชมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน

4.6.2 สีจากสัตว์ (Animal Dyes) ได้รับมาจากตัวแมลงครึ่งหรือสารที่เกิดจากการคัดหลั่งออกของตัวแมลง เช่น โคชินิล (Cochineal) เคอร์มิส (Kermes) และครั่ง (Lac) ซึ่งให้สีสันทันทีมีหลายเฉดและมีคุณภาพสูง เนื่องจากสารสีที่ได้มีความคงทนต่อแสงยูวี และความคงทนในการซักล้าง เป็นที่นิยมในการสกัดสีธรรมชาติในภาคอุตสาหกรรม

เครื่องสำอางการย้อมผ้า และสีสำหรับงานศิลปะต่าง ๆ

4.7 ทฤษฎีการวัดค่าสี

4.7.1 การวัดค่าสีในระบบ $L^* a^* b^*$ เป็นกระบวนการที่ใช้ในการเทียบคุณสมบัติการมองเห็นของสีต่อวัตถุตัวแปร L^* แทนความสว่างหรือความเข้มของสี a^* แทนค่าสีแดงแทนค่าสีเขียว และ b^* แทนค่าสีน้ำเงินแทนค่าสีเหลือง ซึ่งทั้งสามตัวแปรแทนค่าเป็นตัวเลขที่ใช้บ่งบอกลักษณะของสี และการมองเห็นสีของมนุษย์เกิดจากแสงกระทบต่อวัตถุนั้น ๆ และสะท้อนสีเข้าตา ส่งไปยังสมองที่แปลงออกมาเป็นสีที่เราเห็น การใช้เครื่องวัดสีในระบบ $L^* a^* b^*$ ช่วยในการแปลงค่าสีของวัตถุเมื่อเปรียบเทียบกับค่าสีมาตรฐาน ส่งผลให้สามารถควบคุมคุณภาพสีบนผลิตภัณฑ์ให้ได้มาตรฐาน [11]

4.7.1.1 ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดเจดสีมีอยู่ 3 ประเภท

1) แหล่งกำเนิดแสง (Light Source) มีผลอย่างมากในการบรรยายสีของ วัตถุแหล่งกำเนิดแสงสำหรับการมองเห็นมาจาก 2 แหล่ง คือ

(ก) แหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติ ได้แก่ แสงจากดวงอาทิตย์หรือ แสงแดดในตอนกลางวัน (Daylight) ส่องมายังพื้นผิวโลกเป็นแสงสีขาว และเมื่อผ่านปริซึมแสงสีขาวนี้ จะแยกออกเป็นเจดสีที่ต่างกััน แบ่งออกเป็น 7 สี โดยสีจะมีความยาวคลื่นที่ต่างกัันอยู่ในช่วงระหว่าง 400 - 780 นาโนเมตร แต่แสงแดดในแต่ละท้องที่ของประเทศต่างจะพบว่าการกระจายพลังงาน (Spectral Energy Distribution : SED) ที่ต่างกัันไปตามภูมิประเทศ ภูมิอากาศ ฤดูและช่วงเวลา ดังนั้น การมองเห็นสีที่มีแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติในช่วงเวลา สถานที่หรือสภาพอากาศที่ต่างกัันแล้ว ก็เป็นสาเหตุให้การมองเห็นสีต่างกัันไปด้วย

(ข) แหล่งกำเนิดแสงที่ประดิษฐ์ขึ้น มีอยู่กันหลายแบบ ได้แก่ หลอดไฟ Incandescence หลอดไฟทั้งสแตน หลอดฟลูออเรสเซนต์ และหลอดไฟซินอนอาร์ต

2) วัตถุที่มอง (Specimen) วัตถุที่ทึบแสง (Opaque) จะได้จากการสะท้อนของแสงและกระทบและเกิดสีที่ต่างกัันจากวัตถุโปร่งแสง (Translucent)

3) ผู้สังเกตการณ์ (Observer) เป็นปัจจัยสำคัญของการมองเห็นเมื่อแสงตกกระทบและสะท้อนบนวัตถุเข้าตาผู้สังเกตการณ์แล้วส่งไปยังเรตินาที่มีจุดไวต่อแสงแบ่งได้อยู่ 2 ชนิด คือ ส่วนแยกความต่างระหว่างความทึบแสง และความสว่าง สามารถแบ่งสีที่เรียกว่า Cones แยกออกเป็น 3 ชนิด คือ ส่วนที่ไวต่อแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน

4.7.1.2 การมองเห็นด้วยตาสามารถบ่งบอกถึงลักษณะของวัตถุได้ด้วยลักษณะที่ต่างกััน

1) Hue (สี) คือสีที่ปรากฏในการมองเห็น เช่น สีแดง สีเขียว หรือสีน้ำเงิน สีนี้บ่งบอกถึงลักษณะพื้นฐานของสีที่มองเห็นได้

2) Lightness (ความสว่าง) หมายถึงระดับความสว่างหรือความมืดของสี ซึ่งเกิดจากการสะท้อนแสงที่มีค่าต่างกัันสีที่มีความสว่างมากจะดูสว่าง ส่วนสีที่มีความสว่างน้อยจะดูมืด

3) Chroma (ความสดใส) คือความเข้มและความบริสุทธิ์ของสี ซึ่งบ่งบอกถึงความเข้มของสีและปริมาณของสีที่ปรากฏสีที่มี Chroma สูงจะดูสดใสและมีความเข้ม

4.7.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสีเรียกว่า "สเปกโตรโฟโตมิเตอร์" (Spectrophotometer) ซึ่งสามารถวัดสีของวัตถุและแปลงผลลัพธ์เป็นค่าตัวเลขได้ โดยการวัดปริมาณการสะท้อนแสงของวัตถุแล้วเปรียบเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงที่เป็นกราฟการสะท้อนแสง (Reflectance Curve) ของสีนั้น ๆ วัตถุที่มีสีต่างกัันจะมีกราฟการ

สะท้อนแสงที่แตกต่างกัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์สามารถใช้วัดค่าสีในระบบ CE ($L^*a^*b^*$) ซึ่งกำหนดให้ L^* เป็นค่าความสว่าง (Lightness) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 100 โดยค่า L^* เพิ่มขึ้นจะหมายถึงสีที่สว่างมากขึ้น นอกจากนี้ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยังสามารถทำการวัดค่าความยาวคลื่นของแสงที่สะท้อนออกมาจากวัตถุ เช่น สีน้ำเงินมีความยาวคลื่นที่ 430 - 460 นาโนเมตร สีเขียวมีความยาวคลื่นที่ 500 - 580 นาโนเมตร และสีแดงมีความยาวคลื่นที่ 620 - 780 นาโนเมตร ทำให้สามารถวัดและทำความเข้าใจลักษณะของสีได้อย่างละเอียด

แกน a^* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางในทิศทางสีแดง

แกน a^* ที่เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีเขียว

แกน b^* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีเหลือง

แกน b^* ที่เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน และในการหาค่าความแตกต่างของสีที่เป็น

ตัวเลขนั้นเมื่อพิจารณา จะพบว่าจุด ๆ หนึ่งในพื้นที่ (Space) นั้น เป็น $L^* a^* b^*$ และเมื่อสีมีการเปลี่ยนเฉดสีไปได้อีกจุดหนึ่ง พื้นที่ (Space) เป็น $L^* a^* b^*$ ซึ่ง 2 จุดนี้จะมีระยะห่างกันในพื้นที่ (Space) เท่าไรก็จะเป็นตัวบ่งบอกถึงความแตกต่างของสี ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

โดย ΔE^* คือ ค่าความแตกต่างของสีสอดคล้องได้ว่าการมองเห็นสีของมนุษย์ และการวัดสีด้วยเครื่องวัดจะต้องอาศัยปัจจัยที่มีผลต่อการมองเห็นสีและการวัดสีมีปัจจัย 3 อย่าง ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง แสงที่มีความแตกต่างกันอาจสร้างผลต่อการมองเห็นสีของวัตถุจากแสงแหล่งต่าง ๆ อาจมีอัตราส่วนและเฉดสีที่ต่างกัน วัตถุที่มีสีต่าง ๆ จะสะท้อนแสงได้ตามลักษณะของสีนั้น ๆ หรือวัสดุที่สะท้อนให้เห็นทำให้เกิดการมองเห็นสี การอ่านค่าสีความแตกต่างในการมองเห็นสีของแต่ละบุคคลอาจมีผลต่อวิธีการอ่านค่าสี สำหรับเครื่องวัดสีสามารถให้ผลลัพธ์ที่เป็นไปตามมาตรฐานเชื่อถือได้ และสามารถวัดความแตกต่างของเฉดสีผ่านค่าตัวเลขที่แปรผลได้แม่นยำ การมองเห็นแต่ละบุคคลอาจมีความต่างในการมองเห็นสี การรับรู้สภาพแวดล้อม หรือความแตกต่างทางพันธุกรรมที่ทำให้การอ่านค่าสีส่งผลให้เกิดความแตกต่างกันไป ในทางอุตสาหกรรมการใช้เครื่องวัดสีช่วยให้ได้ค่าที่มีความถูกต้องตามมาตรฐาน

4.7.2 ค่าความเข้มของสี (K/S) ถูกวัดจากการสะท้อนแสง (Reflectance) ของวัสดุ โดยที่ถ้าสะท้อนออกมาทั้งหมด ค่า Reflectance (R) จะเท่ากับ 1 และถ้าดูดกลืนหมด ค่า Reflectance (R) จะเท่ากับ 0 โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างค่า Reflectance (R) กับค่าความเข้มของสี (K/S) ซึ่งค่า K คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorption Coefficient) ของวัสดุ และค่า S คือ ค่าการกระจายแสง (Scattering Coefficient) ของวัสดุ การหาค่า K และ S ไม่สามารถที่จะวัดได้โดยตรง แต่สามารถหาอัตราส่วนของ K และ S เป็นค่า (K/S) หรือความเข้มของสี โดยที่เปรียบเทียบกับค่า Reflectance (R) ของวัสดุที่วัดได้ ค่า (K/S) ของวัสดุที่บ่งจะมีค่าคล้าย ๆ กับค่า Absorbance ของสารละลาย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าดูดกลืนแสงของสารละลาย นั้นหมายความว่า ค่า (K/S) สามารถใช้เพื่อประมาณค่าดูดกลืนแสงของวัสดุที่บ่งได้ ค่า (K/S) มีความสัมพันธ์กับการดูดกลืนแสงของสารละลาย ตามสมการที่ (2)

$$K / S = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (2)$$

ค่า (K/S) แสดงให้เห็นถึงความยาวของคลื่นแสงที่ไม่เท่ากัน และมีค่าเฉพาะของแต่ละความยาวคลื่น เมื่อ

เทียบกับมาตรฐาน โดยมาตรฐานมีวิธีวัดที่ Lambda Max ของแต่ละสี ซึ่ง Lambda Max คือ แทนค่าความยาวคลื่นที่ (K/S) ระดับที่สูงที่สุดในทางวิทยาศาสตร์ ค่าสี Lambda Max ของแต่ละสีมีการกำหนดไว้เป็นตำแหน่งที่มีความยาวคลื่นที่สูงสุด (Peak) Yellow Lambda Max ของ (K/S) อยู่ในระดับที่ 420 นาโนเมตร Red Lambda Max ของ (K/S) หรือ 520 นาโนเมตร Blue Lambda Max ของ (K/S) ที่ 620 นาโนเมตร ในวิธีการ Tistimodus เมื่อแสดงค่า (K/S) ของแต่ละแม่สี สามารถนำค่าใช้ในการประเมิน อัตราส่วนของแต่ละสีที่ต้องผสมเพื่อให้ได้ Target ที่ต้องการ วิธีนี้ถูกเรียกว่า Tistimodus เมื่อแสดงค่า (K/S) ของสีที่ใช้เป็นแม่สี สามารถคำนวณหาค่าปริมาณของแต่ละสีที่ใช้ในการผสมเพื่อให้ได้ Target ที่ต้องการได้

4.8 การทดสอบความคงทนของสี

4.8.1 ความคงทนของสีต่อการซักล้างเป็นการทดสอบที่กำหนดขึ้นเพื่อประเมินความคงทนของสีของวัสดุสิ่งทอต่อการซักล้างในสอดคล้องกับการใช้งานจริง การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 105 – C10 Test A 2006 โดยใช้วิธีการต่อไปนี้ เตรียมตัวอย่าง นำชิ้นทดสอบที่ประกบติดอยู่กับผ้าหลายเส้นใย โดยการนำตัวอย่างทดสอบมาล้างในสารละลายน้ำสบู่ที่กำหนดตามมาตรฐาน ภายใต้อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด และประเมินผลหลังจากการทดสอบเสร็จสิ้น จากนั้นประเมินผลการเปลี่ยนแปลงของสีบนชิ้นทดสอบและประเมินค่าการติดเปื้อนสีบนผ้าตัวอย่างที่ประกบติดอยู่กับผ้าหลายเส้นใย เช่น ผ้าไหม ผ้าฝ้าย ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าอะคริลิก เป็นต้น การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้างเป็นวิธีการทดสอบสรุปข้อมูลเป็นระดับ เพื่อประเมินความทนของสีต่อการใช้งานปกติในสภาพแวดล้อมที่มีการล้างซ้ำ ๆ ซึ่งมีความสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอและการผลิตเสื้อผ้า

4.8.2 ความคงทนของสีต่อการขัดถู ขอบเขตการทดสอบความคงทนของสีต่อการขัดถู

4.8.2.1 วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105- X12 2016 ใช้ทดสอบความคงทนของสี ต่อการขัดถู และการตกสีบนวัสดุอื่น และใช้ได้กับสิ่งทอทุกชนิด

4.8.2.2 วิธีการทดสอบนี้ประยุกต์ใช้กับวัสดุสิ่งทอที่นำมาปูคลุมบนพื้น

4.8.2.3 วิธีการทดสอบแบ่งเป็น 2 วิธี คือ วิธีการขัดถูด้วยผ้าขาวแห้ง และวิธีการขัดถูด้วยผ้าขาวเปียก ความคงทนของสีต่อการขัดถู ตามมาตรฐาน ISO 105 - X12 2016 ชิ้นตัวอย่างทดสอบจะถูกนำมาขัดถูกับผ้าขาวแห้ง และผ้าขาวเปียก

4.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.9.1 ณัฐดนัย รุ่งเรืองกิจไกร และคณะ [12] ได้ศึกษาการพิมพ์ผ้าฝ้ายด้วยแป้งจากหัวบอน โดยใช้สีพิกเมนต์ (Pigment) ในกระบวนการการพิมพ์ ผ้าฝ้ายถูกพิมพ์ด้วยสารกันสีที่ได้จากแป้งของหัวบอนและใช้เทคนิคการใช้สีพิกเมนต์เป็นสีพิมพ์ทับ การวิจัยนี้ตรวจสอบสมบัติการพิมพ์ภายใต้กระบวนการต่าง ๆ โดยสำรวจความเข้มของสี (Colour Strength K/S) ความขาว (Whiteness) และความคงทนของสี ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผ้าที่ผ่านการพิมพ์มีความเข้มสีอยู่ในระดับที่เข้ม ลวดลายที่กันสับนผ้ามีความชัดเจนและมีความขาว ความคงทนของสีมีค่าอยู่ในระดับที่มีประสิทธิภาพทั้งในด้านความเข้มของสีและความขาว การวิจัยนี้ทำให้เห็นถึงความสามารถในการพัฒนากระบวนการพิมพ์ผ้าฝ้ายด้วยแป้งจากพืชหัวบอนในทางที่มีประสิทธิภาพและคงทนต่อการใช้งานผลความคงทนของสีมีค่าอยู่ในระดับระหว่างพอใช้ถึงดี

4.9.2 จริญญา คล้ายจ้อย และคณะ [13] จากผลการศึกษาคูณสมบัติการพิมพ์สกรีน และความคงทนของสีของผ้าไหมที่พิมพ์สกรีนด้วยสีจากเปลือกมะพูด และแป้งจากหัวบอน โดยมุ่งการประเมินผลการพิมพ์สกรีนโดยใช้วิธีกันสี และใช้สารกันสีจากแป้งจากหัวบอน เพื่อพิมพ์สีพิมพ์จากการสกัดสีเปลือกมะพูด และพิมพ์ทับตามลายที่กำหนด สาร

ก้านสีที่จากแป้งของหัวบอนมีอัตราส่วนดังนี้ แป้งจากหัวบอน ร้อยละ 19 น้ำ ร้อยละ 17 โซเดียมคลอไรด์ ร้อยละ 38 แคลเซียมไฮโปไซท์ ร้อยละ 17 และน้ำมันพืช ร้อยละ 9 แล้วนำมาผ่านกระบวนการให้เกิดปฏิกิริยาดัวยอุณหภูมิ ที่ 110 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ผ่านการทดลองเพื่อช่วยกันสี และนำมาล้างแป้งจากหัวบอนออกง่าย จากผลการทดลอง แสดงถึงเป้าหมายเกิดการพัฒนาระบบการพิมพ์ผ้าไหม ด้วยวิธีสีจากเปลือกมะพูดและแป้งจากหัวบอน เพื่อได้รับ มาตรฐานที่มีคุณภาพ และเหมาะสมกับการใช้งานด้วยลวดลายที่ออกแบบ จากกระบวนการพบว่าลวดลายที่คมชัด ผล ความคงทนต่อการขัดถูของสีพิมพ์สกรีนมีค่าอยู่ในระดับระหว่าง พอใช้ถึงดี

4.9.3 Mongkhrolattanasit et al. [14] ได้ศึกษาการพิมพ์บนผ้าไหมด้วยสีธรรมชาติจากสีเสียด ที่ใช้แป้ง จากหัวบอนโดยการพิมพ์แบบรีซีสต์ ศึกษาการพิมพ์กันโดยการใส่สารกันสีจากแป้งที่ได้จากหัว บอนและใช้สีจาก สีเสียด เป็นเทคนิคการทำบาติกด้วยสีธรรมชาติ สัดส่วนที่เหมาะสมของสารกันสีที่ได้ จากแป้งของหัวบอน ประกอบด้วยแป้งจากหัวบอนร้อยละ 200 น้ำร้อยละ 36 โซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 30 แคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 และน้ำมันพืชร้อยละ 4 การพ่นสีด้วยลมร้อนที่ 120 องศาเซลเซียส 3 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งสามารถช่วยกัน สีและสามารถล้างแป้งจากหัวบอนออกได้ง่าย ลวดลายบริเวณที่กันสีบนผ้าจะให้ลวดลายที่คมชัดและมีความขาว ผล ความคงทนของสีต่อแสงและการ ขัดถูมีค่าอยู่ในระดับระหว่างพอใช้ถึงดี อย่างไรก็ตามผลความคงทนของสีต่อการซัก ล้าง น้ำและเหงื่ออยู่ ในระดับต่ำ

4.9.4 Klaichoi et al. [15] จากการศึกษาคุณสมบัติการพิมพ์สกรีนและความคงทนของ ผ้าฝ้ายที่พิมพ์สี ธรรมชาติจากสีเสียด ใช้เทคนิคการพิมพ์สกรีน ด้วยวิธีศึกษาหลายปัจจัย เช่น การศึกษาปริมาณของยูเรีย การศึกษา ปริมาณของสารขึ้น และการศึกษาปริมาณของโซเดียมไบคาร์บอเนต จากการประเมินผลการพิมพ์สกรีนด้วยการวัดค่า ความเข้มสี (K/S) จะทำค่าของลักษณะของชิ้นงาน สีพิมพ์สกรีนที่ดีต้องมีผลการทดสอบความคงทนของสี และแรงขัด ถู จากการผลการทดลอง พบว่า ค่าความเข้มของสี (K/S) ของชิ้น ชิ้นทดสอบ ที่ 3 ประกอบด้วยผงสีของสีเสียด 30 กรัม สารส้ม 30 กรัม ยูเรีย 100 กรัม สารขึ้นอัลจินต 640 กรัม แอนติ-รีตักซ์ 10 กรัมโซเดียมไบคาร์บอเนต 20 กรัม และน้ำ 170 มิลลิลิตร ทำการพ่นสีด้วยไอน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที เป็นสภาวะที่ดี ที่สุด ส่งผลให้ค่าของสีมีความเข้มที่ดี ส่งผลให้ลวดลายมีความคมชัดส่งผลให้การทดสอบค่าความคงทนของสีพิมพ์ สกรีนอยู่ในระดับพอใช้ถึงดี

5. การดำเนินการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการพัฒนาระบบการสกัดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระปือ เริ่มจากศึกษากระบวนการสกัด สีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระปือ การศึกษาสารช่วยติดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระปือ และการทดสอบคุณภาพสีพิมพ์ ธรรมชาติจากมูลกระปือ เพื่อให้ผลการดำเนินการวิจัยการพัฒนาระบบการสกัดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระปือให้ เป็นที่ยอมรับ โดยได้จัดลำดับวิธีการวิจัย ดังนี้

5.1 การศึกษากระบวนการสกัดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระปือ

5.1.1 วัสดุและอุปกรณ์การสกัด

5.1.1.1 มูลกระปือสดและมูลกระปือตากแห้ง

5.1.1.2 หม้อ

5.1.1.3 ปีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ถึง 2,000 มิลลิลิตร

5.1.1.4 เครื่องบดสมุนไพร (Powder Grinder) สแตนเลส 304 ความจุ 300 กรัม

5.1.1.5 ถาด

5.1.1.6 กระดาษกรองกาแฟ

5.1.1.7 ตะแกรงกรองลวดสานสแตนเลส 304 ความละเอียดขนาด 20 เมท

5.1.1.8 แท่งแก้วคนสาร

5.1.1.9 เตาแก๊ส

5.1.1.10 พรอทวัดอุณหภูมิ

5.1.1.11 เตาอบ

5.1.2 กระบวนการสกัดสีพืชมัธยฐานจากมูลกระปือ

5.1.2.1 การสกัดสีมูลกระปือสด

- นำมูลกระปือสดด้วยอัตราส่วน 1 : 4 มูลกระปือ 1 ส่วน ต่อน้ำ 4 ส่วน สกัดสีด้วยการต้มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 45 นาที

- นำมากรองแยกน้ำกับเนื้อของมูลกระปือด้วยกระดาษกรองกาแฟ ขนาด $17.6 \times 11.6 \times 7.9$ เซนติเมตร

- อบมูลกระปือด้วย 150 องศาเซลเซียส 60 นาที

- นำมูลกระปือที่ผ่านการอบและปั่นละเอียดด้วยเครื่องบดผงด้วยเครื่องบดสมุนไพร (Powder Grinder) สแตนเลส 304 ความจุ 300 กรัม เป็นเวลา 3 นาที กรองผ่านลวดสานสแตนเลส 304 ความละเอียดขนาด 20 เมท

5.1.3 การสกัดสีมูลกระปือแห้ง

- นำมูลกระปือแห้งด้วยอัตราส่วน 1 : 4 มูลกระปือ 1 ส่วน ต่อน้ำ 4 ส่วน สกัดสีด้วยการต้มอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 45 นาที

- นำมากรองแยกน้ำกับเนื้อของมูลกระปือด้วยกระดาษกรองกาแฟ ขนาด $17.6 \times 11.6 \times 7.9$ เซนติเมตร

- อบมูลกระปือด้วย 150 องศาเซลเซียส 60 นาที

- นำมูลกระปือที่ผ่านการอบและปั่นละเอียดด้วยเครื่องบดผงด้วยเครื่องบดสมุนไพร (Powder Grinder) สแตนเลส 304 ความจุ 300 กรัม เป็นเวลา 3 นาที กรองผ่านลวดสานสแตนเลส 304 ความละเอียดขนาด 20 เมท

5.2 การพิมพ์สีธรรมชาติจากมูลกระปือ

5.2.1 วัสดุและอุปกรณ์การสกัด

5.2.1.1 ผ้าฝ้ายสัก อัตราการผสม ร้อยละ 55 เส้นด้ายฝ้าย ร้อยละ 45 เส้นด้ายโพลีเอสเตอร์

5.2.1.2 แป้งพิมพ์สำเร็จ

5.2.1.3 สีสกัดมูลกระปือสด และมูลกระปือแห้ง

5.2.1.4 สารช่วยติดสี สารส้ม และสารเพอร์สซัลเฟต

5.2.1.5 น้ำสบู่

5.2.1.6 กรดมะนาว

5.2.1.7 บล็อกขนาด 6.5 นิ้ว $\times$ 9 นิ้ว เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ขนาดความละเอียด 120 เมท

5.2.1.8 ไม้ปาดสำหรับการพิมพ์สกรีน

5.2.1.9 เครื่องเป่าลมร้อน

5.2.1.10 เครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 3 ตำแหน่ง

5.2.1.11 เครื่องวัด pH meter

5.2.1.12 แห้งแก้วคนสาร

5.2.1.13 ปีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ถึง 2,000 มิลลิลิตร

5.2.2 การเตรียมผ้าฝ้ายสีขาว ขนาด 60 x 60 เซนติเมตร ก่อนทำการทดลองในการพิมพ์ผ้าให้ทำความสะอาดด้วยการต้มน้ำสบู่ให้เดือด ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทน้ำมัน แวก และแป้ง

5.2.3 กระบวนการพิมพ์สีธรรมชาติจากมูลกระบือ

5.2.3.1 การผสมสีพิมพ์นำมูลกระบือบดละเอียด ร้อยละ 30 ผสมแป้งพิมพ์สำเร็จ อัตราส่วนร้อยละ 70 [19] ผสมและกวนไปทิศทางเดียวกัน

5.2.4 การพิมพ์สกรีน ด้วยบล็อกขนาด 6.5 x 9 นิ้ว เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ขนาดความละเอียด 120 เมท

5.2.5 การแช่สารช่วยติดสีพิมพ์ธรรมชาติ ด้วย สารส้ม ที่จะให้เจดสีน้ำตาลอ่อน และเฟอร์รัสคลอไรด์เจดสีน้ำตาลที่เข้มจากกระบวนการศึกษากระบวนการสกัดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระบือสามารถแสดงให้เห็นขั้นตอน ดังรูปที่ 1

5.2.6 การชักล้างนำผ้าที่ผ่านแช่สารช่วยติดชักด้วยน้ำสบู่ ชักล้างน้ำเปล่า เดิมกรดมะนาวในอัตราส่วน 3 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร เพื่อปรับให้มีค่า pH ที่ 7- 8 และนำมาตากกลม



รูปที่ 1 กระบวนการสกัดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระบือ

5.3 การศึกษาสารช่วยติดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระบือ

การศึกษาสารช่วยติดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระบือ ประกอบไปด้วย สารช่วยติดสีพิมพ์ธรรมชาติ สารสั้ม ด้วยอัตราส่วน 5 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร และการใช้สารช่วยติดสีพิมพ์ธรรมชาติ เพอร์สซัลเฟส อัตราส่วน 2 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร โดยใช้สารช่วยติดที่แตกต่างกัน [16] ผ่านการวิเคราะห์ทดสอบคุณภาพสี วัดค่าสีทางกายภาพ คือ ค่าสี $L^* a^* b^*$ ด้วยเครื่อง Hunter Lab รายงานผลเป็น ค่าสว่าง L^* ค่าสีแดง $+a^*$ ค่าสีเขียว $-a^*$ ค่าสีเหลือง $+b^*$ ค่าสีน้ำเงิน $-b^*$ ทำการทดลอง 5 ซ้ำ [17] และการนำข้อมูลผลการทดสอบคุณภาพสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระบือ มาวิเคราะห์ผลทางสถิติวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของข้อมูลตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยจากสิ่งทดลอง ด้วยความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การใช้สารช่วยย้อม ระหว่าง สารสั้ม และสารเพอร์สซัลเฟส

สิ่งทดลอง	ลักษณะมูลกระบือ	สารช่วยย้อม
1	ไม่ใส่มูลกระบือ	ผ้าขาว
2	แห้ง	ไม่ใส่
3	แห้ง	สารสั้ม
4	แห้ง	เพอร์สซัลเฟส
5	สด	ไม่ใส่
6	สด	สารสั้ม
7	สด	เพอร์สซัลเฟส

5.4 การทดสอบคุณภาพสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระบือ

จากผลการศึกษาวิจัยการพัฒนาระบบการสกัดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระบือ เพื่อให้เป็นที่ยอมรับผ่านกระบวนการทดสอบคุณภาพสีพิมพ์ทางกายภาพ ดังนี้

5.4.1 การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง ด้วยมาตรฐาน ISO 105 – C10 Test A 2006 เพื่อทดสอบความคงทนต่อการซักของสีพิมพ์สกรีนธรรมชาติจากมูลกระบือ แบ่งได้ 5 ระดับ ดังนี้ ระดับที่ 1 สีเปลี่ยนแปลงหรือติดเปื้อนมาก ระดับที่ 2 สีเปลี่ยนแปลงหรือติดเปื้อนค่อนข้างมาก ระดับที่ 3 สีเปลี่ยนแปลงหรือติดเปื้อนสังเกตได้ ระดับที่ 4 สีเปลี่ยนแปลงหรือติดเปื้อนเล็กน้อย ระดับที่ 5 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่มีการติดเปื้อน [19]

5.4.2 การทดสอบทนต่อการขัดถู ด้วยมาตรฐาน ISO 150-X12 2016 เพื่อทดสอบความคงทนต่อการขัดถูของสีพิมพ์สกรีนธรรมชาติจากมูลกระบือ ความเร็วในการขัดจะต้องใช้แรงกดลง (9 ± 0.2 นิวตัน) [20]

6. ผลการวิจัย

6.1 ผลการศึกษากระบวนการสกัดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระบือ

จากผลการศึกษากระบวนการสกัดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระบือ โดยใช้วัตถุดิบมูลกระบือ 2 ปัจจัย คือ แบบ สด และแห้ง แบ่งได้ 11 ขั้นตอน ดังภาพที่ 1 โดยพิจารณาผ่านกระบวนการสกัดสี ด้วยการต้ม ด้วยอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที นำมารองแยกน้ำกับเนื้อของมูลกระบือด้วยกระดาษกรองกาแฟ ขนาด $17.6 \times 11.6 \times 7.9$ เซนติเมตร อบมูลกระบือด้วย 150 องศาเซลเซียส 60 นาที นำมูลกระบือที่ผ่านการอบ บดละเอียดเครื่องบด

สมุนไพโร (Powder Grinder) สแตนเลส 304 ความจุ 300 กรัม เป็นเวลา 2 นาที กรองด้วยลวดสานสแตนเลส 304 ขนาด 20 เมท การผสมสีพิมพ์ นำมูลกระป๋องบดละเอียดผสม แบ่งพิมพ์สำเร็จ อัตราส่วน ร้อยละ 70 ผสมและกวนไปทิศทางเดียวกัน นำมาสกรีนบนบล็อกสกรีน ขนาด 6.5×9 นิ้ว เส้นใยโพลีเอสเตอร์มีรูด้วยขนาดความละเอียด 120 เมท ดังรูปที่ 2



ก่อนบด

หลังบด

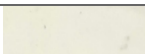
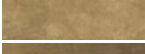
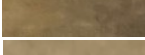
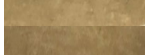
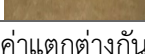
รูปที่ 2 มูลกระป๋องที่ผ่านการบดละเอียดเครื่องบดสมุนไพโร (Powder Grinder)

จากรูปที่ 2 พบว่าลักษณะทางกายภาพมูลกระป๋องก่อนบดจะมีการจับตัวเป็นก้อนเล็กๆ และมีเอนดซีน้ำตาล แต่ไม่สามารถนำมาเป็นสีพิมพ์ได้ หลังจากบดสมุนไพโร (Powder Grinder) สแตนเลส 304 ความจุ 300 กรัม เป็นเวลา 2 นาที กรองด้วยลวดสานสแตนเลส 304 ขนาด 20 เมท พบว่าลักษณะทางกายภาพเป็นผงละเอียด มีเอนดซีน้ำตาลเข้ม มีมวลเบาสามารถลอยตัวได้ง่าย

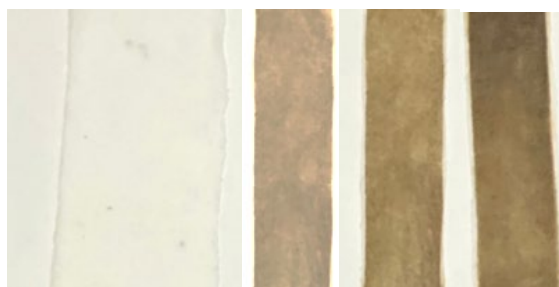
6.2 จากผลการทดสอบปัจจัยกระบวนการสกัดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระป๋อง พบว่ามูลกระป๋องแบบสด และแห้ง คุณภาพสี ค่า $L^* a^* b^*$ ด้วยเครื่อง Hunter ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 ดังตารางที่ 2 รูปที่ 2 และรูปที่ 3

6.2.1 จากผลการทดสอบคุณภาพสี ค่า $L^* a^* b^*$ ด้วยเครื่อง Hunter Lab พบว่า สารช่วยติดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระป๋อง แห้สารช่วยติดสารสั้มที่ส่งผลให้สีมีความสว่าง และเพอร์สซัลเฟตส่งผลให้สีมีความเข้ม โดยมีการช่วยติดที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 โดยอธิบายจากการเทียบโทนสีและรหัสสีจากไทยโทน [16] สิ่งทดลองที่ 1 เป็นผ้าขาว ไม่ใส่มูลกระป๋องและไม่ใส่สารช่วยติดสีเพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบ สิ่งทดลองที่ 2 มูลกระป๋องแห้งไม่แห้สารช่วยติดจะให้โทนสีควายเผือก รหัส C5 M25 Y25 K0 สิ่งทดลองที่ 3 มูลกระป๋องแห้งแห้สารช่วยติดสารสั้มจะให้โทนสีกรัก รหัสสี C30 M60 Y90 K30 สิ่งทดลองที่ 4 มูลกระป๋องแห้งแห้สารช่วยติดเพอร์สซัลเฟตจะให้โทนสีเขียวขี้ม้า รหัส C70 M60 Y100 K0 สิ่งทดลองที่ 5 มูลกระป๋องสดไม่แห้สารช่วยติดจะให้โทนสีกาเกี รหัสสี C25 M30 Y45 K20 สิ่งทดลองที่ 6 มูลกระป๋องสดแห้สารช่วยติดสารสั้มจะให้โทนสีมุกสุข รหัส C10 M20 Y50 K15 สิ่งทดลองที่ 7 มูลกระป๋องสดแห้สารช่วยติดสารเพอร์สซัลเฟตจะให้โทนสีหงดดินดัด รหัส C30 M70 Y70 K30 สอดคล้อง [17] โดยการใช้สารช่วยย้อมเพอร์สซัลเฟส ปรับเปลี่ยนสีออกเอนดซีน้ำตาลเข้มดำเทา หรือมีสีที่เข้มขึ้นจึงส่งผลให้ค่า b^* สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบค่าความเข้มสีและค่าของสี

สิ่งทดลอง	ลักษณะมูล	สารช่วยติด	ค่าความเข้มสีและค่าของสี				สีที่ปรากฏ
			(K/S)*	L*ns	a*	b*	
1	ไม่ใส่มูล กระป๋อง	-	0.13±0.17	96.24±0.14	2.78±0.27	-18.50±0.14	
2	แห้ง	ไม่ใส่	0.48±0.15	80.40±0.21	9.56±0.29	6.76±0.23	
3	แห้ง	สารส้ม	1.31 ^a ±0.20	73.62±0.13	4.04 ^b ±0.33	16.77 ^a ±0.42	
4	แห้ง	เฟอร์รอสัลเฟต	0.81 ^b ±0.11	74.03±0.23	9.85 ^a ±0.41	9.54 ^b ±0.23	
5	สด	ไม่ใส่	0.45±0.21	81.17±0.15	9.45±0.28	6.54±0.18	
6	สด	สารส้ม	1.36 ^a ±0.24	72.87±0.18	3.94 ^b ±0.19	17.04 ^a ±0.34	
7	สด	เฟอร์รอสัลเฟต	0.57 ^b ±0.18	75.06±0.22	9.60 ^a ±0.25	8.13 ^b ±0.34	

หมายเหตุ จากผลการทดสอบคุณภาพสี ด้วยมาตรฐาน Visual Rating ในแนวดิ่ง แสดงให้เห็นว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และ ns ในแนวดิ่งแสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



ก. ข. ค.

รูปที่ 3 การใช้มูลกระป๋องตากแห้ง ก. ไม่แช่สารช่วยย้อม ข. แช่สารช่วยย้อมสารส้ม
ค. แช่สารช่วยย้อมเฟอร์รอสัลเฟต



ก ข ค

รูปที่ 4 การใช้มูลกระป๋องสด ก. ไม่แช่สารช่วยย้อม ข. แช่สารช่วยย้อมสารส้ม
ค. แช่สารช่วยย้อมเฟอร์รอสัลเฟต

จากรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ลักษณะสีที่ปรากฏที่ผ่านกระบวนการแช่สารช่วยย้อมสารส้ม และแช่สารช่วยย้อมเฟอร์รอสัลเฟต โดยมีความแตกต่างการใช้มูลกระป๋องสด และมูลกระป๋องแห้ง พบว่าสีที่ปรากฏไม่แตกต่างกัน เมื่อเทียบกับปัจจัยของการใช้สารช่วยย้อม

6.3 ผลการทดสอบคุณภาพสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระบือ

6.3.1 การทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง ด้วยมาตรฐาน 105 – C10 Test A 2006 (Low to medium temp 40 องศาเซลเซียส) ทุกปัจจัยมีคุณภาพในการทนซักอยู่ในระดับที่ 4 – 5 คือ ดีถึงดีมาก สอดคล้องกับ [19] ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักล้าง ด้วยมาตรฐาน ISO 105 – C10 Test A 2006 (Low to medium temp 40 องศาเซลเซียส)

ค่าความคงทนต่อสี	สิ่งทดลอง/ที่					
	2	3	4	5	6	7
การเปลี่ยนแปลงของสี						
การติดเปื้อนสีบนผ้าขาว	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
อะซิเตท	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
ฝ้าย	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
ไนลอน	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
พอลีเอสเตอร์	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
อะคริลิก	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
ขนสัตว์	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5

หมายเหตุ ความหมายของผลการทดสอบ ระดับที่ 1 สีเปลี่ยนแปลงหรือติดเปื้อนมาก ระดับที่ 2 สีเปลี่ยนแปลงหรือติดเปื้อนค่อนข้างมาก ระดับที่ 3 สีเปลี่ยนแปลงหรือติดเปื้อนสังเกตได้ ระดับที่ 4 สีเปลี่ยนแปลงหรือติดเปื้อนเล็กน้อย ระดับที่ 5 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่มีการติดเปื้อน

6.3.2 จากผลการทดสอบทนต่อการขัดถู ด้วยมาตรฐาน ISO 150-X12 2016 เพื่อดูความคงทนต่อการขัดถู ของสีพิมพ์ สกรีนธรรมชาติจากมูลกระบือ ความเร็วในการขัดจะต้องใช้แรงกดลง 9 ± 0.2 นิวตัน พบว่าผ้าฝ้ายที่พิมพ์สกรีนที่อยู่ในสภาวะแห้ง ด้ายพุ่งอยู่ในระดับ ระดับที่ 2 - 3 คือ แยกปานกลาง และสภาวะเปียก ด้ายยีนอยู่ในระดับระดับ 1- 2 คือ แยก – แยกที่สุด จากผลการทดสอบพบว่าความคงทนสีต่อสภาวะการขัดถูเนื่องจาก ลักษณะมูลกระบือมีเนื้อสัมผัส [16] เหมือนดินจึงส่งผลให้มีความคงทนต่อการขัดถูต่ำ ตรงกันข้ามถ้าสีกัดมาเป็นสีย้อมผ้าฝ้ายจะมีค่าความคงทนต่อการขัดถูที่ดีกว่า ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบทนต่อการขัดถู ด้วยมาตรฐาน ISO 150-X12 2016

ความคงทนต่อการติดสี	สิ่งทดลองที่ 2		สิ่งทดลองที่ 3		สิ่งทดลองที่ 4		สิ่งทดลองที่ 5		สิ่งทดลองที่ 6		สิ่งทดลองที่ 7	
	แนวเส้นด้าย		แนวเส้นด้าย		แนวเส้นด้าย		แนวเส้นด้าย		แนวเส้นด้าย		แนวเส้นด้าย	
	ด้ายพุ่ง	ด้ายยีน	ด้ายพุ่ง	ด้ายยีน	ด้ายพุ่ง	ด้ายยีน	ด้ายพุ่ง	ด้ายยีน	ด้ายพุ่ง	ด้ายยีน	ด้ายพุ่ง	ด้ายยีน
สภาวะเปียก	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
สภาวะแห้ง	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3

หมายเหตุ ความหมายของผลการทดสอบ ระดับที่ 1 คือ แยกที่สุด ระดับ 1- 2 คือ แยก – แยกที่สุด ระดับ 2 คือ แยก ระดับที่ 2- 3 คือ แยกปานกลาง ระดับที่ 3 ปานกลาง ระดับที่ 3-4 คือ ปานกลางถึงดี ระดับที่ 4 คือ ดี ระดับที่ 4-5 คือ ดีถึงดีมาก ระดับที่ 5 คือ ดีมาก

7. สรุป

งานวิจัยกระบวนการสังเคราะห์สีพิมพ์จากมูลกระปือ ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษากระบวนการสกัดสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระปือ โดยสามารถแบ่งขั้นตอนการผลิตได้ 11 ขั้นตอน บนผ้าฝ้าย เพื่อทำการศึกษารายละเอียด สีสักรีดธรรมชาติจากมูลกระปือ โดยเปรียบเทียบกับ 2 ปัจจัย แบ่งได้ 4 สิ่งทดลอง คือ ลักษณะมูลสด กับมูลแห้ง และสารช่วยติดสี คือ สารส้ม และเฟอร์รัสซัลเฟต เพื่อนำมาทดสอบคุณภาพสีพิมพ์ธรรมชาติจากมูลกระปือ ผลการทดสอบกายภาพของการทดลองซัก ด้วยมาตรฐาน ISO 105 – C10 Test A 2006 พบว่า 2 ปัจจัยที่เปรียบเทียบมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกัน และนำมาทดสอบความแข็งแรงทางกายภาพด้วยการทดสอบทนต่อการขัดถู ด้วยมาตรฐาน ISO 150-X12 2016 สิ่งทดลองมีความทนต่อการขัดถูในสภาวะผ้าแห้งได้ดีและสามารถนำมาออกแบบต่อยอดผลงานได้ในระดับต่อไป

8. ข้อเสนอแนะ

8.1 การวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทดสอบประสิทธิภาพทางกายภาพของสีพิมพ์จากมูลกระปือ โดยภาพรวม ค่าสี และคุณสมบัติอยู่ในระดับดี ในครั้งต่อไปเห็นสมควรเพิ่มการทดสอบการทนต่อแสง UV เพื่อดูประสิทธิภาพของสีพิมพ์จากมูลกระปือ

8.2 การวิจัยในครั้งต่อไปผู้วิจัยเห็นควรทดสอบประสิทธิภาพทางกายภาพของสีพิมพ์จากมูลกระปือ เห็นควรทดสอบ ค่าความแข็งแรงของวัสดุตามมาตรฐาน ASTM D3039 2002 [21]

8.3 การวิจัยควรค้นหาสารย้อมติดที่สกัดจากธรรมชาติเพื่อเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ในอนาคตต่อไป

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] ฝ่ายวิชาการสถาพรบุ๊คส์, *โครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำรินาครโค-กระปือ*. กรุงเทพมหานคร: สถาพรบุ๊คส์, 2559.
- [2] กิตติ กุบแก้ว, *ภูมิปัญญาการคัดเลือกควายไทย*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์ปศุสัตว์อินทรีย์ กองบำรุงการสัตว์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2533.
- [3] สุภารัตน์ รักชลธิ, วรา ชัยนิตย์ และ ภัทราวุธ มนต์วิเศษ, *การพัฒนาสีพลาสติกขอลจาก EVA หรับงานพิมพ์สกรีน*. กรุงเทพมหานคร: คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.
- [4] กาวิ ศรีกุลกิจ, “ความรู้เรื่องสารขึ้นพิมพ์ผ้า,” *วารสารศิลปเลอว์*, ปีที่ 8, ฉบับที่ 4, หน้า 42-46, 2545.
- [5] Y.H. Lee and H.D. Kim, “Dyeing properties and colour fastness of cotton and silk fabrics dyed with Cassia tora L. extract,” *Fibers and Polymers*, vol. 5, no. 4, pp.303-308, October 2004.
- [6] อภิชาติ สนธิสมบัติ, *Textile Chemical Processing กระบวนการทางเคมีสิ่งทอ*. ปทุมธานี: คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล, 2545.
- [7] กนกพรรณ ศักดิ์สุริยา, “ผลของอุณหภูมิและภาวะบรรจุทางกลศาสตร์ต่อการดูดติดของสีรีแอคทีฟโดยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาโท*, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 2549.
- [8] สุนทร ดุริยะประพันธ์, ทักษิณ อาชาวาคม, สายันต์ ต้นพานิช, ชลธิชา นิवासประภฤติ, ปริญญานันท์ ศรีสูงเนิน และ พิรศักดิ์ วรรณสุทรโรสถ, *พืชที่ให้สีย้อมและแทนนิน*. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2545.

- [9] สุวานีย์ จันทร์สอาด, *การสกัดสี้อมจากต้นขนุน Artocapus heterophyllus Lamk สำหรับ การย้อมผ้าไหม และ ผ้าฝ้าย*. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเคมีเทคนิคจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [10] สรศักดิ์ เหลี้ยวไชยพันธุ์ และคณะ, *การพัฒนาสารย้อมสีธรรมชาติในเขตภาคเหนือตอนบนชุดโครงการสี้อมธรรมชาติ*. เชียงใหม่: คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2543.
- [11] เลิศศิริ บวรกิตติ, “ศิลปะกับวิทยาศาสตร์,” *วารสารราชบัณฑิตยสถาน*, ปีที่ 37, ฉบับที่ 4, หน้า 242 -254, ตุลาคม-ธันวาคม, 2555.
- [12] ณัฐดนัย รุ่งเรืองกิจไกร, รัตนพล มงคลรัตนาสีห์, จริญญา คล้ายจ้อย, สุพรรณษา ตี้อย และ ศศิธร พิสุทธิรัตน์, “การพิมพ์ผ้าฝ้ายด้วยแป้งจากหัวบอนและสีปักเมนต์,” ใน *การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลครั้งที่ 5 การพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรมเพื่อยั่งยืน*, กรุงเทพมหานคร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร: 2556.
- [13] จริญญา คล้ายจ้อย, รัตนพล มงคลรัตนาสีห์ และ ก้องเกียรติ มหาอินทร์, *การออกแบบผลิตภัณฑ์สิ่งทอจากฝ้ายอ้อมใบลำไยเพื่อส่งเสริมเศรษฐกิจสร้างสรรค์ในพื้นที่ตำบลยุหว่า อำเภอสันป่าตอง จังหวัดเชียงใหม่*. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2557.
- [14] R. Mongkholrattanasit, C. Klaichoi, K. Maha-In, K. Ariyakuare and S. Chonsakorn, "Utilization of longan leaf extract for dyeing and UV protection of silk fabric using pre-mordanting method," *Advanced Materials Research* Vols, pp.438 – 441, September 2014.
- [15] C Klaichoi, R Mongkholrattanasit, N Sasivatchutikool and N Rungruangkitkrai, "Fastness and printing properties of cotton fabric printed with natural dye from Acacia Catechu Willd." *Advanced Materials Research*, vol. 1030, pp 426-429, September 2014.
- [16] ศูนย์บันดลไทย, *สีไทยโทนเสน่ห์ไทยเพิ่มมูลค่าธุรกิจ*, กรุงเทพมหานคร: กระทรวงวัฒนธรรม, 2558.
- [17] นรเทพ โปธิเป้ง, “การประยุกต์ใช้สีธรรมชาติจากดินแดงสำหรับพิมพ์สกรีนบนผ้าฝ้าย,” *วิทยานิพนธ์ปริญญาโท* มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 2563.
- [18] ไพรวลัย ประมัย, ไสร์จรรย์ อิ่มเกตุ, อรุณลักษณ์ โชตินาคินทร์ และ ผกาวิ ภูจันทร์, “การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผักแผ่นกรอบ,” *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์*, ปีที่ 8 ,ฉบับที่ 1, หน้า 55-67, มกราคม - มิถุนายน 2566.
- [19] วันแข็ง สิทธิกิจโยธิน, *การเตรียมแป้งพิมพ์ด้วยสารเข้มข้นจากเมล็ดพืช สำหรับหมึกพิมพ์ผ้าไหมด้วยสีจากเปลือกมังคุด*. ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา, 2557.
- [20] สาคร ชลสาคร, ศุภนิชา ศรีวรเดชไพศาล และ ชัญญิตา ณะสม, “การออกแบบหมวกคลุมศีรษะสำหรับป้องกันดวงตาทารกที่มีภาวะตัวเหลืองและได้รับการส่องไฟรักษา,” *วารสาร มทร.อีสาน ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, ปีที่ 16, ฉบับที่ 2, หน้า 8-9, พฤษภาคม-สิงหาคม 2566.
- [21] กิตติ ศรีนุชศาสตร์, “โครงสร้างและสมบัติวัสดุเสริมแรงเส้นใยแก้วสำหรับสร้างชิ้นส่วนอากาศยานไร้คนบิน,” *วารสารนายเรืออากาศวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, ปีที่ 14, หน้า 20-24, ธันวาคม 2561.

Development of Microfluidic Paper-Based Analytical Devices for Simultaneous Colorimetric Ammonium and Nitrate Detection

Ruangsak Yucha¹, Patcha Permpipat², Parintron Muansuwan³, Rachaphon Chaianongsak⁴,
Akarapong Prakobkij⁵, Nattasa Kitchawengkul⁶ and Panomwan Panseeta^{7*}

^{1, 2, 3, 4, 7}Department of Chemistry, Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy

^{5, 6}Nanomaterials Science, Sensors & Catalysis for Problem-Based Projects, Faculty of Science

panomwan.pa@crma.ac.th

Received 11 October 2024

Revised 26 December 2025

Accepted 27 January 2025

Abstract

The frequency of terrorist attacks involving Improvised Explosive Devices (IEDs) is expected to continue increasing. Ammonium nitrate fuel oil (ANFO) is the preferred main charge in IEDs due to its low cost and wide availability. Hence, there is a pressing need to develop an ammonium nitrate detection method that is easy to use, cost-efficient, fast, and reliable. This research developed the μ PADs as viable devices for detecting ammonium nitrate in the field alongside a mobile phone camera. In this study, a two-lane μ PAD was developed to detect both ammonium and nitrate ions in an ammonium nitrate solution. The purpose of this research was to develop a simple and low-cost colorimetric method for simultaneous ammonium and nitrate ion detection using microfluidic paper-based analytical devices (μ PADs) fabricated by the wax-screen printing technique. The two-channel μ PADs were designed and fabricated. The first channel was used for ammonium detection using Nessler's reagent coated on the detection at the end of the channel. The second channel was used for nitrate detection using a Griess reagent. By simply dropping the sample at the center of μ PADs, the developed μ PADs were able to detect both ammonium and nitrate in a short time (only 4 minutes). The colored product on the μ PAD (yellowish-brown and pink color for ammonium and nitrate, respectively) was then captured with a camera on a smartphone under a commercial controlled light box and its color intensity was obtained by using ImageJ software. Using the NH_4NO_3 concentration in the range of 100 – 800 ppm, under optimum conditions, there was a good linear relationship ($r^2 = 0.9961$ for ammonium concentration range of 200-800 ppm and $r^2 = 0.9894$ for nitrate concentration range of 100-800 ppm) and the detection limit was 48.760 and 81.966 ppm for ammonium and nitrate, respectively.

Keywords: Microfluidic Paper-based Analytical Devices, Colorimetric Detection, Ammonium and Nitrate Detection

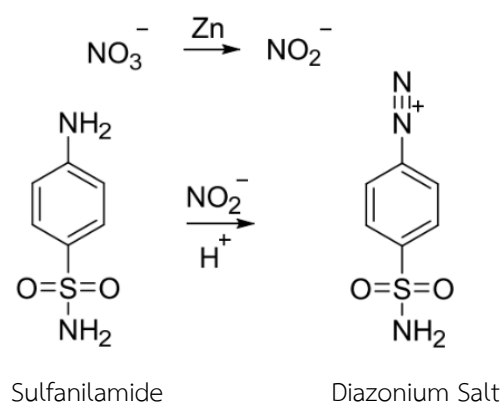
1. Introduction

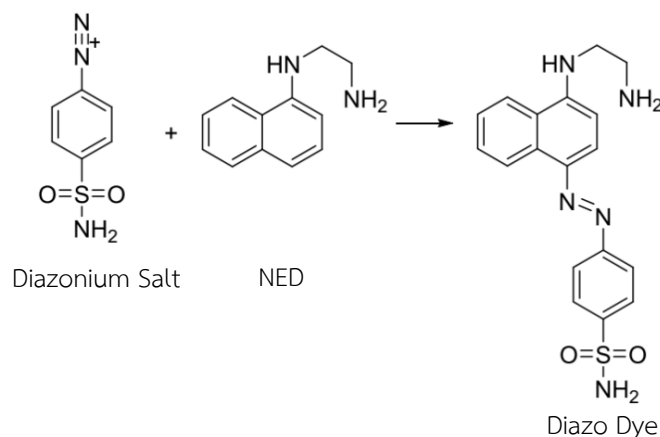
Terrorist attacks using Improvised Explosive Devices (IEDs) are likely to increase continuously [1]. IEDs consist of various components that include an initiator, switch, explosive material, power source, and a container [2]. Numerous materials that are commonly available, such as fertilizer, gunpowder, and hydrogen peroxide, can be employed as explosive substances in IEDs. Fuel and an oxidizer, which supplies the oxygen required to maintain the reaction, are required to produce explosive materials. The combination of fuel oil (acting as the fuel source) and ammonium nitrate (NH_4NO_3 , acting as the oxidizer), known as ANFO (ammonium nitrate fuel oil), is frequently used as a main charge in IEDs due to its low cost and wide availability [2, 3]. Ammonium nitrate is a potent oxidant widely used as fertilizer and an industrial explosive. Due to its colorless, odorless crystal structure, identification requires various analysis methods [4]. The efficient identification of explosive ingredients is a crucial aspect of forensic science. Including information on explosive chemicals aids the inquiry in finding the possibility of the origin of the explosives [5]. Ammonium nitrate detection methods commonly involve instrumental analysis, including electrospray ionization mass spectrometer (ESI-MS) and inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) [6, 7]. These instrument-based techniques have great sensitivity and accuracy, but they are expensive, large, non-portable, and time-consuming. The lengthy process required for this complicated procedure delays the notification of on-site personnel. Therefore, it is essential to develop an ammonium nitrate detection technique that is easy to use, cost-effective, rapid, and reliable.

Microfluidic paper-based analytical devices (μ PADs) are devices fabricated from paper with microchannels created by incorporating hydrophilic and hydrophobic regions to facilitate fluid flow. They have become an increasingly attractive substrate for on-site testing because of their affordability, independence from other instruments, portability, low consumption of reagents and samples, and ease and rapidity of fabrication [8]. Most μ PADs use filter paper as a hydrophilic substrate, with a hydrophobic barrier made using many different techniques. Hydrophilic fluid cannot pass through the hydrophobic barrier; therefore, it is directed into the channels through capillary action. There are several techniques for the fabrication of μ PADs including wax printing, photolithography, flexographic printing, inkjet printing, plasma treatment, laser treatment, wet etching, screen-printing, and wax screen-printing [9, 10]. The most widely used analytical detection method for μ PADs is colorimetry, which requires specific reagents that change color to correlate with the analyte concentration. The relationship between color intensity and analyte concentration can be established more easily through technology using smartphone reporting methodologies [11-13].

Additionally, employing an electronic device (such as a digital camera, smartphone, or scanner) coupled with image-processing software (such as ImageJ, Photoshop, etc.) can generate qualitative and quantitative results [14, 15]. Recently, various studies have reported the development of μ PADs for medical diagnostics, environmental monitoring, and explosive detection [8-10, 16].

High-explosives and military explosives have also been tested using colorimetric methods along with microfluidic devices [13]. In 2015, Peters and colleagues developed μ PADs by designing a five-lane μ PAD and printing wax ink on chromatography paper for the detection of inorganic explosives, such as ammonium nitrate, urea nitrate, and black powder [16]. Colorimetric-based tests for ammonium nitrate detection are divided into two parts: ammonium ion (NH_4^+) and nitrate ion (NO_3^-). Typically, Nessler's reagent is employed for the identification of ammonium ions. This reagent consists of a combination of mercury(II) chloride (HgCl_2) or mercury(II) iodide (HgI_2) and potassium iodide within an alkaline solution. This mixture yields potassium tetraiodomercurate(II) ($\text{K}_2[\text{HgI}_4]$). When Nessler's reagent interacts with ammonia resulting from the reduction of ammonium, it generates a yellow-brown color complex [16, 17]. The identification of nitrate ions can be conducted using the color reaction of the Griess reagent. This approach is most commonly employed for detecting nitrite and nitrate [18]. For the detection of nitrate, it is necessary to first reduce nitrate to nitrite using an appropriate reductant (such as Zn or Cd) before proceeding to the diazotization step in the testing process based on the Griess reaction. Subsequently, nitrite reacts with sulfanilamide (or sulfanilic acid) under acidic conditions, yielding a diazonium salt. This salt further combines with an electron-rich coupling agent, such as α -naphthylamine or N-(1-naphthyl) ethylenediamine (NED), resulting in the formation of a colored azo dye [19-21]. The Griess reaction for the detection of nitrate follows the equations below [19].





The objective of this research was to develop a two-lane μPAD capable of simultaneously detecting both ammonium ion and nitrate ion in ammonium nitrate solution, with the goal of providing preliminary data for the field detection of ANFO. Wax screen-printing was used for fabricating μPAD s because it is a low-cost, simple, and rapid method [9]. This detection process included the utilization of the color reaction of Nessler's reagent and Griess reagent, a digital image analysis approach, and the ImageJ program. The optimal time for measurement of the color intensity was also studied. The concept of this research is illustrated in Fig. 1.

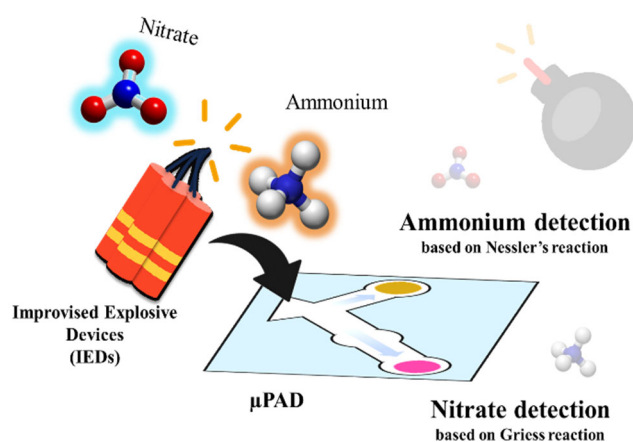


Fig. 1 The concept of ammonium nitrate detection in this study.

2. Materials and Methods

2.1 Chemicals and Apparatus

Nessler's reagent was prepared by dissolving 5.0 g of potassium iodide (Ajax Finechem, Australia) in 5 mL of deionized water and then adding saturated mercuric iodide solution until a faint precipitate was formed. Finally, 40 mL of 50% w/w potassium hydroxide was added and the volume was adjusted with deionized water to 100 mL using a volumetric flask [22]. The solution was decanted after being allowed to stand overnight away from bright light. Griess reagent consisted of three

components as follows: (1) 5% zinc suspension; (2) 50 mM sulfanilic acid in 1.5 M citric acid; and (3) 10 mM N-(1-Naphthyl)-ethylenediamine dihydrochloride (NED.Cl) solution [16, 18]. The 5% zinc suspension was prepared by mixing 500 mg of zinc powder (Kemaus, Australia) in 10 mL of deionized water. The 50 mM sulfanilic acid in 1.5 M citric acid was prepared by dissolving 86.5 mg of sulfanilic acid (TCI, Japan) in 7.8 g of citric acid (TCI, Japan) dissolved in 10 mL of deionized water. The 10 mM N-(1-Naphthyl)-ethylenediamine dihydrochloride (NED.Cl) solution was prepared by dissolving 27.2 mg of NED.Cl (TCI, Japan) in 10 mL of deionized water. Various concentrations of ammonium nitrate standard solutions were prepared by dissolving ammonium nitrate (Sigma-Aldrich, USA) in deionized water. All used chemicals and reagents were analytical grade. Deionized water was used for the preparation of all aqueous solutions.

The LED light in the commercial control light box (96 high-display lamp beads, 10W) in this study is a plastic box (36 cm × 36 cm × 24 cm) purchased from Dongguan Puluz Technology Limited (China).

2.2 Design and fabrication of the μ PAD

In this work, a simple wax screen-printing technique was used for the μ PADs fabrication. The patterned screen was designed using the Notes Writer application. The design of μ PADs is shown in Fig. 2. In the μ PADs pattern, there was a 7 mm diameter for both the detection and reduction zone. Additionally, the transport lane was set at 4 × 7 mm. A triangular-shape sample zone was created to facilitate the flow of sample solution from the sample region to each detection zone simultaneously. The sample zone of the μ PADs was designed as an equilateral triangle with a side length of 0.7 cm. The patterned screen was made from 64-mesh polyester fabric on a wooden frame. For the fabrication step, first, Whatman filter paper no.1 was placed under the patterned screen. Then, solid wax (hydrophobic substrate) was rubbed through the designed area on a patterned screen and then the excess of wax was removed from the pattern with a squeegee. To make the hydrophobic barrier on paper, a hot hair dryer was used to melt the wax. After 15 seconds of blowing, the μ PAD was obtained. A 2 μ L volume of each colorimetric reagents was spotted onto the μ PADs which was sufficient to develop color across the reaction zone without any leakage over the hydrophobic barrier.

Initial testing with these μ PADs involved selecting reagents from a literature review [16, 18-19], as many colorimetric methods use strong acids that may damage the paper. A weak acid was then used in the nitrate test, still producing a detectable color change. The main parameters of the proposed μ PADs, including the deposited volume of Nessler's reagent and the Griess reagent (zinc suspension, sulfanilic acid in citric acid, NED.Cl solution), the citric acid concentrations in the Griess test, and the sample volumes, were optimized for sensitivity and clear color observation by the naked eye. The range of each optimized parameter is shown in Table 1.

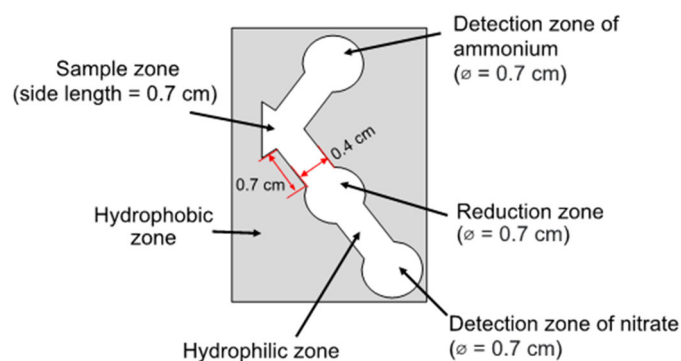


Fig. 2 The design and dimension of μ PAD for simultaneous ammonium and nitrate detection.

Table 1. Summary of μ PAD parameters investigated in this study.

Parameter	Range tested	Optimum value
Deposited volume of Nessler's reagent (μ L)	1.0 - 5.0	2.0
Deposited volume of Griess reagent		
- 5% Zinc suspension (μ L)	1.0 - 5.0	2.0
- 50 mM sulfanilic acid in 1.5 M citric acid (μ L)	1.0 - 5.0	2.0
- 10 mM of NED.Cl (μ L)	1.0 - 5.0	2.0
Concentrations of citric acid for preparation of sulfanilic acid (M)	0.3 - 1.5	1.5
Ammonium nitrate standard solution volume (μ L)	10 - 30	20

2.3 Simultaneous colorimetric detection of ammonium and nitrate using fabricated μ PAD

As shown in Fig. 3, for the detection of ammonium, 2 μ L of Nessler's reagent was pipetted onto the detection zone of the first channel. To detect nitrate with Griess reagent, on the second channel, three nitrate detection reagents were applied including 2 μ L of each 5% Zinc suspension and 50 mM sulfanilic acid dissolved in citric acid on the reduction zone. Then, 2 μ L of 10 mM of N-(1-Naphthyl)-ethylenediamine dihydrochloride (NED.Cl) was dropped on the detection zone. After drying for a minute, the μ PAD is ready for detection.

In the detection step, 20 μ L of standard ammonium nitrate solution was dropped into the sample zone and flowed through each channel to react with the coated reagent, resulting in a color change in the detection zone. The detection zone of the ammonium reaction showed a yellowish-brown complex, while the detection zone of the nitrate reaction showed a pink-colored product. The images of the colored products in the detection zones were then captured using a camera on a smartphone (OPPO A74, China). Subsequently, the RGB intensity values of these images were obtained utilizing ImageJ software. The average color intensity for each detection zone at various times was calculated using 3 replicate measurements. The limit of detection (LOD) and limit of

quantification (LOQ) were calculated by finding the analyte concentration corresponding to the intensity values YLOD and YLOQ on the calibration curve using the Miller method [23].

The number of photons of light reflected from the color of the product on the μ PADs into the RGB filter (Red, Green, Blue filter) corresponds to the color intensity measured by the ImageJ software. Since the blank μ PAD is white, all its color intensities are close to the value of 255. The color intensity of the product resulting from the reaction between reagent and ammonium nitrate solution was measured and compared to the color intensity of a blank μ PAD. The red, green, and blue intensities of the blank μ PAD are subtracted from the measured intensities of the color product, resulting in the gray intensity in the red channel (R0-R), the green channel (G0-G), and the blue channel (B0-B), respectively. To plot the calibration curve, the gray intensity in the blue channel (B0-B) and gray intensity in the green channel (G0-G) for ammonium and nitrate detection, respectively, were then used. While B0 and G0 are gray intensity in the blue and green channels without analyte.

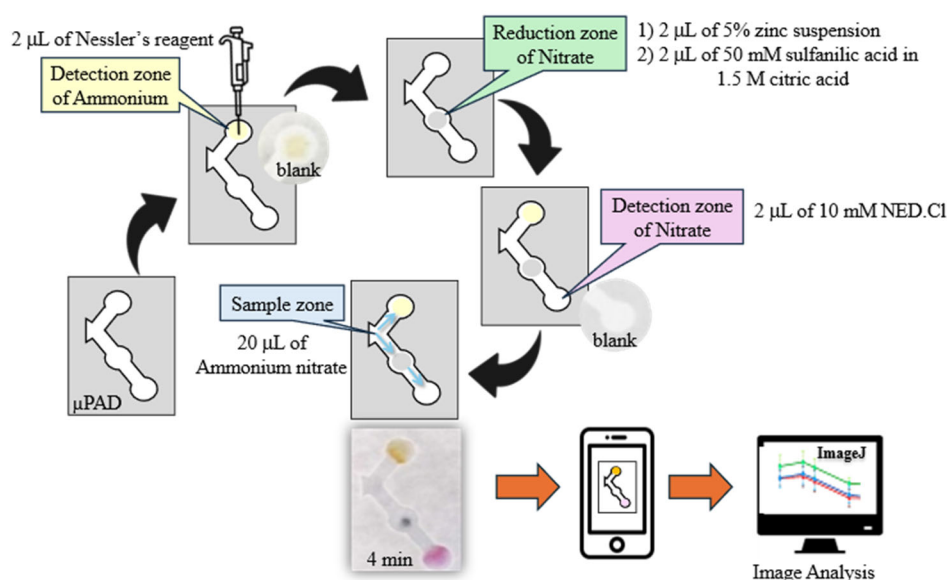


Fig. 3 Schematic illustration of colorimetric detection of ammonium and nitrate on the μ PAD.

3. Results and Discussion

3.1 Optimization of incubation time

The optimal time for measurement of the color intensity was determined after applying the ammonium nitrate solution with respect to cleared colors observed by the naked eyes and the resulting colors appeared in the detection zone only. To analyze the μ PAD, an initial detector is the observation with the naked eye, which is the simplest and most cost-effective method because it does not require any additional equipment. A smartphone is another common device that offers excellent imaging capabilities and ensures the sharpness of digital images.

A 2 μL of Nessler's reagent was applied to the detection zone in ammonium testing. For the detection of nitrate, a sequential 3-step test was chosen based on the Griess test. At the reduction zone, the nitrate sample was reduced by zinc powder. Following reduction to nitrite, the sample reacts with an acid catalyst and sulfanilic acid to form diazonium salt at this reduction zone. The diazonium salt continued to travel up the hydrophilic lane to combine with a coupling agent (NED.Cl) to produce a brightly colored diazo dye at the detection zone. From the experiment, the steps of Griess reagent for nitrate detection on μPADs are detailed as follows: (1) 2 μL of 5% zinc suspension was spotted on the reduction zone to reduce the nitrate to nitrite; (2) 2 μL of 50 mM sulfanilic acid in 1.5 M citric acid was added on the reduction zone after depositing Zn to form diazonium salt; and (3) 2 μL of 10 mM NED.Cl was spotted on detection zone (The diazonium salt continued to combine with a coupling agent to produce a brightly colored diazo dye).

For incubation time, the μPAD facilitates the simultaneous detection of both ammonium and nitrate in separate channels, providing results in a short time with strong color intensity. A 20 μL of 700 ppm ammonium nitrate solution was used as the sample and spotted at the sample zone to investigate the color development time and the RGB intensity of the color product on the μPADs . After applying the sample for 2, 4, 5, 8, and 11 minutes, the color development times were recorded and measured the RGB intensity using the ImageJ program. The digital images of the products on the μPAD that appeared at different times are shown in Fig. 4.

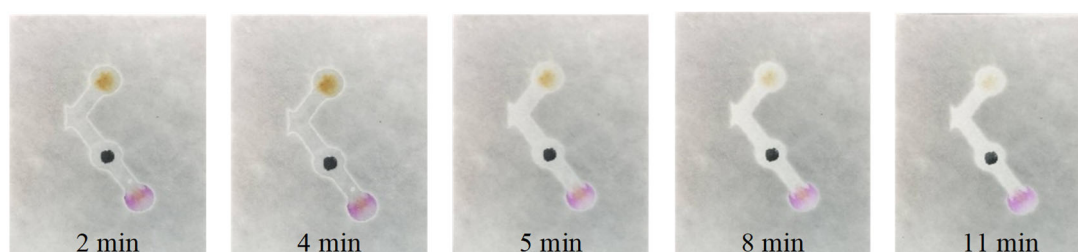


Fig. 4 The digital images after applying ammonium nitrate on the μPAD at different times.

The reaction of Nessler's reagent and ammonium generated a yellowish-brown product that formed on the μPAD , which had the highest value of the blue intensity (B0-B). Similarly, the color intensity measurements of the pink product resulting from the reaction between Griess reagent and nitrate on the μPAD shows the highest green intensity (G0-G). These results are shown in Fig. 5 and Fig. 6. Based on the data, it was observed that the blue intensity was most sensitive for ammonium detection, and the green intensity exhibited the highest sensitivity for nitrate detection. The maximum color intensity in the simultaneous detection of ammonium and nitrate occurred at 4 minutes, followed by a decrease in intensity between 4 and 11 minutes. The optimal incubation time for a measurement was selected at 4 minutes.

3.2 Analytical performance using the μ PADs for colorimetric detection of ammonium nitrate

To study the relationship between the concentration of ammonium nitrate and the color intensity of the product on the μ PADs, a range of ammonium nitrate solution concentrations from 100 to 1600 ppm were used in this study. After applying ammonium nitrate solution, the digital photos of the color products on the μ PADs were captured at 4 minutes using the OPPO A74 smartphone camera.

From the experiment, the color product changes from yellow to yellowish-brown for ammonium detection and changes from colorless to pink for nitrate detection. The results in Fig. 7 indicated the measurement of blue intensity derived from the color product on the μ PADs in the ammonium test. The linear relationship between blue intensity values and ammonium concentration for quantitative analysis, was represented by the equation $y = 0.0386x + 54.22$ with a correlation coefficient (r^2) of 0.9961, was determined in the ammonium concentration range of 200 to 800 ppm with limit of detection (LOD) and quantification (LOQ) of 48.760 ppm and 162.533 ppm, respectively. Similarly, the researchers conducted measurements of green intensity obtained from colorless to the pink product on the μ PADs generated during the nitrate test. Fig. 8 shows that the green intensity values exhibited a linear correlation with nitrate concentration in the range of 100 to 800 ppm, which is equivalent to ammonium. This led to constructing a linear calibration curve by plotting the resulting green intensity as a function of nitrate concentration for quantitative analysis ($y = 0.0542x + 37.98$, $r^2 = 0.9894$) with LOD and LOQ of 81.966 ppm and 273.219 ppm, respectively. The findings demonstrate that the obtained LOD is lower than those reported in earlier studies on ammonium and nitrate testing of high explosives using μ PAD [16].

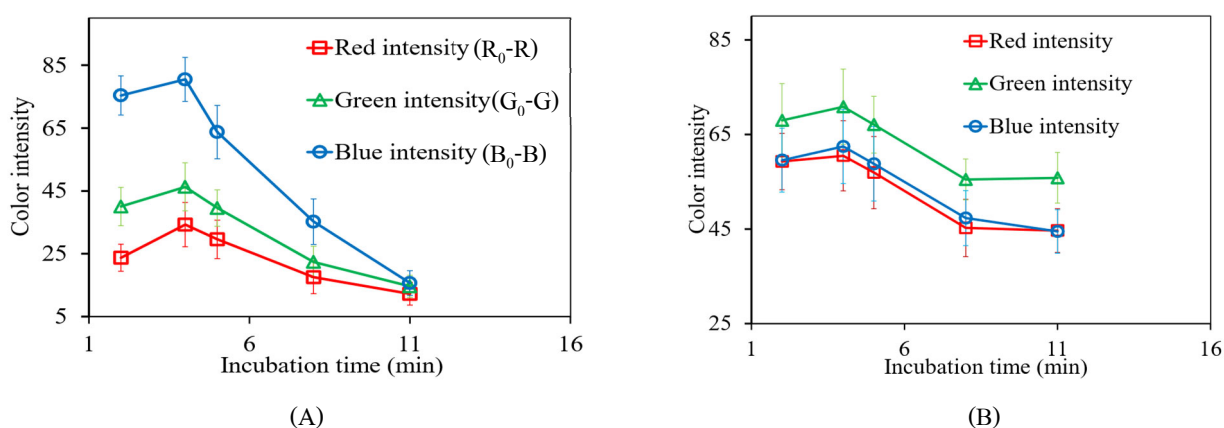


Fig. 5 Relationship between the color development time and the color intensity of the product for (A) ammonium detection (B) nitrate detection.

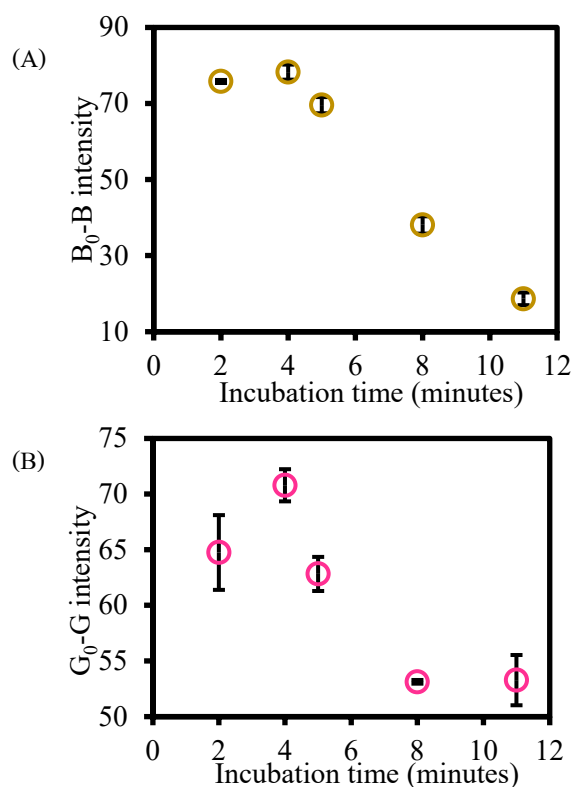


Fig. 6 Optimum incubation time for simultaneous ammonium and nitrate detection on the μ PADs for (A) ammonium detection (B) nitrate detection. The error bars represent the standard deviation (SD) of three repeated measurements ($n = 3$).

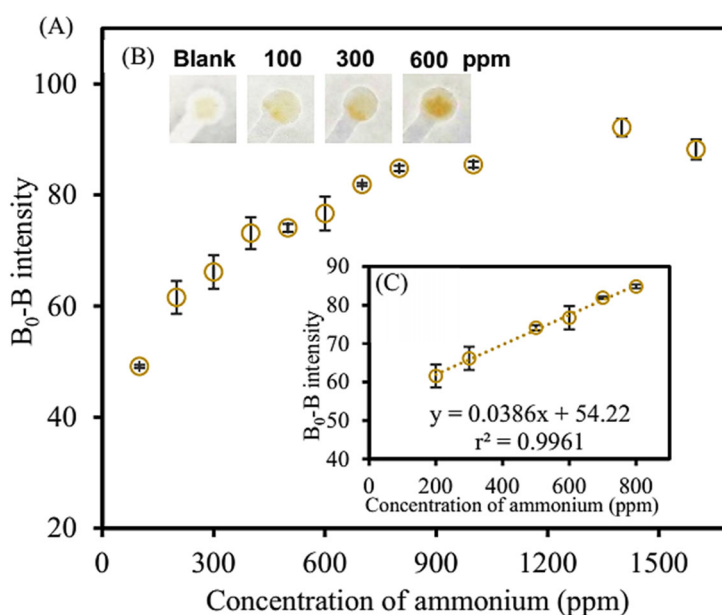


Fig. 7 (A) Linear calibration plot for ammonium detection inset (B) pictures of the color change of μ PAD and (C) calibration concentration of ammonium.

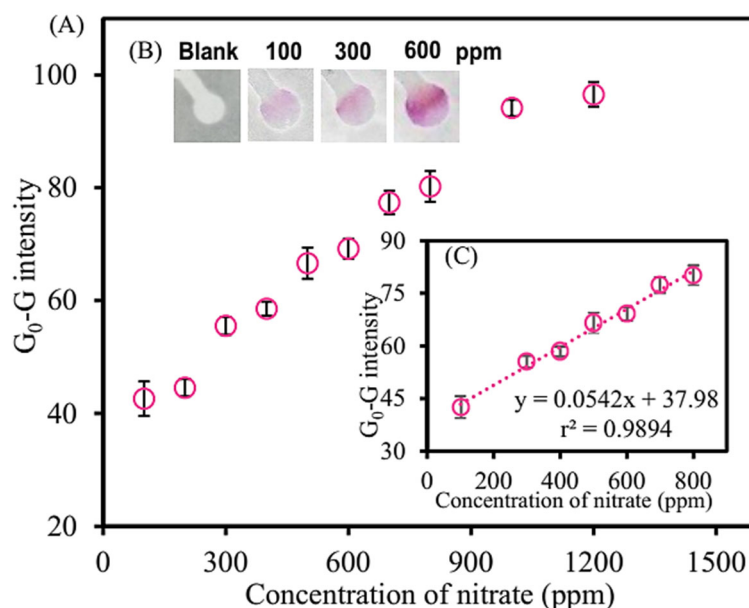


Fig. 8 (A) Linear calibration plot for nitrate detection inset

(B) pictures of the color change of μ PAD and (C) calibration concentration of nitrate.

4. Conclusions

This research developed the μ PADs as viable devices for detecting ammonium nitrate in the field alongside a mobile phone camera. Additionally, it is feasible to integrate the μ PADs with the program to create a device for quantifying ammonium nitrate levels in samples. The advantage of this research is that shortly after the sample is applied, both ammonium and nitrate can be detected through visual inspection and analysis using a smartphone camera. These μ PADs will provide law enforcement for analyzing unknown suspected ammonium nitrate in ANFO. Furthermore, this method is simple, low cost, portable and rapid for on-site analysis of explosives without requiring elaborate laboratory equipment.

5. Acknowledgements

This research was supported by the Defence Science and Technology Department, Royal Thai Army, and Chulachomklao Royal Military Academy. The researchers also gratefully utilized the instruments and facilities that the Department of Chemistry, Chulachomklao Royal Military Academy, provided. The authors would like to sincerely thank the cadets who participated in the project during the 2021–2022 academic year. Special thanks are also extended to Assoc. Prof. Dr. Purim Jarujamrus, Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, for his valuable support and guidance.

6. References

- [1] Action on Armed Violence, “An Examination on the Precursor Chemicals Used in the Manufacture of Explosive Compositions Found Within Improvised Explosive Devices,” [Online]. Available: https://cd-geneve.delegfrance.org/IMG/pdf/precursor-chemicals_ieds-v5.pdf. (Accessed: July. 22, 2024).
- [2] National Academies and Department for Homeland Security, “IED Attack: Improvised Explosive Devices,” [Online]. Available: https://www.dhs.gov/xlibrary/assets/prep_ied_fact_sheet.pdf. (Accessed: July. 22, 2024).
- [3] K. G. Balachandar and A. Thangamani, “Studies on Some of the Improvised Energetic Materials (IEMs): Detonation, Blast Impulse and TNT Equivalence Parameters,” *Oriental Journal of Chemistry*, vol. 35, no. 6, pp. 1813-1823, 2019.
- [4] C. Oommen and S. Jain, “Ammonium Nitrate: A Promising Rocket Propellant Oxidizer,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 67, no. 3, pp. 253-281, 1999.
- [5] R. Sharma and S. Kumar, “Rapid Prediction of ANFO Based Explosives through ATR-FTIR Analysis – Use of ATR-FTIR in Explosives,” *Brazilian Journal of Analytical Chemistry*, vol. 11, no. 43, pp. 92-100, 2024.
- [6] I. Corbin and B. McCord, “Detection of the Improvised Explosives Ammonium Nitrate (AN) and Urea Nitrate (UN) Using Non-aqueous Solvents with Electrospray Ionization and MS/MS Detection,” *Talanta*, vol. 115, pp. 533-539, 2013.
- [7] H. Brust, et al., “Isotopic and Elemental Profiling of Ammonium Nitrate in Forensic Explosives Investigations,” *Forensic Science International*, vol. 248, pp. 101-112, 2015.
- [8] A. B. Anushka and P. K. Das, “Paper Based Microfluidic Devices: A Review of Fabrication Techniques and Applications,” *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 232, no. 6, pp. 781-815, 2023.
- [9] W. Dungchai, O. Chailapakul and C. S. Henry, “A Low-cost, Simple, and Rapid Fabrication Method for Paper-based Microfluidics Using Wax Screen-printing,” *The Analyst*, vol. 136, no. 1, pp. 77-82, 2011.
- [10] Y. Xia, J. Si and Z. Li, “Fabrication Techniques for Microfluidic Paper-based Analytical Devices and Their Applications for Biological Testing: A Review,” *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 77, pp. 774-789, 2016.
- [11] D. M. Cate, J. A. Adkins, J. Mettakoonpitak and C. S. Henry, “Recent Developments in Paper-Based Microfluidic Devices,” *Analytical Chemistry*, vol. 87, no. 1, pp. 19-41, 2015.
- [12] Y. F. Wisang, H. Sulistyarti, U. Andayani and A. Sabarudin, “Microfluidic Paper-based Analytical Devices (μPADs) for Analysis Lead Using Naked Eye and Colorimetric Detections,” *Materials Science and Engineering*, vol. 546, no. 3, 2019.

- [13]H. Bazayr, “On the Application of Microfluidic-Based Technologies in Forensics: A Review,” *Sensors*, vol. 23, no. 13, 5856, 2023.
- [14]G. G. Morbioli, T. Mazzu-Nascimento, A. M. Stockton and E. Carrilho, “Technical Aspects and Challenges of Colorimetric Detection with Microfluidic Paper-based Analytical Devices (μ PADs) - A Review,” *Analytica Chimica Acta*, vol. 970, pp. 1-22, 2017.
- [15]W. Zhao and A. van der Berg, “Lab on Paper,” *Lab on a Chip*, vol. 8, no. 12, pp. 1988-1991, 2008.
- [16]K. L. Peters, I. Corbin, L. M. Kaufman, K. Zreibe, L. Blanes and B. R. McCord, “Simultaneous Colorimetric Detection of Improvised Explosive Compounds Using Microfluidic Paper-based Analytical Devices (μ PADs),” *Analytical Methods*, vol. 7, no. 1, pp. 63-70, 2015.
- [17]N. L. Nxumalo, L. M. Madikizela, H. G. Kruger, S. C. Onwubu and P. S. Mdluli, “Development of a Paper-based Microfluidic Device for the Quantification of Ammonia in Industrial Wastewater,” *Water SA*, vol. 46, no. 3, pp. 506-513, 2020.
- [18]B. M. Jayawardane, S. Wei, I. D. McKelvie and S. D. Kolev, “Microfluidic Paper-based Analytical Device for the Determination of Nitrite and Nitrate,” *Analytical Chemistry*, vol. 86, no.15, pp. 7274-7279, 2014.
- [19]L. Váradi, M. Breedon, F. F. Chen, A. Trinchi, I. S. Cole and G. Wei, “Evaluation of Novel Griess-reagent Candidates for Nitrite Sensing in Aqueous Media Identified via Molecular Fingerprint Searching,” *RSC Advances*, vol. 9, no. 7, pp. 3994-4000, 2019.
- [20]D. Tsikas, “Analysis of Nitrite and Nitrate in Biological Fluids by Assays Based on the Griess Reaction: Appraisal of the Griess Reaction in the L-arginine/nitric Oxide Area of Research,” *Journal of Chromatography B*, vol. 851, no. 1-2, pp. 51-70, 2007.
- [21]A. Charbaji, H. Heidari-Bafroui, C. Anagnostopoulos and M. Faghri, “A New Paper-based Microfluidic Device for Improved Detection of Nitrate in Water,” *Sensors*, vol. 21, no. 1, pp. 1-15, 2021.
- [22]Department of the Army Technical Manual, TM9-1300-214 Military Explosives, Washington D.C.: US Army, 1984.
- [23]J. N. Miller and J. C. Miller, *Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry*. 6th ed. London: Pearson, 2010.

นวัตกรรมจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ Innovation Weed Management using Alternating Current

อนุชา ริการณ¹, ยศภัทรชัย คณิตปัญญาเจริญ^{2*} และ ธนิต เมธีณกุล³

^{1,2}คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

³คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

Anucha Rikakorn¹, Yodphatarachai Kanitpunyacharoen^{2*}, Thanit Metheenukul³

^{1,2}Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University

³Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University

kunrda@uru.ac.th

Received 23 October 2024

Revised 09 December 2024

Accepted 22 January 2025

บทคัดย่อ

การพัฒนานวัตกรรมจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับมีเป้าหมายเพื่อสร้างต้นแบบการกำจัดวัชพืชแบบไม่ใช้สารเคมีและประเมินประสิทธิภาพต้นแบบนวัตกรรม ด้วยวิธีการวิจัยและพัฒนานวัตกรรมกับวัชพืชไมยราบยักษ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น 12 - 35 มิลลิเมตร ด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันสูงสุด 2,500 โวลต์ ในระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า 5, 10 และ 15 วินาที เพื่อทำลายเซลล์พืชลำเลียงอาหารให้ขาดช่วงจากรากสู่ลำต้น พบว่า การปล่อยกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงเวลาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นที่แตกต่างกันทำให้วัชพืชไมยราบยักษ์มีลักษณะเฉา เหี่ยว และแห้งตายในที่สุดภายในระยะเวลาเฉลี่ย 2.25, 3.75 และ 5.75 วัน โดยใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 95.45 – 203.14 วัตต์ ตามลำดับ

คำสำคัญ: กำจัดวัชพืช, ไฟฟ้า, กระแสสลับ, ไมยราบยักษ์, ไม่ใช้สารเคมี

Abstract

The development of a weed control innovation using alternating current aims to create a chemical-free weed control prototype and evaluate its efficiency through research and development methods on giant mimosa weeds with stem diameters ranging from 12 to 35 millimeters subjected to alternating current at a maximum voltage of 2,500 volts for electric discharge durations of 5, 10, and 15 seconds. The results demonstrated that the weeds withered and ultimately died within an average of 2.25, 3.75, and 5.75 days, respectively, corresponding to an increase in average electric power from 95.45 to 203.14 watts, relative to stem diameter.

Keyword: Weed Out, Electricity, Electric Current, Giant Mimosa, Not Chemical

1. บทนำ

การจัดการวัชพืชหรือกำจัดวัชพืชเพื่อลดปริมาณวัชพืชหรือป้องกันไม่ให้เกิดวัชพืชในแปลงการเกษตรแบบถาวรมีวิธีการตั้งแต่การใช้มือเปล่าด้วยการถอนรากออก การใช้วัสดุคลุมดิน การฉีดพ่นด้วยน้ำส้มสายชู การเผาทำลาย การสร้างรั้วล้อมรอบ การปลูกพืชอื่นให้มากกว่าจำนวนวัชพืช การใช้น้ำร้อนลวก การใช้ชีวภัณฑ์ฉีดพ่น การนำมาใช้ประโยชน์อื่นแทน หรือการใชยากำจัดวัชพืช เป็นต้น [1] สอดคล้องกับทางเลือกในการกำจัดวัชพืชโดยไม่ใช้สารเคมีสามารถดำเนินการได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ ด้วยวิธีทางกล ด้วยวิธีการกำหนดเขตเกษตร ด้วยวิธีทางความร้อน [2] ซึ่งปัจจุบันมีเทคโนโลยีการกำจัดวัชพืชโดยใช้กระแสไฟฟ้าที่มีข้อดี คือ ไม่ทำให้เกิดการตกค้างของสารเคมีที่อาจเป็นอันตรายต่อคน สัตว์ และสิ่งแวดล้อม อีกทั้งไม่ทำให้เกิดการดื้อยาของวัชพืช [3] และสอดคล้องกับการใช้มาตรการของประเทศได้เตรียมการยกเลิกการใช้สารเคมีในการกำจัดวัชพืช เนื่องจากไม่ทราบเป็นวัชพืชที่ต้องควบคุมการรุกราน หากแต่ประเทศไทยยังไม่มีมาตรการทางกฎหมายเนื่องจากเป็นวัชพืชต่างถิ่นตามมติรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 ที่ต้องดำเนินการป้องกัน ควบคุม และกำจัดวัชพืชไม่ทราบ [4] การวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายหลักเพื่อต้องการสร้างและพัฒนาต้นแบบนวัตกรรมจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับพร้อมด้วยกับการประเมินประสิทธิภาพในการใช้งานนวัตกรรมเพื่อลดปัญหาการรุกรานของไมยราบยักษ์และลดปัญหาการสัมผัสสารเคมีกำจัดวัชพืชให้กับผู้ใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 งานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางการลดการใช้สารเคมีในการกำจัดวัชพืชในพื้นที่การเกษตร โดยมุ่งเน้นกำจัดวัชพืชประเภทวัชพืชไมยราบยักษ์ด้วยกระแสไฟฟ้า

2.2 งานวิจัยนี้กำหนดขนาดกำลังไฟฟ้าเป้าหมายในการออกแบบต้นแบบนวัตกรรมจัดการกำจัดวัชพืช ขนาดกำลังไฟฟ้าเป้าหมายสูงสุด 1,500 วัตต์ (Watt หรือ VA) ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาเข้า 230 โวลต์ (Volt; V) แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขาออก 2,500 โวลต์ (Volt) และที่ระดับความถี่กระแสไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ (Hertz; Hz)

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การกำจัดหรือการควบคุมวัชพืชไม่ให้แพร่ขยายเนื่องจากมีส่วนทำให้พืชเจริญเติบโตช้า ทำให้จำเป็นต้องมีการกำจัดหรือควบคุมให้มีปริมาณวัชพืชลดลงหรือหมดไป ซึ่งต้องรู้จักและทราบลักษณะทางพฤกษศาสตร์หรือวงจรชีวิตของวัชพืชนั้น ๆ รวมทั้งพิจารณาถึงสภาพแวดล้อมและขนาดเนื้อที่ที่ทำการเพาะปลูก โดยวิธีการกำจัดวัชพืชมีหลากหลายวิธีตั้งแต่การใช้แรงงาน เช่น การใช้มือถอน การใช้มีด การใช้จอบ การใช้เสียม การใช้เครื่องจักรกลตัดหรือทำลายวัชพืช การใช้สารเคมีในการกำจัดวัชพืชที่ต้องอาศัยแรงงานหรือการใช้โดรนพ่น [5] เป็นต้น

ปัจจุบันการกำจัดวัชพืชในพื้นที่การเกษตรได้ให้ความสำคัญต่อผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมเนื่องจากเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงทางภูมิอากาศและส่งผลต่อการทำการเกษตร ก่อให้เกิดให้มีการทำการเกษตรแบบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง อาทิ การทำการเกษตรแบบอินทรีย์ การใช้สารกำจัดวัชพืชจากธรรมชาติ การใช้พลาสติกคลุมดิน การหมักดินก่อนการเพาะปลูก การใช้ความร้อนไฟเผาไหม้แบบเฉพาะจุด [6] เป็นต้น อีกหนึ่งวิธีหนึ่งที่กำลังเป็นที่รู้จัก คือ การใช้พลังงานไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าทำลายวัชพืช (Electricide) [3] โดยมีทั้งการกำจัดวัชพืชด้วยกระแสไฟฟ้าแบบแผ่นแนบราบกับพื้นดินหรือแบบจี้ต้นวัชพืชเฉพาะจุด ๆ ด้วยเลเซอร์หรือด้วยกระแสไฟฟ้า มีทั้งระบบที่มีการควบคุมด้วยแรงงานคน ระบบควบคุมแบบระยะไกลและระบบควบคุมการกำจัดวัชพืชแบบอัตโนมัติ โดยระบบอาศัยหลักการทำงานจากการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเพื่อทำให้เซลล์พืชถูกทำลายจนส่งผลให้ทางลำเลียงอาหารของพืชขาดตอน แล้วทำให้พืชเหี่ยว และแห้งตายในที่สุด โดยไม่มีผลต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของเกษตรกรหรือผู้ใช้และยังสามารถเลือกกำจัดวัชพืชได้ตามเป้าหมายได้อีกด้วย

4. การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการพัฒนานวัตกรรมจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับใช้วิธีการวิจัยและพัฒนาเพื่อสรรหาแนวทางการลดการใช้สารเคมีในการกำจัดวัชพืชของพื้นที่การเกษตรหรือตามที่ผู้สนใจต้องการ โดยมีสมมุติฐานการวิจัย “กระแสไฟฟ้ามีผลต่อการเจริญเติบโตของวัชพืชไมยราบยักษ์” มีวิธีการดำเนินการวิจัย ดังนี้

1. ออกแบบชุดสร้างกำลังไฟฟ้าแรงดันสูง ด้วยการกำหนดเป้าหมายการออกแบบหรือขอบเขตการวิจัย ได้แก่ กำลังไฟฟ้าเป้าหมาย แรงดันไฟฟ้าขาเข้า แรงดันไฟฟ้าขาออก และความถี่กระแสไฟฟ้าใช้งาน เพื่อคำนวณค่าที่เกี่ยวข้อง คือ ขนาดขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า ความหนาแกนเหล็กหม้อแปลง ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กและจำนวนขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า ผลการออกแบบมีดังนี้

1.1 หาขนาดกระแสไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้า ด้วยการใช้สมการกำลังไฟฟ้า ดังสมการที่ 1 เพื่อคำนวณหาขนาดกระแสไฟฟ้าด้านขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้ผลการคำนวณขนาดกระแสไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนี้

สมการกำลังไฟฟ้า

$$I_1 \times V_1 = I_2 \times V_2 \quad (1)$$

$$I_1 = VA / V_1 \quad (2)$$

$$I_2 = VA / V_2 \quad (3)$$

โดย I_1 คือ กระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ, V_1 คือ แรงดันไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ, I_2 คือ กระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ, V_2 คือ แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ และ VA คือ กำลังไฟฟ้าเป้าหมาย

แทนค่าเพื่อคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ

$$\begin{aligned} I_1 &= VA / V_1 \\ &= 1,500 / 230 \\ &= 6.52 \text{ A} \end{aligned}$$

แทนค่าเพื่อคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ

$$\begin{aligned} I_2 &= VA / V_2 \\ &= 1,500 / 2,500 \\ &= 0.60 \text{ A} \end{aligned}$$

1.2 กำหนดขนาดขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า (Wire Size) ด้วยการนำค่ากระแสไฟฟ้าของขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้ทั้งด้านขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ มาเปิดตารางขนาดเส้นลวดทองแดง (ตามตารางที่ 1) พบว่า ขนาดเส้นลวดด้านปฐมภูมิควรใช้ขนาด 12 AWG (American Wire Gauge) (8.70 amp) และขนาดเส้นลวดด้านทุติยภูมิควรใช้ 23 AWG (0.75 amp)

1.3 หาความหนาแกนเหล็กหม้อแปลง (h) เริ่มด้วยการคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กหม้อแปลง (A) ตามสมการที่ 4 ที่กำหนดค่าเป้าหมายกำลังไฟฟ้าเป้าหมาย 1,500 วัตต์ และขนาดแกน (d) วั้ที่ 2 นิ้ว (ดังรูปที่ 1 และตามตารางที่ 2) ผลการคำนวณหาความหนาแกนเหล็กหม้อแปลง ตามสมการที่ 5 ได้ดังนี้

สมการพื้นที่แกนหม้อแปลงไฟฟ้า [8]

$$A = \sqrt{VA} / 5.58 \quad (4)$$

แทนค่าสมการ

$$A = \sqrt{1,500} / 5.58$$

$$= 6.94 \text{ นิ้ว}$$

สมการความหนาแกนเหล็กหม้อแปลง

$$A = d \times h \quad (5)$$

$$h = A / d$$

แทนค่าสมการ

$$h = 6.94 / 2$$

$$= 3.47 \text{ นิ้ว}$$

ตารางที่ 1 ขนาดเส้นลวดทองแดง

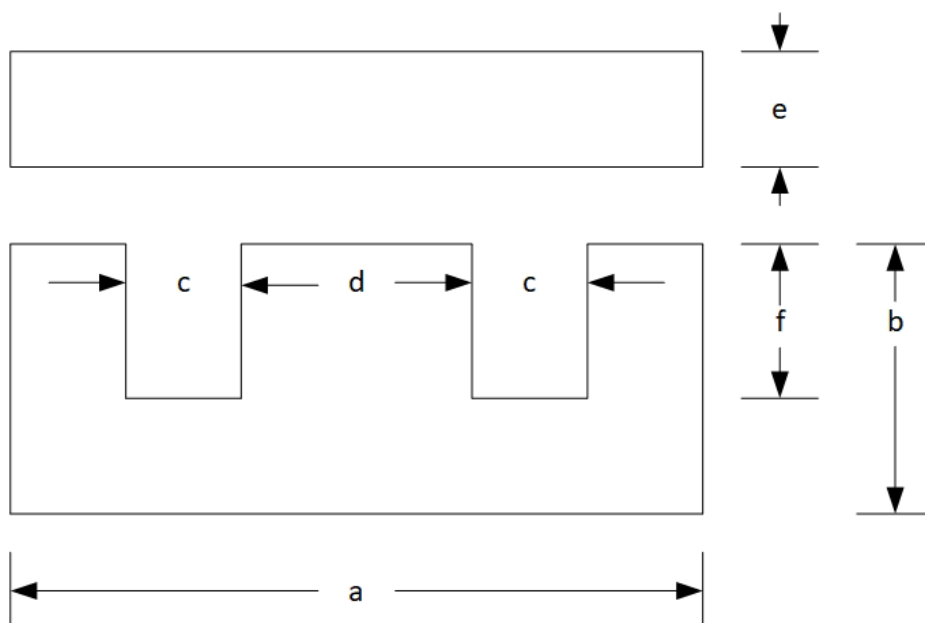
ขนาดเส้นลวด* (AWG)	ความสามารถการไหลของกระแส (at 750 cir mils per amp)	จำนวนรอบต่อชั้นต่อนิ้ว (ลวดเคลือบฉนวน)
12	8.70	11.50
14	5.40	15.00
15	4.30	15.50
22	0.85	36.00
23	0.75	40.00
24	0.54	45.00

*American Wire Gauge; American Standard or Brown & Sharpe Wire Gage [7]

ที่มา: ดัดแปลงจาก [7]

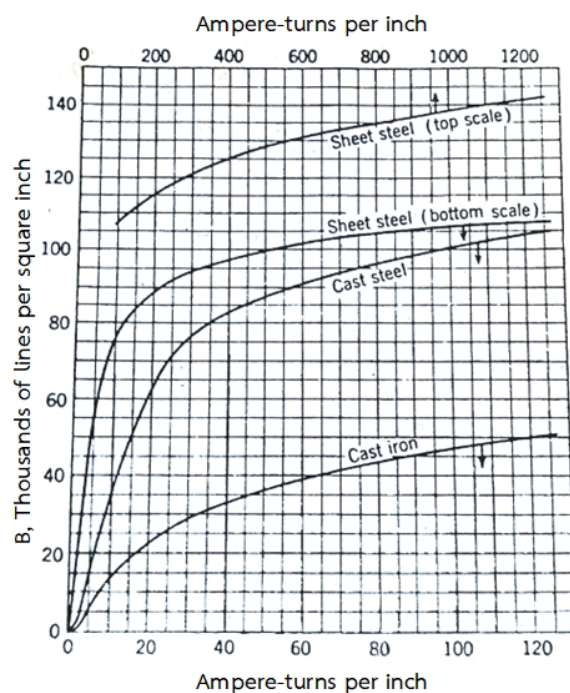
ตารางที่ 2 ขนาดแผ่นเหล็กหม้อแปลงที่สัมพันธ์กับกำลังเอาต์พุตของหม้อแปลง [7]

ลำดับ	กำลังขาออกเอาต์พุต (วัตต์)	a	b	c	d	e	f
1	0 - 200	3.75	2.50	0.50	1.0625	0.75	1.50
2	200 - 400	4.50	3.00	0.625	1.25	0.75	1.825
3	400 - 800	5.25	3.50	0.875	1.75	0.875	2.625
4	800 - 1,500	6.00	4.00	1.00	2.00	1.00	3.00
5	1500 - 2,500	7.50	5.00	1.25	2.50	1.25	3.75
6	2,500 - 4,000	9.00	6.00	1.50	5.00	1.50	4.50



รูปที่ 1 ลักษณะของแผ่นเหล็กแกนเหล็กหม้อแปลง [7]

1.4 กำหนดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ด้วยตารางเส้นกราฟความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (ดังรูปที่ 2) เริ่มด้วยการกำหนดชนิดแกนเหล็กที่ต้องการใช้และจุดที่ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กเริ่มอิ่มตัว พบว่า แกนเหล็กแบบเหล็กแผ่น (Sheet steel) เหมาะสม หาซื้อได้ง่ายและเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปในการทำหม้อแปลงไฟฟ้า [7] โดยมีค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กอยู่ในช่วง 80,000 ถึง 90,000 เส้นต่อตารางนิ้ว รวมทั้งมีค่าแรงดันแม่เหล็ก (Ampere turn) อยู่ในช่วง 15 – 20 แอมแปร์เทิร์นต่อนิ้ว



รูปที่ 2 เส้นกราฟแสดงความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก [7]

1.5 หาจำนวนรอบขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าด้านขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ ด้วยสมการหาจำนวนรอบขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า ตามสมการที่ 7 ที่มีค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจากการคำนวณและค่ากำหนดเป้าหมายของการสร้างขดหม้อแปลงข้างต้น โดยกำหนดค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก เท่ากับ 85,000 เส้นต่อตารางนิ้ว ผลการคำนวณจำนวนรอบขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า ได้ดังนี้

สมการหาจำนวนรอบขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้า

$$E = 4.44 \times f \times B_m \times N_n \times A \times 10^{-8} \quad (6)$$

$$N_n = E / 4.44 \times f \times B_m \times A \times 10^{-8} \quad (7)$$

โดย E คือ แรงดันไฟฟ้า, Bm คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก, f คือ ความถี่กระแสไฟฟ้า, N₁ คือ จำนวนรอบขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ, N₂ คือ จำนวนรอบขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ และ A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กหม้อแปลง

จำนวนรอบขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } N_1 &= E_1 / (4.44 \times f \times B_m \times A \times 10^{-8}) & (8) \\ &= 230 / (4.44 \times 50 \times 85,000 \times 6.94 \times 10^{-8}) \\ &= 175.63 \quad \text{รอบ} \end{aligned}$$

จำนวนรอบขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ

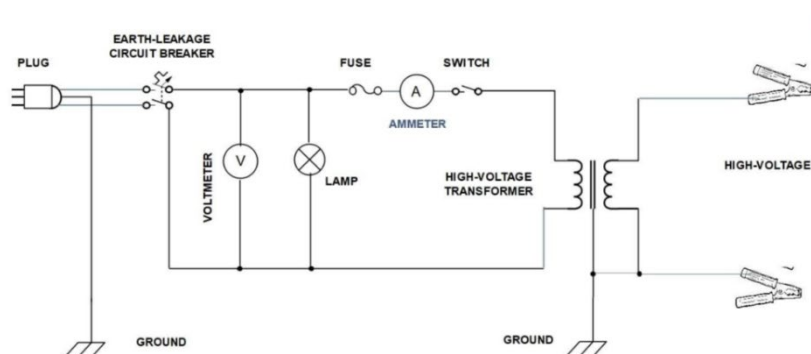
$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } N_2 &= E_2 / (4.44 \times f \times B_m \times A \times 10^{-8}) & (9) \\ &= 2,500 / (4.44 \times 50 \times 85,000 \times 6.94 \times 10^{-8}) \\ &= 1,909.01 \quad \text{รอบ} \end{aligned}$$

2. สร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง โดยนำผลลัพธ์จากการคำนวณขนาดอุปกรณ์หม้อแปลงไฟฟ้าในขั้นตอนที่ 1 เป็นข้อมูลพื้นฐานการดำเนินงานเริ่มด้วยดำเนินการจัดหาและปรับแต่งแผ่นเหล็กแกนเหล็กหม้อแปลงให้เป็นไปตามเป้าหมายต่อด้วยพันเส้นลวดรอบบ๊อบบี้พลาสติกทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิให้ได้จำนวนรอบและความหนาที่คำนวณได้จากนั้นนำแกนเหล็กของหม้อแปลงที่ได้จากการประกบกันของแผ่นเหล็กใส่เข้ากับบ๊อบบี้พลาสติกสุดท้ายปรับแต่งตำแหน่งเส้นลวดให้ถูกต้องตามตำแหน่งและเหมาะสมกับการเชื่อมต่อสายไฟทั้งทางด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ซึ่งผลการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง (ดังรูปที่ 3) ได้ดังนี้



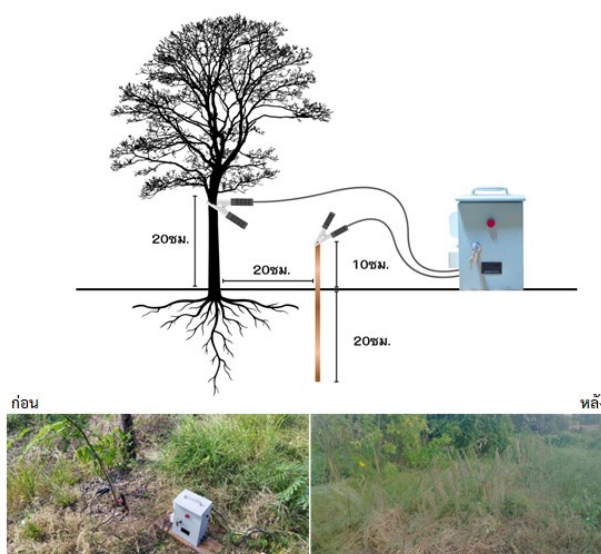
รูปที่ 3 การสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง

3. ออกแบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมการใช้งานวัตรกรรมการจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ ด้วยการกำหนดเส้นทางการเดินทางกระแสไฟฟ้า 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1) วงจรกระแสไฟฟ้ากำลังที่มีทั้งด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิหรือแยกเป็นวงจรไฟฟ้าแรงดันต่ำและวงจรไฟฟ้าแรงดันสูง โดยขดลวดปฐมภูมิเป็นขดขดลวดรับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายปกติ ผ่านอุปกรณ์ควบคุมเปิด-ปิดวงจรเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน และกระแสไฟฟ้าแรงดันสูงได้จากขดลวดทุติยภูมิเป็นขดขดลวดเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเพื่อกำจัดวัชพืชตามเป้าหมายผ่านอุปกรณ์ชุดหัวจับยึดต้นวัชพืชที่ทำงานตามการเปิด-ปิดวงจรแรงดันต่ำ และส่วนที่ 2) วงจรกระแสไฟฟ้าควบคุมเพื่อเปิด-ปิดการไหลกระแสไฟฟ้าของวงจร เพื่อป้องกันอันตรายจากกระแสไฟฟ้า แสดงปริมาณกระแสไฟฟ้า ปริมาณแรงดันไฟฟ้า แสดงสัญลักษณ์การทำงานของอุปกรณ์และการไหลของกระแสไฟฟ้า (ดังรูปที่ 4)



รูปที่ 4 วงจรไฟฟ้าการใช้งานวัตรกรรมการจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ

4. ทดสอบวัตรกรรมการจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ โดยต่อสายไฟแรงดันสูงของเครื่องเข้ากับต้นไม้ด้วยอุปกรณ์ชุดหัวจับยึดต้นวัชพืชโดยมีระยะหัวจับยึดต้นวัชพืช แท่งกราวด์ และความลึกแท่งกราวด์ 20 เซนติเมตร (ดังรูปที่ 5) จากนั้นเปิดวงจรไฟฟ้าด้วยเวลา 5, 10 และ 15 วินาที ตามลำดับ รวมทั้งกับต้นไม้ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน จำนวน 4 ชุดขนาด แต่ละชุดขนาด จำนวน 3 ครั้ง คือ ชุดขนาด 12-15 เซนติเมตร ชุดขนาด 20-23 เซนติเมตร ชุดขนาด 24-27 เซนติเมตร และชุดขนาด 33-35 เซนติเมตร



รูปที่ 5 การติดตั้งชุดนวัตรกรรมการจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผลการสร้างและพัฒนานวัตกรรมการจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ พบว่า ชุดนวัตกรรมการกำจัดวัชพืชในด้านโครงสร้างขนาดความกว้าง ความสูง และความหนา เท่ากับ $25 \times 35 \times 15$ เซนติเมตร ด้านหน้ามีหลอดไฟแสดงสัญญาณการเปิดการทำงาน และมีจอแสดงค่าทางไฟฟ้าแบบดิจิทัล ได้แก่ ขนาดแรงดันไฟฟ้า ปริมาณกระแสไฟฟ้า และปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้า ข้างซ้ายตู้ชุดอุปกรณ์นวัตกรรมการติดตั้งเซอร์กิตเบรกขนาด 30 แอมแปร์ และสวิตช์ควบคุมการเปิด-ปิดระบบวงจรไฟฟ้า ด้านขวาตู้ชุดอุปกรณ์นวัตกรรมการติดตั้งฟิวส์และชุดสายอุปกรณ์ชุดหัวจับยึดต้นวัชพืช ส่วนบนติดตั้งมือจับสำหรับการเคลื่อนย้าย (ดังรูปที่ 6) ส่วนด้านก้นล่างไฟฟ้าของนวัตกรรมการจัดการวัชพืช มีแรงดันไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 2,500 โวลต์ กระแสไฟฟ้าสูงสุด 0.6 แอมแปร์ ทำงานด้วยแรงดันไฟฟ้าใช้งานปกติจากแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคโดยทั่วไปและใช้วัสดุอุปกรณ์ที่หาได้โดยทั่วไปเช่นกัน

จากผลการสร้างนวัตกรรมการจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ พบว่า เป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างการทำงานในรูปแบบเฉพาะที่ซึ่งต้องเคลื่อนย้ายด้วยตัวบุคคลผู้ใช้งานมีวงจรไฟฟ้าการทำงานที่ง่ายในการตรวจสอบหรือซ่อมแซมสำหรับผู้ใช้งานสอดคล้องกับผลการพัฒนาชุดอุปกรณ์เพื่อการเรียนรู้วงจรไฟฟ้า [9] ที่ต้องออกแบบให้เหมาะสมกับผู้ใช้งานอันจะทำให้ผู้ใช้งานได้เรียนรู้ในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมอย่างมีนัยยะสำคัญ หากแต่ชุดนวัตกรรมการกำจัดวัชพืชต้องมีผู้ใช้งานเป็นผู้เคลื่อนย้ายอุปกรณ์อาจทำให้เกิดความล่าช้าในการใช้งานซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาาระบบจัดการฟาร์มด้วยหุ่นยนต์บริการกำจัดวัชพืช [10-14] ที่ทำงานด้วยระบบ IoT ที่จะสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายด้วยการควบคุมระยะไกลรวมทั้งสามารถเพิ่มอุปกรณ์การตรวจจับวัชพืชที่ไม่ต้องการได้ด้วยรวมทั้งสามารถทำงานได้ต่อพื้นที่และเวลาได้ดีกว่า



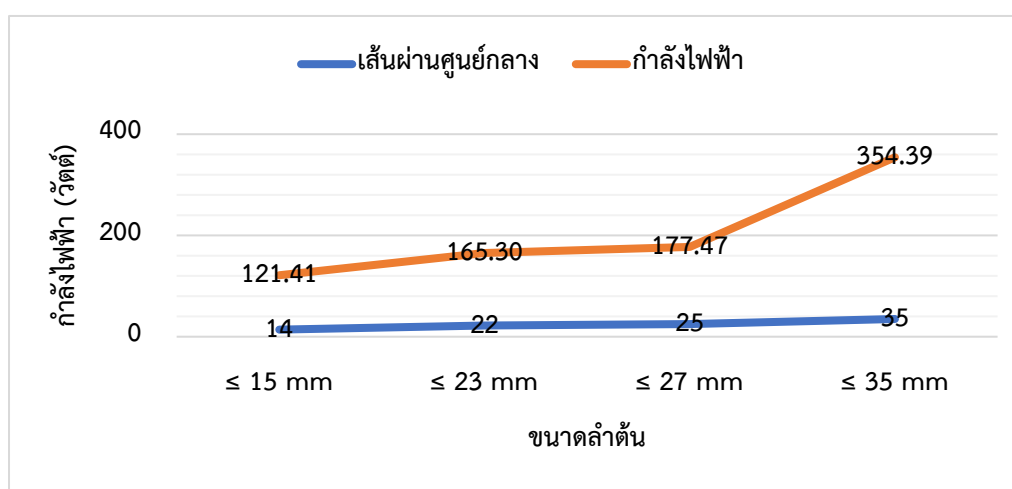
รูปที่ 6 ชุดนวัตกรรมการจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ

2. ผลการประเมินประสิทธิภาพนวัตกรรมการจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ พบว่า การทำให้วัชพืชตายในระยะเวลาที่สั้นนั้นต้องใช้กระแสไฟฟ้าที่สูง โดยสภาพวัชพืชเป้าหมายมีลักษณะตั้งแต่เฉา เหี่ยว และแห้งตายตามขนาดของต้นวัชพืชและปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ใช้แตกต่างกันรวมทั้งมีลักษณะเพิ่มขึ้นไป ณ จุด ๆ หนึ่ง (ดังรูปที่ 7) ซึ่งลักษณะวัชพืชที่ถูกจำกัดในลักษณะเฉาใช้ระยะเวลาเฉลี่ย 2.25 วัน ลักษณะวัชพืชเหี่ยวใช้ระยะเวลาเฉลี่ย 3.75 วัน และลักษณะวัชพืชแห้งใช้ระยะเวลาเฉลี่ย 5.75 วัน (ตามตารางที่ 3) ในขนาดวัชพืชที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 12 - 35 มิลลิเมตร และเวลาในการปล่อยกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 5 - 15 วินาที โดยใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยตั้งแต่ 95.45 วัตต์ ถึง 203.14 วัตต์ (ตามตารางที่ 4)

จากผลการประเมินประสิทธิภาพนวัตกรรมการจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ พบว่า ระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัชพืชเป็นปัจจัยสำคัญในการกำจัดวัชพืช ดังนั้นหากต้องการกำจัดวัชพืชควรกำจัดในระยะการเจริญเติบโตของวัชพืชในช่วงเริ่มต้นจะทำให้เกิดความประหยัดค่าใช้จ่ายแรงงานและค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าสอดคล้องกับการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช [15] ที่ต้องใช้ในช่วงต้นกล้าเพื่อให้เกิดผลการกำจัดได้ดี รวมทั้งสอดคล้องกับการใช้เทคโนโลยีกำจัดวัชพืชสมัยใหม่ [10-14] ในการกำจัดวัชพืชด้วยระบบหุ่นยนต์ ด้วยกระแสไฟฟ้า หรือด้วยกลไกที่สามารถควบคุมได้ในระยะไกลและใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์ตรวจจับวัชพืชที่ไม่ต้องการในแปลงเพาะปลูกอันจะทำให้เกิดความประหยัด รวดเร็วและไม่สัมผัสกับสารเคมี ทั้งนี้วัชพืชไม่รบกวนเมื่อสามารถกำจัดได้ด้วยกระแสไฟฟ้าแล้วยังสามารถนำวัชพืชไปใช้ประโยชน์ได้อาทิเป็นส่วนผสมอาหารปลาหรือเป็นส่วนผสมเชื้อเพลิงแท่ง [16, 17] เป็นต้น

ตารางที่ 3 ลักษณะวัชพืชที่ถูกกำจัดด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ

สภาพต้นไม้อ (วัน)			ค่าสถิติ
เฉา	เหี่ยว	แห้ง	
2.25	3.75	5.75	AVERAGE
4.00	7.00	10.00	MAX
1.00	2.00	3.00	MIN
1.50	2.36	3.40	STDEV



รูปที่ 7 ผลการทดสอบนวัตกรรมการจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบนวัตกรรมการจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ

เวลา (วินาที)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ความสูง (มิลลิเมตร)	แรงดัน (Volt)	กระแส (Amp.)	PF	วัตต์ (Watt)	ค่าสถิติกำลังไฟฟ้า	
5	12	140	235	0.45	0.79	83.54	96.28	AVERAGE
	23	260	233	0.42	0.74	72.42	163.57	MAX
	24	194	231	0.40	0.71	65.60	65.60	MIN
	34	222	233	0.90	0.78	163.57	45.46	STDEV
10	15	146	228	0.56	0.70	89.38	148.43	AVERAGE
	20	286	232	0.81	0.78	146.58	243.16	MAX
	27	200	229	0.65	0.77	114.61	89.38	MIN
	33	271	228	1.35	0.79	243.16	67.35	STDEV
15	14	162	231	0.73	0.72	121.41	204.64	AVERAGE
	22	272	232	0.95	0.75	165.30	354.39	MAX
	25	120	234	0.96	0.79	177.47	121.41	MIN
	35	250	233	1.95	0.78	354.39	102.69	STDEV

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การวิจัยและพัฒนานวัตกรรมจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างต้นแบบนวัตกรรมจัดการวัชพืชไม่รบกวนพืชไร่แบบไม่ใช้สารเคมีและเพื่อประเมินประสิทธิภาพนวัตกรรม ด้วยวิธีการวิจัยและพัฒนานวัตกรรมกับวัชพืชประเภทไมยราบยักษ์ พบว่า เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้า 5, 10 และ 15 วินาที กับไมยราบยักษ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น 12 - 35 มิลลิเมตร ไมยราบยักษ์มีลักษณะเฉา เหี่ยว และแห้งตายในที่สุดภายในระยะเวลาเฉลี่ย 2.25, 3.75 และ 5.75 วัน ซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 95.45 – 203.14 วัตต์ โดยเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้าและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น อีกทั้งวัชพืชไมยราบยักษ์หยุดการขยายพันธุ์อย่างมีนัยยะสำคัญ เป็นผลให้เกิดการกำจัดวัชพืชแบบไม่ใช้สารเคมีเป็นผลสำเร็จหากแต่ต้องใช้พลังงานอย่างระมัดระวังจากกระแสไฟฟ้าแรงดันสูง ดังนั้นควรมีการพัฒนานวัตกรรมให้มีลักษณะการควบคุมการใช้งานแบบระยะไกลและนำเทคโนโลยีเช่น เซอร์สมิใหม่มาประยุกต์ใช้เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยและมีความรวดเร็วเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งทดสอบกับวัชพืชชนิดอื่น ๆ ที่หลากหลาย ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

7. กิตติกรรมประกาศ

นวัตกรรมจัดการวัชพืชด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ ประสบผลสำเร็จและลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ทุนสนับสนุนการศึกษารายจ่ายจากกองทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ ปีงบประมาณ 2566 ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ ผู้วิจัยหวังอย่างยิ่งการศึกษานี้คงเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และผู้สนใจศึกษาต่อไป

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Baania, “15 วิธีกำจัดหญ้าถาวร ให้สวนไร้วัชพืช,” [ออนไลน์]. Available: <https://www.baania.com/article/>. (เข้าถึงเมื่อ: 6 กุมภาพันธ์ 2566).

- [2] ตติยา วิชัยดิษฐ์, “ทางเลือกในการกำจัดวัชพืช,” [ออนไลน์]. Available: <https://repaythailand.com> (เข้าถึงเมื่อ: วันที่ 6 กุมภาพันธ์ 2566).
- [3] สิริวัฒน์ สาครวาลี, “รู้จักเทคโนโลยีการใช้กระแสไฟฟ้ากำจัดวัชพืช,” [ออนไลน์]. Available: <https://mjusmartfarm.wordpress.com> (เข้าถึงเมื่อ: 6 กุมภาพันธ์ 2566).
- [4] พรพรขุฒิ โกศลานนท์, “มาตรการทางกฎหมายในการควบคุมไมยราบยักษ์ (*Mimosa pigra* L.) ในประเทศไทย,” *วารสารบัณฑิตศึกษานิติศาสตร์*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 4, หน้า 851 – 865, 2561.
- [5] สำนักงานชลประทานที่ 9 กรมชลประทาน, “แนวทางและวิธีการกำจัดวัชพืช,” [ออนไลน์]. Available: <http://kmcenter.rid.go.th/kmc09/2016/kplant.pdf> (เข้าถึงเมื่อ: วันที่ 3 ธันวาคม 2567).
- [6] เว็บไซต์กระปุกดอทคอม, “13 วิธีกำจัดวัชพืชแบบธรรมชาติไร้สารเคมีตกค้างทำลายสวน,” [ออนไลน์]. Available: <https://home.kapook.com/view145198.html> (เข้าถึงเมื่อ: วันที่ 3 ธันวาคม 2567).
- [7] ณรงค์ ขอนตะวัน, *หม้อแปลงไฟฟ้า*, กรุงเทพฯ: เอรารัณการพิมพ์, 2524.
- [8] พิชิต สาทิสรัตนโสภิต, “วิธีการคำนวณและการพันหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก,” [ออนไลน์]. Available: <https://www.scribd.com/document/743099607/transformer01>. (เข้าถึงเมื่อ: วันที่ 9 ตุลาคม 2567).
- [9] ชนะ จันทรอิม และพงษ์กฤษณ์ รุ่งสุข, “การพัฒนาชุดสาธิตวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประกอบวิชาวงจรไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ*, ปีที่ 19, ฉบับที่ 1, หน้า 91 – 103, มกราคม-มิถุนายน, 2566.
- [10] บริษัท มินิเอเจอร์ โซลูชันส์ จำกัด, “ระบบจัดการฟาร์มด้วยหุ่นยนต์บริการกำจัดวัชพืช A.I.,” [ออนไลน์]. Available: <https://www.miniaturesolution.com> (เข้าถึงเมื่อ: วันที่ 9 ตุลาคม 2567).
- [11] W. McAllister, D. Osipychiev, A. Davis and G. Chowdhary, “Agbots: Weeding a field with a team of autonomous robots,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 163, pp. 1-14, 2019.
- [12] J. Machleb, G. Gerassimos Peteinatos, L. Benjamin Kollenda, D. Andújar and R. Gerhards, “Sensor-based mechanical weed control: Present state and prospects,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 176, pp. 1-12, 2020.
- [13] M. Perez-Ruiz, D.C. Slaughter, C.J. Gliever and S.K. Upadhyaya, “Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops,” *Computers and Electronics in Agriculture*. vol. 80, pp. 41-49, 2012.
- [14] M. Perez-Ruiz, C. David Slaughter, A. Fadi Fathallah, J. Chris Gliever and J. Brandon Miller, “Co-robotic intra-row weed control system,” *Biosystems Engineering*, vol. 126, pp. 45-55, 2014.
- [15] V. William Mbasu, et al., “Distribution, characterization and chemical management of noxious shrub weed (*Dichapetalum stuhlmannii* Engl) in cashew in Tanzania,” *Heliyon*, vol. 10, pp. 1-14, 2024.
- [16] บรรเจิด สอนสุภาพ, “ผลของการใช้ไมยราบยักษ์ในอาหารปลาตุลุมผสม,” *วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์*, ปีที่ 3, ฉบับที่ 1, หน้า 70-78, มกราคม-มิถุนายน, 2551.
- [15] ครุปรกรณ์ ละเอียดอ่อน, “การประยุกต์ใช้ขานอ้อย ฟางข้าว และไมยราบยักษ์เป็นวัสดุเพาะเห็ดนางรมเทา,” *วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร*, ปีที่ 39, ฉบับที่ 1, หน้า 28-39, มกราคม-เมษายน, 2565.

การออกแบบระบบห้องเรียนอัจฉริยะสำหรับการเรียนการสอน
เพื่อพัฒนาศักยภาพของนักเรียนนายเรืออากาศ
Designing a Smart Classroom System for Teaching and Learning to Improve
Potential of Air Cadets

สิริญา ถนอมพลกรัง¹, ธนาพ ลิ้มสุวรรณโรจน์^{2*} และ สุภาวดี ลีลายุทธ³

^{1,2,3}กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Sirunya Thanompolkrang¹, Tananop Limsuwanroj^{2*} and Supavadee Leelayut³

^{1,2,3}Faculty of Academic Navamida Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Tananop.lims@gmail.com

Received 27 August 2024

Revised 24 January 2025

Accepted 24 January 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อสำรวจความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศที่มีต่อรูปแบบการจัดการเรียนการสอนระบบห้องเรียนอัจฉริยะ และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และออกแบบระบบห้องเรียนอัจฉริยะสำหรับการเรียนการสอนเพื่อพัฒนาศักยภาพของนักเรียนนายเรืออากาศ โดยกลุ่มตัวอย่างแบ่งเป็นอาจารย์จำนวน 69 คน และนักเรียนนายเรืออากาศจำนวน 112 คน

ผลการศึกษาพบว่า การจัดห้องเรียนแบบขั้นบันไดเหมาะกับห้องเรียนขนาดใหญ่ ส่วนการจัดวางโต๊ะเรียนเป็นกลุ่มเหมาะกับห้องเรียนขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม ในสาขาวิชาสังคมศาสตร์พบว่ารูปแบบการจัดห้องเรียนไม่มีผลต่อการเรียนในห้องเรียนขนาดเล็ก ขณะที่ในสาขาวิชาคณิตศาสตร์เห็นว่าการจัดห้องเรียนไม่มีผลต่อการเรียนในห้องเรียนขนาดใหญ่ สำหรับการจัดโครงสร้างของห้องเรียน พบว่าห้องเรียนแบบหลายห้องร่วมกันเหมาะสมกับห้องเรียนขนาดใหญ่ ขณะที่ห้องเรียนขนาดเล็กเหมาะกับโครงสร้างแบบห้องเรียนอิสระ อย่างไรก็ตามอาจารย์สาขาคณิตศาสตร์เห็นว่าลักษณะโครงสร้างห้องเรียนไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเรียนรู้ไม่ว่าจะเป็นห้องขนาดเล็กหรือใหญ่ รูปแบบการเรียนการสอนอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศส่วนใหญ่เห็นตรงกันว่ารูปแบบการสอนแบบผสมผสาน แต่ในสาขาสังคมศาสตร์ นักเรียนนายเรืออากาศให้ความสำคัญกับการเรียนการสอนแบบเน้นผู้เรียนเป็นศูนย์กลางมากกว่า ในด้านทักษะอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศส่วนใหญ่คิดว่าการใช้เทคโนโลยีดิจิทัลมีความจำเป็นมากที่สุด แต่สำหรับสาขามนุษยศาสตร์ ความสามารถด้านการสื่อสารมีความสำคัญกว่าการใช้เทคโนโลยี ในส่วนของฮาร์ดแวร์ (Hardware) พบว่าอุปกรณ์ที่มีความสำคัญสูงสุดคือเครือข่ายอินเทอร์เน็ตที่ครอบคลุม และไมโครโฟนไร้สาย สำหรับซอฟต์แวร์ ทั้งอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศเห็นว่าควรมีโปรแกรมเฉพาะในการเรียน และโปรแกรมสำหรับเรียนการสอน ขณะเดียวกันมีความต้องการระบบเชื่อมต่อกับ Cloud Services โดยเฉพาะในสาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์

คำสำคัญ: ห้องเรียนอัจฉริยะ, การเรียนการสอน, นักเรียนนายเรืออากาศ

Abstract

This research aimed to investigate the opinions of lecturers and air cadets regarding the teaching and learning model of the smart classroom system. The collected data were analyzed and used to design a smart classroom system for teaching and learning to enhance the potential of air cadets. The sample group consisted of 69 lecturers and 112 air cadets.

The study found that a tiered classroom layout is suitable for large classrooms, while group seating arrangements are more appropriate for smaller classrooms. However, in the field of Social Sciences, it was found that classroom layout had no impact on learning in small classrooms, whereas in Mathematics, the layout was perceived to have no effect on learning in large classrooms. Regarding classroom structure, multiple interconnected classrooms were found to be suitable for large classes, while independent classroom setups were more appropriate for small classes. Nonetheless, Mathematics lecturers believed that classroom structure did not affect learning performance, regardless of classroom size. Most lecturers and air cadets agreed that a blended learning approach was preferable. However, air cadets in the Social Sciences placed more importance on learner-centered teaching methods. In terms of essential skills, both instructors and air cadets considered digital technology proficiency to be the most important. In contrast, for the Humanities, communication skills were deemed more critical than technological skills. As for hardware, the most essential components identified were a reliable internet network and wireless microphones. In terms of software, both lecturers and air cadets agreed on the need for subject-specific programs and interactive learning software. Additionally, there was a strong demand for systems integrated with cloud services, especially in the Humanities and Social Sciences.

Keywords: Smart Classroom, Teaching and Learning, Air Cadet

1. บทนำ

จากวิสัยทัศน์กองทัพอากาศในการเป็น “กองทัพอากาศชั้นนำในภูมิภาค” ตลอดจนยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (พ.ศ.2561 – 2580) ในประเด็นยุทธศาสตร์ที่ 2 เสริมสร้างสมรรถนะและความพร้อมในการป้องกันประเทศ กลยุทธ์ที่ 2.13 พัฒนาสมรรถนะและคุณภาพชีวิตกำลังพล กลยุทธ์ย่อยที่ 2.13.2 เสริมสร้างกำลังพลมืออาชีพด้วยการพัฒนาระบบการฝึกศึกษาและการวางแผนพัฒนากำลังพลให้สอดคล้องกับแนวคิดสมรรถนะกำลังพลกองทัพอากาศ ให้มีขีดความสามารถอย่างเพียงพอในสาขางานของตนเอง ก้าวทันเทคโนโลยีและวิทยาการสมัยใหม่ ยกระดับการวิจัยให้เป็นไปตามมาตรฐานสากลโดยเฉพาะการริเริ่มโจทย์วิจัยซึ่งตรงกับความต้องการของกองทัพอากาศ ตลอดจน

วิสัยทัศน์โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช เพื่อให้เป็น “สถาบันในการผลิตผู้นำและแหล่งองค์ความรู้ด้านการบินของชาติ” เป็น Premier Academy ซึ่งประกอบไปด้วย SMART ได้แก่ S คือ STEM Excellence (การเรียนการสอนทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์และคณิตศาสตร์) M คือ Management (การบริหารจัดการ) A คือ Academic Facility Excellence (อาคารสถานที่) R คือ Research & Development Excellence (การวิจัยและพัฒนา) และ T คือ Training & Military Education Excellence (การฝึกศึกษาวิชาทหาร)

กองการศึกษาโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช เป็นหน่วยที่มีความสำคัญในการอำนวยความสะดวก และดำเนินการเกี่ยวกับการศึกษาให้แก่แก่นักเรียนนายเรืออากาศด้านวิชาการภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ ให้เป็นไปตามหลักสูตรและมาตรฐานที่กำหนด และเพื่อบรรลุวิสัยทัศน์โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช รวมทั้งยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (พ.ศ.2561 – 2580) ดังที่กล่าวข้างต้น ประกอบกับนโยบายในการพัฒนาระบบ e-learning ของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชอย่างเป็นรูปธรรม เพื่อช่วยให้การจัดการเรียนการสอนในสถานการณ์ปกติและสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโคโรนามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

การจัดการเรียนการสอนสำหรับนักเรียนนายเรืออากาศ จึงต้องมีการปรับวิธีการให้สอดคล้องกับทรัพยากรสนับสนุนการเรียนรู้ที่มีอยู่ ตลอดจนติดตามเทคโนโลยีสมัยใหม่ เพื่อให้สามารถพัฒนาศักยภาพของนักเรียนนายเรืออากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการจัดการเรียนการสอนในรูปแบบของห้องเรียนอัจฉริยะ (Smart Classroom) สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้เป็นอย่างดี เนื่องจากห้องเรียนอัจฉริยะเป็นห้องเรียนที่มีการผสมผสานระหว่างการจัดสภาพแวดล้อมการเรียนรู้ (Learning Environment) และการนำเทคโนโลยี (Technology) ในลักษณะเฉพาะ เพื่อใช้สำหรับเสริมสร้างประสบการณ์ทางการเรียนการสอน มีจุดเน้นการสร้างปฏิสัมพันธ์ทางการเรียน รวมทั้งการฝึกทักษะด้านต่าง ๆ โดยมีองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน คือ ผู้สอน (Teacher) ผู้เรียน (Learner) สื่อ (Media) และห้องเรียน (Classroom) ที่มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการจัดการเรียนรู้ (Learning Environment) ได้แก่ เครื่องปรับอากาศ เพื่อสนับสนุนรูปแบบการจัดการเรียนการสอนแบบ Active learning

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการพัฒนา รูปแบบห้องเรียนอัจฉริยะในแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น ห้องเรียนอัจฉริยะแบบผสมผสาน การเรียนการสอนแบบมีส่วนร่วมในห้องเรียนอัจฉริยะ เป็นต้น ซึ่งผลการศึกษาทั้งหมดยังได้ตรงกันคือผู้เรียนที่ใช้ระบบนี้มีทักษะการเรียนรู้และนวัตกรรมสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ [1-4] และได้ทำการใช้เทคโนโลยีร่วมกับการเรียนการสอน ซึ่งกล่าวตรงกันว่าผู้เรียนมีความพึงพอใจและผลการเรียนสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ [5-7] รวมถึงได้สรุปว่าครูต้องการการอบรมเพิ่มเติมและต้องการที่ปรึกษาในการใช้เทคโนโลยี [8, 9]

จากปัญหาและแนวคิดดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบระบบห้องเรียนอัจฉริยะสำหรับการเรียนการสอนเพื่อพัฒนาศักยภาพของนักเรียนนายเรืออากาศให้มีความพร้อมทั้งในด้านความรู้ทางวิชาการและการวิจัยเพื่อเป็นกำลังสำคัญในการพัฒนากองทัพอากาศต่อไป

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1) เพื่อสำรวจความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศที่มีต่อรูปแบบและการจัดการเรียนการสอนระบบห้องเรียนอัจฉริยะ

2) เพื่อวิเคราะห์และออกแบบระบบห้องเรียนอัจฉริยะสำหรับการเรียนการสอนเพื่อพัฒนาศักยภาพของนักเรียนนายเรืออากาศ

2.2 สมมติฐานการวิจัย

รูปแบบและองค์ประกอบของห้องเรียนอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นตามความต้องการของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศจะช่วยให้พัฒนาศักยภาพทั้งทางด้านการเรียนและการสอนของนักเรียนนายเรืออากาศ

2.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้รูปแบบและองค์ประกอบของระบบห้องเรียนอัจฉริยะเพื่อนำเสนอให้กับผู้บังคับบัญชาาระดับสูงของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช.ใช้เป็นแนวทางสำหรับการจัดการเรียนการสอนนักเรียนนายเรืออากาศ ณ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช อ.มวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี

2.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

1) ห้องเรียนอัจฉริยะ หมายถึง แหล่งการเรียนรู้ที่ออกแบบเป็นพิเศษ แตกต่างจากห้องเรียนทั่วไป เพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ด้านการเรียนการสอน การฝึกอบรม และการพัฒนาทักษะในด้านต่าง ๆ ผ่านการบูรณาการเทคโนโลยีที่หลากหลาย เช่น สื่อภาพและเสียง โดยเน้นการสร้างปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้สอนและผู้เรียนให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด การเรียนการสอนในห้องเรียนอัจฉริยะครอบคลุม 5 มิติหลัก ได้แก่ 1) S: Showing มิติด้านการนำเสนอข้อมูลและสารสนเทศผ่านสื่อเทคโนโลยี สะท้อนคุณลักษณะทางปัญญา (Cognitive Characteristic) 2) M: Manageable มิติด้านการบริหารจัดการสื่อ อุปกรณ์ ระบบการสอน และทรัพยากรในห้องเรียน 3) A: Accessible มิติด้านการเข้าถึงข้อมูลและแหล่งเรียนรู้ได้อย่างหลากหลายและมีประสิทธิภาพ 4) R: Real-time Interactive มิติด้านปฏิสัมพันธ์แบบเรียลไทม์ระหว่างครูและผู้เรียน รวมถึงการใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์แบบโต้ตอบ และ 5) T: Testing มิติด้านการทดสอบและประเมินผลการเรียนรู้ เพื่อวัดคุณภาพของกิจกรรมการเรียนการสอนและพฤติกรรมการเรียนรู้ของผู้เรียน การบูรณาการทั้ง 5 มิตินี้ช่วยให้ห้องเรียนอัจฉริยะสามารถตอบโจทย์การเรียนรู้ในยุคปัจจุบันได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

2) ห้องเรียนขนาดเล็ก หมายถึง ห้องเรียนที่มีนักเรียนนายเรืออากาศในชั้นเรียน ไม่เกิน 50 คน

3) ห้องเรียนขนาดใหญ่ หมายถึง ห้องเรียนที่มีนักเรียนนายเรืออากาศในชั้นเรียนมากกว่า 50 คน

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ห้องเรียนอัจฉริยะ

3.1.1 ความหมายของห้องเรียนอัจฉริยะ

การพัฒนาระบบการศึกษาให้มีคุณภาพทัดเทียมมาตรฐานสากล สนับสนุนให้เกิดนวัตกรรมและเพิ่มโอกาสทางการศึกษาและวิธีการเรียนรู้ใหม่ ๆ เป็นจุดมุ่งหมายที่สำคัญของแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (พ.ศ.2560 – 2564) ในยุคที่วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาศักยภาพของมนุษย์ การนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาจึงมีความสำคัญมาก การเรียนรู้ที่เราคุ้นเคยได้เปลี่ยนแปลงไปโดยมีความต้องการจากนักเรียน ความพร้อมใช้งานของเนื้อหาออนไลน์ และการปฏิรูปหลักสูตร

กรอบแนวความคิดสมาร์ตเลิร์นนิง (Smart Learning) มีความสำคัญในการขับเคลื่อนการใช้เทคโนโลยีในวงการศึกษาอย่างกว้างขวางและรวดเร็ว สร้างโอกาสและความท้าทายใหม่ ๆ สำหรับโรงเรียนและครูผู้สอนในการเปลี่ยนแปลงวิธีการเรียนรู้ทั้งในและนอกห้องเรียน "ห้องเรียนอัจฉริยะ" หรือ Smart Classroom อาจมีชื่อเรียกอื่น เช่น Electronic Classroom, e-Learning Classroom, Virtual Classroom, Collaborative Classroom, Computer Classroom หรือ ICT Room ซึ่งมีประโยชน์ใช้สอยทางการเรียนในลักษณะเดียวกัน ห้องเรียนอัจฉริยะ [10] หมายถึง ห้องเรียนที่ประกอบด้วยมิติในด้านต่าง ๆ ดังนี้

1) S: Showing ความสามารถในการนำเสนอข้อมูลการเรียนการสอนผ่านสื่อเทคโนโลยี (Cognitive Characteristic)

2) M: Manageable ความสามารถในการบริหารจัดการสื่อวัสดุอุปกรณ์ ระบบการสอน แหล่งทรัพยากร และสภาพแวดล้อมของห้องเรียน

3) A: Accessible ความสามารถในการเข้าถึงแหล่งข้อมูลทางการเรียนรู้ผ่านสื่อต่าง ๆ

4) R: Real-time Interactive ความสามารถในการสร้างประสบการณ์การเรียนรู้และการสอนเชิงโต้ตอบผ่านสื่อเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์

5) T: Testing ความสามารถในการทดสอบและตรวจสอบคุณภาพการเรียนรู้และพฤติกรรมการเรียน

นอกจากนี้ ห้องเรียนอัจฉริยะ (Smart Classroom) [11] คือ ห้องเรียนที่ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 สิ่ง ได้แก่ ผู้สอน ผู้เรียน และสื่อ เช่น คอมพิวเตอร์ โน้ตบุ๊ก แท็บเล็ต สมาร์ทโฟน สมาร์ทบอร์ด เครื่องฉายโปรเจกเตอร์ อินเทอร์เน็ต และระบบเครือข่ายไร้สาย โดยมีการจัดสภาพแวดล้อมการเรียนรู้ (Learning Environment) อย่างเหมาะสม ทั้งสถานที่ตั้งห้องเรียน โต๊ะเก้าอี้ ระบบไฟฟ้า เครื่องเสียง และระบบปรับอากาศ เพื่อมีส่วนร่วมในกิจกรรมการเรียนรู้ต่าง ๆ ในห้องเรียน ไม่ว่าจะเป็นกิจกรรมกลุ่มย่อย การบรรยาย โครงงานนำเสนอ หน้าชั้นเรียน เพื่อให้ผู้เรียนได้พัฒนาทักษะการใช้เทคโนโลยีเพื่อการเรียนรู้ และทักษะการเรียนรู้จากการสืบค้นได้ด้วยตนเอง ตอบสนองความต้องการการเรียนรู้เป็นรายบุคคลและการมีส่วนร่วมในการเรียนของผู้เรียนและผู้สอนได้อย่างเต็มศักยภาพ

จากที่กล่าวมาสรุปได้ว่า ห้องเรียนอัจฉริยะ (Smart Classroom) หมายถึง ห้องเรียนหรือแหล่งการเรียนรู้ที่จัดทำขึ้นในลักษณะพิเศษเฉพาะที่แตกต่างจากห้องเรียนทั่วไป เพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ทางการเรียนการสอน การฝึกอบรม และการฝึกทักษะความรู้ในด้านต่าง ๆ โดยเน้นการสร้างปฏิสัมพันธ์ทางการเรียนร่วมกันผ่านเทคโนโลยีที่หลากหลาย ทั้งสื่อภาพและเสียง ทำให้เกิดการเรียนรู้ทั้งในระบบชั้นเรียนปกติและการเรียนทางไกลอย่างมีประสิทธิภาพ

3.1.2 ลักษณะของห้องเรียนอัจฉริยะ

คุณลักษณะสำคัญของการเรียนการสอนโดยห้องเรียนอัจฉริยะ คือ การจัดสร้างระบบการมีส่วนร่วมทางการเรียน (Collaborative Learning) ลักษณะของห้องเรียนอัจฉริยะ [12] คือ ห้องเรียนที่ก่อให้เกิดการมีส่วนร่วมทางการเรียน ดังนี้

1) การแลกเปลี่ยนความรู้ร่วมกัน (Sharing Knowledge): ประสบการณ์ทางการเรียนรู้ที่เกิดขึ้นในชั้นเรียนเป็นปรากฏการณ์ระหว่างครูกับนักเรียน โดยการกำหนดและสร้างองค์ความรู้เพื่อเพิ่มประสบการณ์ความสามารถทางภาษา ความรู้ และกิจกรรมการเรียนรู้ในสถานการณ์ที่เกิดขึ้น

2) การแลกเปลี่ยนในเชิงทักษะความสามารถ (Sharing Ability): ชั้นเรียนแบบร่วมมือจะทำให้ผู้เรียนสามารถใช้ความรู้ ทักษะ และความสามารถของตนเองได้อย่างเต็มศักยภาพตามระดับความสามารถของแต่ละคน

3) การเสริมสร้างทักษะการคิดวิเคราะห์ (Mediation): ในชั้นเรียนแบบร่วมมือ ครูจะเป็นผู้ที่มีบทบาทสำคัญในการสร้างสถานการณ์ทางการเรียนให้กับผู้เรียน เพื่อให้เกิดกระบวนการและทักษะในการคิดวิเคราะห์สามารถเชื่อมโยงองค์ความรู้ได้อย่างบูรณาการ

4) การสนองต่อการเรียนรู้ที่ผู้เรียนมีความแตกต่างกัน (Heterogeneity): ชั้นเรียนแบบร่วมมือจะเกิดการแลกเปลี่ยนประสบการณ์ทางการเรียนภายในกลุ่มร่วมกันจากหลากหลายประสบการณ์ ซึ่งจะสนองต่อความแตกต่างระหว่างบุคคลของผู้เรียนแต่ละคน

ผู้วิจัยจากมหาวิทยาลัย Ritsumeikan Asia Pacific University ประเทศญี่ปุ่น [13] ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับห้องเรียนอัจฉริยะ โดยกำหนดการออกแบบสถาปัตยกรรมการสื่อสารของห้องเรียนอัจฉริยะเป็น 4 ลักษณะ ดังนี้

1) โครงสร้างแบบห้องเรียนอิสระ (Single Classroom Architectures): ห้องเรียนที่มีลักษณะเป็นอิสระไม่เชื่อมโยงกับห้องเรียนอื่น ๆ เน้นการเรียนรู้และการนำเสนอในห้อง โดยมีการใช้เทคโนโลยีช่วยสร้างบรรยากาศ

การเรียนรู้ให้สนุกสนาน ผู้เรียนจะใช้คอมพิวเตอร์พกพาเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตในการค้นหาและนำเสนอ หรือใช้กล้องถ่ายภาพ มีกระดานอัจฉริยะหรือส്മาร์ทบอร์ด และฉายภาพขนาดใหญ่

2) โครงสร้างแบบห้องเรียนแผ่ขยาย (Scattered Classroom Architectures): การกระจายเนื้อหาไปยังที่ต่าง ๆ หรือที่อยู่อาศัยของผู้เรียน โดยการถ่ายทอดการเรียนการสอนจากห้องเรียนจริงไปยังเครือข่ายอินเทอร์เน็ต หรือการนำเนื้อหาไปใส่ในระบบเพื่อให้ผู้เรียนสามารถเรียนรู้ด้วยตนเองได้จากภายนอกห้องเรียน ผ่านระบบอินเทอร์เน็ต และห้องเรียนเสมือน

3) โครงสร้างแบบคู่ขนานสองห้อง (Two-Classes Architectures): การเชื่อมโยงการเรียนระหว่างห้องเรียนหลักและห้องเรียนทางไกล โดยการจัดกิจกรรมการเรียนการสอนร่วมกัน และถ่ายทอดประสบการณ์การเรียนไปยังห้องเรียนทางไกลเพื่อให้ผู้เรียนทั้งสองห้องได้เรียนรู้ประสบการณ์เดียวกัน

4) โครงสร้างแบบหลายห้องร่วมกัน (Multiple Classroom Architectures): การถ่ายทอดการเรียนการสอนไปยังห้องเรียนอื่น ๆ หลายห้อง ทำให้เกิดการเรียนการสอนร่วมกัน

จากที่กล่าวมาสรุปได้ว่า ห้องเรียนอัจฉริยะจะประกอบด้วยโครงสร้างทั้งหมด 4 โครงสร้างและจะต้องให้เกิดการแลกเปลี่ยนความรู้ร่วมกัน ความสามารถ และสามารถตอบสนองผู้เรียนที่ต่างกัน

3.2 การนำระบบห้องเรียนอัจฉริยะมาใช้ในการเรียนการสอน

3.2.1 แนวคิดการนำระบบห้องเรียนอัจฉริยะมาใช้ในการเรียนการสอน

สำหรับแนวคิดการนำห้องเรียนอัจฉริยะมาใช้ในการศึกษาและการจัดการเรียนการสอนยุคปัจจุบันมีความจำเป็น ดังนี้

1) การใช้ศักยภาพของเทคโนโลยีและการศึกษา: การเรียนการสอนในยุคใหม่ต้องปรับตัวตามความก้าวหน้าของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อความเหมาะสม

2) การปรับเปลี่ยนกระบวนการทัศน์ทางการเรียน: การเปลี่ยนรูปแบบการเรียนจากการบรรยายไปเป็นรูปแบบใหม่ เช่น การเรียนโดยใช้ปัญหาเป็นฐาน (PBL) การเรียนการสอนแบบเพื่อนช่วยเพื่อน และการเรียนการสอนแบบโครงการ

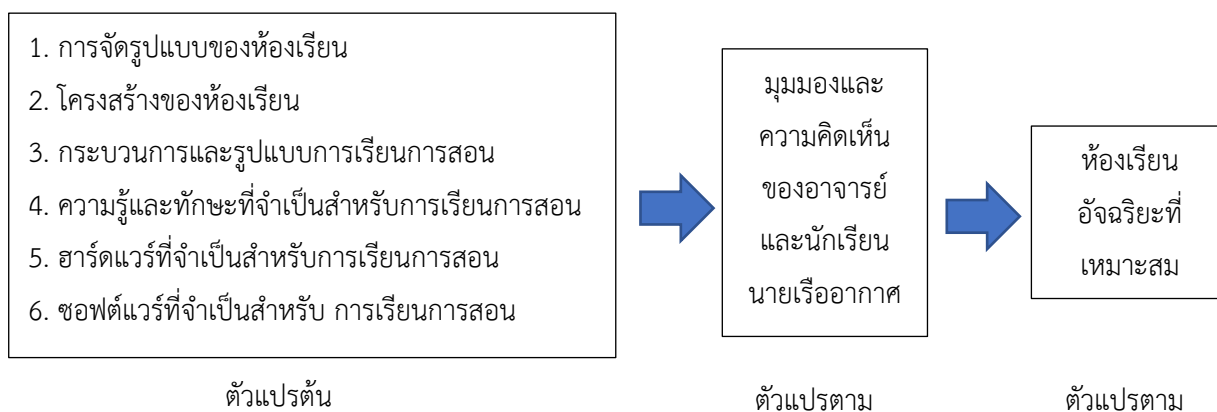
3) การจำแนกคัดกรองการใช้สื่อดิจิทัลระหว่างครูกับนักเรียน: ห้องเรียนอัจฉริยะช่วยฝึกฝนทักษะการใช้สื่อเทคโนโลยีและสร้างบรรยากาศการเรียนรู้ที่ผ่อนคลาย (Edutainment)

4) การใช้เทคโนโลยีในชั้นเรียนเชิงปฏิสัมพันธ์: การใช้กระดานไฟฟ้าเชิงปฏิสัมพันธ์ ระบบตอบสนองเชิงปฏิสัมพันธ์ และระบบการจัดเก็บข้อมูลเพื่อการนำเสนอในการจัดการเรียนการสอน

ผู้วิจัยได้นำระบบห้องเรียนอัจฉริยะมาใช้ในการเรียนการสอนอย่างกว้างขวาง เช่น 1) ห้องเรียนอัจฉริยะส่งเสริมการเรียนรู้ที่สร้างสรรค์และสร้างนวัตกรรมทางการศึกษา พัฒนาทักษะการทำงานร่วมกับผู้อื่น (Collaboration) การคิดวิเคราะห์ (Critical thinking) การสื่อสาร (Communication) และความคิดสร้างสรรค์ (Creativity) ซึ่งเป็นทักษะสำคัญในศตวรรษที่ 21 2) ระบบการศึกษาไทยพัฒนาจากยุค 1.0 ที่เน้นการบรรยายและท่องจำ ไปสู่ยุค 4.0 ที่เน้นการสร้างนวัตกรรมผ่านการเรียนรู้แบบโครงงาน (Project-based Learning) และการลงมือปฏิบัติ (Learning by Doing) โดยใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ 3) ห้องเรียนอัจฉริยะเป็นนวัตกรรมในการจัดการเรียนรู้ในยุคประเทศไทย 4.0 เน้นการใช้เทคโนโลยีเพื่อสร้างสรรค์การเรียนรู้แบบผ่อนคลายและเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้ และ 4) การนำเทคโนโลยีมาใช้ในการเรียนการสอนทำให้การเรียนรู้เป็นศูนย์กลาง ผู้สอนเป็นผู้แนะนำ และหลักสูตรมีกระบวนการเพื่อส่งเสริมการเรียนรู้ร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพในศตวรรษที่ 21 [14-17]

ดังนั้น ห้องเรียนอัจฉริยะเป็นห้องเรียนหรือแหล่งเรียนรู้ที่จัดทำขึ้นเป็นพิเศษเพื่อเสริมสร้างประสบการณ์การเรียนการสอนโดยใช้นวัตกรรมด้านเทคโนโลยีการเรียนการสอนที่เหมาะสมกับการจัดการศึกษาในศตวรรษที่ 21 โดยเน้นการพัฒนาทักษะการคิดวิเคราะห์ สร้างสรรค์ แก้ปัญหา และการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร

3.3 กรอบแนวคิดในการวิจัย



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ อาจารย์โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชจำนวน 83 คน และ นักเรียนนายเรืออากาศ 250 คน

กลุ่มตัวอย่าง คือ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ อาจารย์ โรงเรียนนายเรืออากาศ นวมินทกษัตริยาธิราช ที่สุ่มโดยใช้ขนาดตัวอย่างตามสูตรคำนวณของทาโร่ ยามาเน่ (Taro Yamane) ที่มีความคลาดเคลื่อนที่ 0.08 เพราะเนื่องจากนักเรียนนายเรืออากาศเป็นนักเรียนที่ค่อนข้างอยู่ด้วยกันเป็นประจำและอยู่ด้วยกันมานาน ดังนั้นแล้วจะได้ตัวอย่างเป็นอาจารย์ จำนวน 69 คน และนักเรียนนายเรืออากาศ จำนวน 112 คน โดยวิธีการ สุ่มตัวอย่างแบบอย่างง่าย (Simple Random Sampling)

4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือ แบบสอบถามและแบบสัมภาษณ์ซึ่งประกอบด้วยคำถามปลายเปิดและคำถามปลายปิด เพื่อสอบถามความคิดเห็นของอาจารย์ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช และ นักเรียนนายเรืออากาศที่มีต่อการจัดการเรียนการสอนในระบบห้องเรียนอัจฉริยะ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) แบบสอบถามความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ ที่มีต่อการจัดการเรียนการสอนในระบบห้องเรียนอัจฉริยะซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไป ซึ่งเป็นคำถามแบบปลายปิดแบบให้เลือกตอบ ส่วนที่ 2 ความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศที่มีต่อรูปแบบและการจัดการเรียนการสอนระบบห้องเรียนอัจฉริยะ ซึ่งเป็นคำถามแบบปลายปิดแบบให้เลือกตอบ จำนวน 5 ข้อ ได้แก่ 1) เรื่องรูปแบบของห้องเรียน 2) โครงสร้างห้องเรียน 3) รูปแบบการเรียนการสอน 4) ทักษะจำเป็น และ 5) เรื่อง Hardware และ Software และส่วนที่ 3 การจัดการเรียนการสอนระบบห้องเรียนอัจฉริยะและข้อเสนอแนะ ซึ่งเป็นคำถามปลายเปิดจำนวน

2) แบบสัมภาษณ์ที่ใช้ในการสนทนากลุ่มประกอบด้วยคำถามปลายเปิดและคำถาม ปลายปิด เพื่อสอบถามความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศในแต่ละสาขาเพิ่มเติมหลังจากการใช้แบบสอบถามในการสำรวจความคิดเห็น โดยแบบสัมภาษณ์ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศที่มีต่อการจัดการเรียนการสอนในระบบห้องเรียนอัจฉริยะ และส่วนที่ 2 ความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศในแต่ละสาขาวิชา โดยแบ่งออกเป็น 6 สาขาวิชา ได้แก่ วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ คอมพิวเตอร์ สังคมศาสตร์ และมนุษยศาสตร์

4.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1) ผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการขอความร่วมมือจากอาจารย์ และนักเรียนนายเรืออากาศในการตอบแบบสอบถามออนไลน์เพื่อให้ได้ข้อมูลจากอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศในแต่ละสาขาวิชา โดยได้รับแบบสอบถามตอบกลับมาจากอาจารย์จำนวน 69 ชุด และจากนักเรียนนายเรืออากาศ จำนวน 112 ชุด

2) ผู้วิจัยได้ทำการสรุปความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศแยกตามสาขาวิชาและนำผลสำรวจที่ได้มาประกอบการทำแบบสัมภาษณ์ในการสนทนากลุ่ม

3) จัดทำแบบสัมภาษณ์ที่ใช้ในการสนทนากลุ่ม ซึ่งประกอบด้วยคำถามปลายเปิดและคำถามปลายปิด

4) ผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสนทนากลุ่มเพื่อให้ได้ความคิดเห็นเพิ่มเติมจากอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศในแต่ละสาขาวิชา โดยมีอาจารย์ที่เข้าร่วมการสนทนากลุ่มจำนวน 20 คน ซึ่งมาจากสาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ 3 คน สาขาวิทยาศาสตร์ 2 คน สาขาคณิตศาสตร์ 3 คน สาขาคอมพิวเตอร์ 3 คน สาขาสังคมศาสตร์ 5 คน และสาขามนุษยศาสตร์ 4 คน และนักเรียนนายเรืออากาศจำนวน 15 คน

4.4 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

1) การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ โดยการสรุปความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียน นายเรืออากาศที่มีต่อการจัดการเรียนการสอนในระบบห้องเรียนอัจฉริยะ

2) การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ โดยการวิเคราะห์การจัดรูปแบบของห้องเรียน โครงสร้างของห้องเรียน กระบวนการและรูปแบบการเรียนการสอน ความรู้และทักษะที่จำเป็นสำหรับการเรียนการสอน ฮาร์ดแวร์ที่จำเป็นสำหรับการเรียนการสอน และซอฟต์แวร์ที่จำเป็นสำหรับการเรียนการสอนด้วยการวิเคราะห์ค่าร้อยละ (Percentage)

5. ผลการวิจัย

5.1 ข้อมูลทั่วไป

5.1.1 ข้อมูลทั่วไปของอาจารย์นายเรืออากาศ

การสำรวจความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่างที่มีต่อการออกแบบระบบห้องเรียนอัจฉริยะครั้งนี้รวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามจากอาจารย์จำนวน 67 ชุด พบว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่อยู่ในชั้นยศ น.อ.พิเศษ – น.อ. คิดเป็นร้อยละ 43.48 และโดยกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่อยู่ในสาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์คิดเป็นร้อยละ 43.36 ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำนวนและร้อยละของอาจารย์ในตัวอย่าง จำแนกตามลักษณะส่วนบุคคล

ข้อมูล	รายการ	จำนวน	ร้อยละ
ชั้นยศ	น.อ.พิเศษ – น.อ.	30	43.48
	น.ท. - น.ต.	19	27.54
	ร.อ. - ร.ต.	20	28.99
สาขาวิชา	วิศวกรรมศาสตร์	32	43.36
	วิทยาศาสตร์	11	15.94
	คณิตศาสตร์	4	5.80
	คอมพิวเตอร์	13	18.84
	สังคมศาสตร์	5	7.25
	มนุษยศาสตร์	4	5.80
รวม		69	100.0

5.1.2 ข้อมูลทั่วไปของนักเรียนนายเรืออากาศ

การสำรวจความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่างที่มีต่อการออกแบบระบบห้องเรียนอัจฉริยะครั้งนี้รวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามจากนักเรียนนายเรืออากาศจำนวน 112 ชุด พบว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่เป็น นักเรียนนายเรืออากาศชั้นปีที่ 5 คิดเป็นร้อยละ 30.4 โดยส่วนใหญ่มาจากสาขาวิชาคอมพิวเตอร์ คิดเป็นร้อยละ 23.2 ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการสำรวจความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ ในเรื่องรูปแบบของห้องเรียน

ข้อมูล	รายการ	จำนวน	ร้อยละ
ชั้นปี	ชั้นปีที่ 2	32	28.6
	ชั้นปีที่ 3	17	15.2
	ชั้นปีที่ 4	29	25.9
	ชั้นปีที่ 5	34	30.4
สาขาวิชา	วิศวกรรมอากาศยาน	15	13.4
	วิศวกรรมเครื่องกล	16	14.3
	วิศวกรรมไฟฟ้า	22	19.6
	วิศวกรรมโยธา	11	9.8
	วิศวกรรมอุตสาหการ	12	10.7
	คอมพิวเตอร์	26	23.2
	วัสดุศาสตร์	10	8.9
รวม		112	100.0

5.2 ผลการสำรวจความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ ในเรื่องรูปแบบของห้องเรียน

เรื่องรูปแบบของห้องเรียนขนาดเล็กส่วนใหญ่อาจารย์จะเป็นไปทางเดียวกันคือ จัดวางเป็นกลุ่ม แต่จะมีแค่สังคมศาสตร์ที่คิดว่าการจัดรูปแบบห้องเรียนไม่ส่งผลต่อการเรียน ส่วนห้องเรียนขนาดใหญ่ อาจารย์ส่วนใหญ่ต้องการเป็นห้องเรียนแบบขั้นบันได มีเพียงแค่ อาจารย์คณิตศาสตร์ร้อยละ 60 และมนุษยศาสตร์ร้อยละ 50 ที่คิดว่ารูปแบบของห้องเรียนไม่ส่งผลต่อการเรียน และ จัดวางเป็นกลุ่ม ตามลำดับ

ในส่วนของ นักเรียนนายเรืออากาศ เกือบทุกสาขาวิชาอยากจะใช้รูปแบบห้องเรียนแบบจัดวางเป็นกลุ่ม แต่มีเพียงนักเรียนนายเรืออากาศสาขาวิชาคอมพิวเตอร์ร้อยละ 42 ที่ต้องการรูปแบบห้องเรียนแบบขั้นบันไดเท่านั้น ส่วนห้องเรียนขนาดใหญ่ นักเรียนนายเรืออากาศทุกสาขาวิชามีความต้องการรูปแบบห้องเรียนแบบขั้นบันได ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการสำรวจความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ ในเรื่องรูปแบบของห้องเรียน

หัวข้อ	รูปแบบห้องเรียน			
	อาจารย์		นักเรียนนายเรืออากาศ	
	เล็ก	ใหญ่	เล็ก	ใหญ่
วิศวกรรมศาสตร์	จัดวางเป็นกลุ่ม (53.1)	ชั้นบันได (62.5)	จัดวางเป็นกลุ่ม (52.7)	ชั้นบันได (61.6)
วิทยาศาสตร์	จัดวางเป็นกลุ่ม (63.6)	ชั้นบันได (90.9)	จัดวางเป็นกลุ่ม (57.1)	ชั้นบันได (52.7)
คณิตศาสตร์	จัดวางเป็นกลุ่ม (50.0)	ไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษา (50.0)	จัดวางเป็นกลุ่ม (42.0)	ชั้นบันได (60.7)
คอมพิวเตอร์	จัดวางเป็นกลุ่ม (61.5)	ชั้นบันได (76.9)	ชั้นบันได (42.0)	ชั้นบันได (54.5)
สังคมศาสตร์	ไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษา (60.0)	ชั้นบันได (60.0)	จัดวางเป็นกลุ่ม (64.3)	ชั้นบันได (49.1)
มนุษยศาสตร์	จัดวางเป็นกลุ่ม (100)	จัดวางเป็นกลุ่ม (100)	จัดวางเป็นกลุ่ม (60.7)	ชั้นบันได (41.1)

5.3 ผลการสำรวจความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ ในโครงสร้างห้องเรียน

ในเรื่องโครงสร้างห้องเรียนขนาดเล็กส่วนใหญ่อาจารย์จะเป็นไปทางเดียวกันคือ ห้องเรียนอิสระ แต่จะมีแค่อาจารย์ด้านคณิตศาสตร์ร้อยละ 50 ที่คิดว่าโครงสร้างห้องเรียนขนาดเล็กไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษา ส่วนห้องเรียนขนาดใหญ่ อาจารย์วิศวกรรมศาสตร์วิทยาศาสตร์ และ คอมพิวเตอร์ ต้องการโครงสร้างห้องเรียนเป็นหลายห้องร่วมกัน แต่สังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์ กลับต้องการโครงสร้างห้องเรียนที่เป็ห้องเรียนอิสระ และ อาจารย์ด้านคณิตศาสตร์ร้อยละ 75 ก็ยังคิดว่าโครงสร้างห้องเรียนไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษา

ในส่วนของ นักเรียนนายเรืออากาศ โครงสร้างห้องเรียนขนาดเล็กและขนาดใหญ่ นักเรียนนายเรืออากาศ ทุกสาขาวิชาอยากจะใช้โครงสร้างห้องเรียนแบบห้องเรียนอิสระ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการสำรวจความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ ในโครงสร้างห้องเรียน

หัวข้อ	โครงสร้างห้องเรียน			
	อาจารย์		นักเรียนนายเรืออากาศ	
	เล็ก	ใหญ่	เล็ก	ใหญ่
วิศวกรรมศาสตร์	ห้องเรียนอิสระ (37.5)	หลายห้องร่วมกัน (37.5)	ห้องเรียนอิสระ (56.3)	ห้องเรียนอิสระ (45.5)
วิทยาศาสตร์	ห้องเรียนอิสระ (63.6)	หลายห้องร่วมกัน (72.7)	ห้องเรียนอิสระ (47.3)	ห้องเรียนอิสระ (41.1)
คณิตศาสตร์	ไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษา (50.0)	ไม่ส่งผลกระทบต่อการศึกษา (75.0)	ห้องเรียนอิสระ (55.4)	ห้องเรียนอิสระ (52.7)
คอมพิวเตอร์	ห้องเรียนอิสระ (61.5)	หลายห้องร่วมกัน (30.8)	ห้องเรียนอิสระ (48.2)	ห้องเรียนอิสระ (42.9)
สังคมศาสตร์	ห้องเรียนอิสระ (80.0)	ห้องเรียนอิสระ (20.0)	ห้องเรียนอิสระ (48.2)	ห้องเรียนอิสระ (42.0)
มนุษยศาสตร์	ห้องเรียนอิสระ (50.0)	ห้องเรียนอิสระ (50.0)	ห้องเรียนอิสระ (47.3)	ห้องเรียนอิสระ (41.1)

5.4 ผลการสำรวจความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ ในรูปแบบการเรียนการสอนและทักษะจำเป็น

ในเรื่องรูปแบบการเรียนการสอนอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ เกือบทุกสาขาวิชาจะเป็นไปทางเดียวกันคือ การเรียนแบบผสมผสาน แต่จะมีแค่ นักเรียนนายเรืออากาศ สาขาวิชาสังคมศาสตร์ร้อยละ 40.2 ที่อยากจะเรียนแบบเน้นผู้เรียนเป็นศูนย์กลาง

ในส่วนทักษะจำเป็นอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ เกือบทุกสาขาวิชา ก็ยังเห็นไปทิศทางเดียวกันคือ ต้องการมีทักษะการใช้เทคโนโลยี แต่ก็จะมีอาจารย์ทั้งหมดและนักเรียนนายเรืออากาศ ร้อยละ 69.6 ในสาขาวิชา มนุษยศาสตร์ ที่ต้องการทักษะด้านการสื่อสารแทน ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการสำรวจความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ ในรูปแบบการเรียนการสอนและทักษะจำเป็น

	รูปแบบการเรียนการสอน		ทักษะจำเป็น	
	อาจารย์	นักเรียนนายเรืออากาศ	อาจารย์	นักเรียนนายเรืออากาศ
วิศวกรรมศาสตร์	ผสมผสาน (78.1)	ผสมผสาน (45.5)	การใช้เทคโนโลยี (90.6)	การใช้เทคโนโลยี (94.7)
วิทยาศาสตร์	ผสมผสาน (81.8)	ผสมผสาน (37.5)	การใช้เทคโนโลยี (100)	การคิดสร้างสรรค์ (100)
คณิตศาสตร์	ผสมผสาน (50.0)	ผสมผสาน (34.8)	การใช้เทคโนโลยี (100)	การใช้เทคโนโลยี (69.6)
คอมพิวเตอร์	ผสมผสาน (84.6)	ผสมผสาน (38.4)	การใช้เทคโนโลยี (100)	การใช้เทคโนโลยี (88.5)
สังคมศาสตร์	ผสมผสาน (80.0)	เน้นผู้เรียนเป็นศูนย์กลาง (40.2)	การใช้เทคโนโลยี (100)	การใช้เทคโนโลยี (69.6)
มนุษยศาสตร์	ผสมผสาน (84.6)	ผสมผสาน (38.4)	ด้านการสื่อสาร (100.0)	ด้านการสื่อสาร (69.6)

5.5 ผลการสำรวจความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ ในเรื่อง Hardware และ Software

ในเรื่อง Hardware อาจารย์เกือบทุกสาขาวิชาจะต้องการอย่างเดียวกันคือ อินเทอร์เน็ตที่ทั่วถึง แต่จะมีแค่อาจารย์ในสาขาวิชา สาขาคณิตศาสตร์ และ มนุษยศาสตร์ที่อยากจะได้แตกต่างออกไปนั่นคือ ระบบสื่อสารระหว่างอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ นอกห้องเรียน และ ลำโพงขยายเสียง ตามลำดับ ในส่วนของ นักเรียนนายเรืออากาศ เกือบทุกสาขาวิชาจะมีการต้องการด้าน Hardware ที่แตกต่างกันแต่จะมีเพียงแค่ นักเรียนนายเรืออากาศ ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และมนุษยศาสตร์ ที่มีความต้องการเหมือนกันคือ ไมโครโฟน

ในเรื่อง Software อาจารย์ในสาขาวิชามีความต้องการที่หลากหลายแต่จะมีอาจารย์ในสาขาวิชา วิศวกรรมศาสตร์ และ คณิตศาสตร์ มีความต้องการในเรื่องโปรแกรมเฉพาะในการเรียน แต่ กลับกันอาจารย์ในสาขาวิชาคอมพิวเตอร์ และ สังคมศาสตร์ที่ต้องการเพียงแค่โปรแกรมสำหรับเรียนการสอน และในส่วนของนักเรียนนายเรืออากาศ ก็มีความต้องการที่หลากหลายเช่นเดียวกันแต่จะมีนักเรียนนายเรืออากาศ สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และ คณิตศาสตร์ ที่มีความคิดเห็นเหมือนกันคือต้องการโปรแกรมเฉพาะในการเรียน และ นักเรียนนายเรืออากาศ สาขาวิชา คอมพิวเตอร์ และ มนุษยศาสตร์ ต้องการเพียงโปรแกรมสำหรับเรียนการสอน ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการสำรวจความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ ในเรื่องรูปแบบของห้องเรียน

	Hardware		Software	
	อาจารย์	นักเรียนนายเรืออากาศ	อาจารย์	นักเรียนนายเรืออากาศ
วิศวกรรมศาสตร์	อินเทอร์เน็ตที่ทั่วถึง (87.5)	Tablet/lpad (84.2)	โปรแกรมเฉพาะในการเรียน (87.5)	โปรแกรมเฉพาะในการเรียน (85.5)
วิทยาศาสตร์	อินเทอร์เน็ตที่ทั่วถึง (100)	ไมโครโฟน (90.0)	โปรแกรมสำหรับเขียนที่หน้าจอ (100)	โปรแกรมสำหรับเขียนที่หน้าจอ (100)
คณิตศาสตร์	ระบบสื่อสารอาจารย์และนักเรียนนอกห้องเรียน (100)	จอแสดงภาพแบบสัมผัส (46.4)	โปรแกรมเฉพาะในการเรียน (75.0)	โปรแกรมเฉพาะในการเรียน (67.0)
คอมพิวเตอร์	อินเทอร์เน็ตที่ทั่วถึง (100)	อินเทอร์เน็ตที่ทั่วถึง (80.8)	โปรแกรมสำหรับเรียน การเรียน (92.3)	โปรแกรมสำหรับเรียน การเรียน (100)
สังคมศาสตร์	อินเทอร์เน็ตที่ทั่วถึง (100)	เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา (40.2)	โปรแกรมสำหรับเรียน การเรียน (80.0)	โปรแกรมเชื่อมต่อผู้ให้บริการ (69.6)
มนุษยศาสตร์	ไมโครโฟน (100)	ไมโครโฟน (41.1)	โปรแกรมเชื่อมต่อผู้ให้บริการ (100)	โปรแกรมสำหรับเรียน การเรียน (66.1)

6. สรุป

จากผลการวิจัยพบว่า อาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ รวม 181 คน ซึ่งประกอบด้วยอาจารย์ 69 คน และนักเรียนนายเรืออากาศ 112 คน มีความคิดเห็นไปในทิศทางที่ค่อนข้างสอดคล้องกัน ดังนั้น ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการสำรวจความคิดเห็นของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศเกี่ยวกับรูปแบบและการจัดการเรียนการสอนในระบบห้องเรียนอัจฉริยะ จึงสรุปได้ว่า

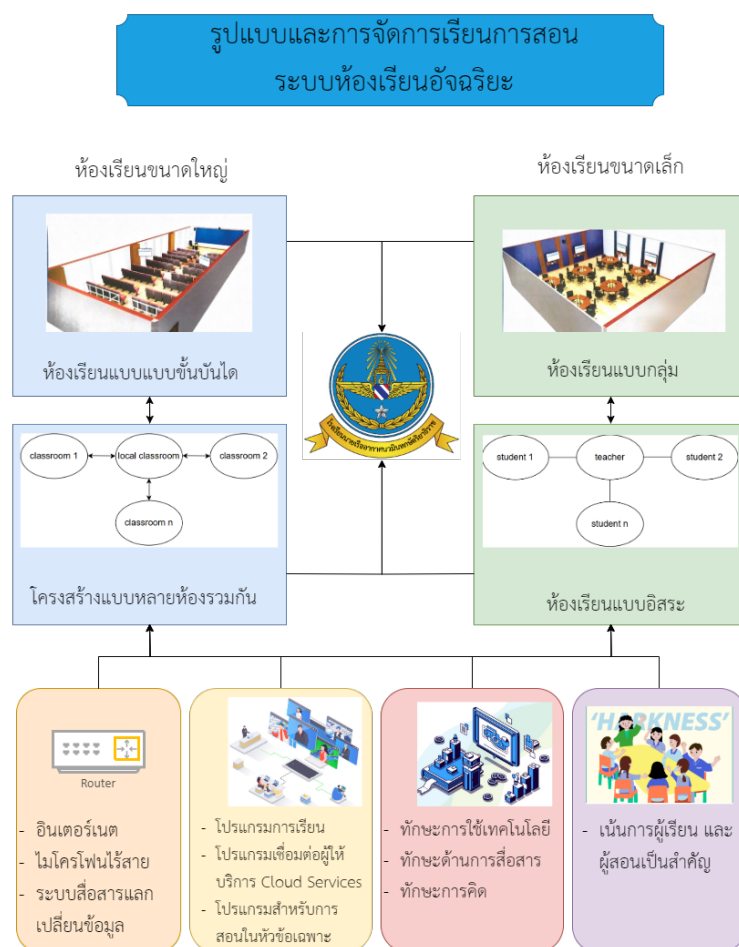
รูปแบบของห้องเรียนอัจฉริยะที่คาดว่าจะช่วยในการพัฒนาการเรียนการสอนของนักเรียนนายเรืออากาศสำหรับรูปแบบห้องเรียนขนาดใหญ่ที่มีนักเรียนนายเรืออากาศตั้งแต่ 50 คนขึ้นไปคือการจัดห้องเรียนแบบชั้นบันได แต่รูปแบบของห้องเรียนที่เหมาะสมสำหรับห้องเรียนขนาดเล็กที่มีนักเรียนนายเรืออากาศน้อยกว่า 50 คน คือ รูปแบบห้องเรียนแบบจัดวางเป็นกลุ่ม แต่จะมีประเด็นที่น่าสนใจคือ อาจารย์สาขาวิชาสังคมศาสตร์ คิดว่ารูปแบบห้องเรียนในห้องเรียนขนาดเล็กไม่ส่งผลต่อการเรียน และ อาจารย์สาขาวิชาคณิตศาสตร์คิดว่ารูปแบบห้องเรียนในห้องเรียนขนาดใหญ่ไม่ส่งผลต่อการเรียน

ในส่วนของการจัดโครงสร้างของห้องเรียนพบว่า การจัดโครงสร้างของห้องเรียนแบบหลายห้องร่วมกันเหมาะสมกับห้องเรียนขนาดใหญ่และการจัดโครงสร้างห้องเรียนแบบห้องเรียนอิสระเหมาะสมกับห้องเรียนขนาดเล็ก แต่ก็จะมีประเด็นที่น่าสนใจอีกเช่นเดียวกันคืออาจารย์สาขาวิชาคณิตศาสตร์มีความคิดเห็นว่า โครงสร้างห้องเรียนไม่ส่งผลต่อการเรียนทั้งห้องเรียนขนาดใหญ่และขนาดเล็ก

สำหรับในเรื่องรูปแบบการเรียนการสอนทั้งอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ เห็นไปในทิศทางเดียวกันคือรูปแบบการเรียนการสอนแบบผสมผสาน แต่ก็จะมีนักเรียนนายเรืออากาศ ที่เรียนวิชาในสาขาสังคมศาสตร์ที่คิดว่ารูปแบบการเรียนการสอนเน้นผู้เรียนเป็นศูนย์กลางสำคัญกว่า ส่วนในเรื่องทักษะจำเป็น อาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ ทุกสาขาวิชากว่าสามสาขาวิชามนุษยศาสตร์ เห็นว่าต้องมีทักษะการใช้เทคโนโลยี แต่สาขาวิชามนุษยศาสตร์คิดว่าต้องมีทักษะด้านการสื่อสาร

ส่วนสุดท้ายในด้าน Hardware และ Software ทั้งอาจารย์ และ นักเรียนนายเรืออากาศ ค่อนข้างมีความเห็นที่หลากหลาย แต่ก็จะมีบางส่วนที่ทั้งอาจารย์ และ นักเรียนนายเรืออากาศ ได้มีความเห็นตรงกันอยู่ ในด้านของ Hardware อาจารย์ส่วนใหญ่และ นักเรียนนายเรืออากาศ บางสาขาที่ต้องการเครือข่ายอินเทอร์เน็ตที่ทั่วถึง และ ไมโครโฟนไร้สาย แต่นอกจากนี้ประเด็นที่น่าสนใจในเรื่องอาจารย์สาขาวิชา คณิตศาสตร์ที่ต้องการระบบสื่อสารระหว่างอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ นอกห้องเรียนด้วย ในด้าน Software อาจารย์และ นักเรียนนายเรืออากาศ ส่วนใหญ่ต้องการ ได้แก่ โปรแกรมเฉพาะในการเรียน และ โปรแกรมสำหรับเรียนการเรียน นอกจากนี้ยังมี อาจารย์ในสาขาวิชา มนุษยศาสตร์ และ นักเรียนนายเรืออากาศ ที่ได้เรียนสาขาวิชาสังคมศาสตร์ ต้องการโปรแกรมเชื่อมต่อผู้ให้บริการ Cloud Services

ดังนั้นแล้ววัตถุประสงค์ข้อที่ 2 เพื่อวิเคราะห์และออกแบบระบบห้องเรียนอัจฉริยะสำหรับการเรียนการสอนเพื่อพัฒนาศักยภาพของนักเรียนนายเรืออากาศ ผู้วิจัยจึงสรุปรูปแบบและการจัดการเรียนการสอนของห้องเรียนอัจฉริยะ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 รูปแบบและการจัดการเรียนการสอนระบบห้องเรียนอัจฉริยะ

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้งาน

1) เนื่องจากความต้องการอุปกรณ์และเครื่องมือในระบบห้องเรียนอัจฉริยะของ แต่ละสาขาวิชามีความแตกต่างกันการจัดหาระบบห้องเรียนอัจฉริยะสำหรับแต่ละสาขาวิชาควรจะมีแตกต่างกัน เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าทั้งในเรื่องของงบประมาณและการใช้งาน

2) การเรียนการสอนในห้องเรียนอัจฉริยะนอกจากจะมีอุปกรณ์สำหรับการเรียน การสอนที่ครบถ้วนแล้ว ควรจัดหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบในการดูแลระบบเพื่อให้สามารถแก้ไขปัญหาได้ตลอดเวลา

3) ควรมีการจัดอบรมเพื่อเตรียมความพร้อมของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศในเรื่องการใช้งานและการดูแลรักษาระบบห้องเรียนอัจฉริยะ

7.2 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย

1) เนื่องจากระบบห้องเรียนอัจฉริยะมีความสำคัญต่อการเรียนการสอนและการวิจัยควรมีการจัดสรรงบประมาณต่อเนื่องในการซ่อมบำรุงและปรับปรุงระบบห้องเรียนอัจฉริยะ เพื่อให้เกิดความต่อเนื่องในการใช้งานและการใช้ประโยชน์ได้จริงของระบบห้องเรียนอัจฉริยะ

2) ควรมีการจัดหาซอฟต์แวร์ลิขสิทธิ์ที่จำเป็นในการเรียนการสอนทุกสาขาวิชา เพื่อให้เกิดการใช้งานระบบห้องเรียนอัจฉริยะอย่างคุ้มค่า และช่วยในการทำวิจัยรวมถึงการเผยแพร่ผลงานวิจัยของอาจารย์และนักเรียนนายเรืออากาศ

3) ควรมีการจัดหน่วยงานและเจ้าหน้าที่ที่พร้อมสำหรับดูแลและแก้ไขปัญหาของระบบห้องเรียนอัจฉริยะได้ตลอดเวลา

4) หลังจากการใช้งานระบบห้องเรียนอัจฉริยะ ควรมีงานวิจัยเพิ่มเติมเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการใช้งาน รวมถึงปัญหาและข้อขัดข้องที่เกิดขึ้นจากการใช้งาน เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการใช้งานระบบห้องเรียนอัจฉริยะ

7.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

1) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการนำระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) รวมถึงเทคโนโลยีโลกเสมือน (AR/VR/MR/XR) มาใช้ในการเรียนการสอนในระบบห้องเรียนอัจฉริยะ

2) ควรมีงานวิจัยเพื่อแสดงถึงความสำคัญของระบบห้องเรียนอัจฉริยะที่มีต่อการเสริมสร้างขีดความสามารถทั้ง 3 มิติ ได้แก่ มิติทางอากาศ (Air Domain) มิติไซเบอร์ (Cyber Domain) และมิติอวกาศ (Space Domain)

3) ควรมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการนำระบบฐานข้อมูล เช่น Big Data หรือ Blockchain มาใช้กับระบบห้องเรียนอัจฉริยะ

4) ควรมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงความปลอดภัยของข้อมูลในการใช้ระบบห้องเรียนอัจฉริยะ ซึ่งเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยทางไซเบอร์ (Cybersecurity)

5) ควรมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ในการใช้งานระบบห้องเรียนอัจฉริยะ ทั้งผู้สอน ผู้เรียนและอุปกรณ์ ว่ามีส่วนสนับสนุนหรือเกี่ยวข้องในการพัฒนาโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชให้เป็น Smart Academy อย่างไร

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] เนาวนิตย์ สงคราม และธนัท สมณคุปต์, *การพัฒนาห้องเรียนอัจฉริยะเสมือนเพื่อส่งเสริมทักษะการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21 ด้านทักษะการเรียนรู้และนวัตกรรมสำหรับผู้เรียนระดับอุดมศึกษา*. สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม, กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2560.
- [2] อีรศักดิ์ สะกล และศิริรัตน์ เพ็ชรแสงศรี, “การศึกษาสภาพปัจจุบันและปัญหาในการจัดการเรียนการสอนวิชาคอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบโดยใช้ห้องเรียนอัจฉริยะของนักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาออกแบบทัศนอุตสาหกรรม คณะศิลปกรรม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์ลำปาง),” *วารสารครุศาสตร์อุตสาหกรรม*, ปีที่ 17, ฉบับที่ 1, หน้า 104-112, มกราคม-เมษายน, 2561.

- [3] อัคร สุวรรณจรัส, “รูปแบบห้องเรียนอัจฉริยะแบบผสมผสาน 4.0 โดยใช้การเรียนรู้ร่วมกันเพื่อส่งเสริมทักษะการคิดเชิงนวัตกรรมของนักศึกษาระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา,” *วารสารอิเล็กทรอนิกส์ Veridian มหาวิทยาลัยศิลปากร*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 4, หน้า 1001-1020, กรกฎาคม – สิงหาคม, 2562.
- [4] พิระศักดิ์ จีวตัน และอภิญญา ลิ้มสุวรรณ, “การศึกษาความคิดเห็นและความพึงพอใจการเรียนการสอนแบบมีส่วนร่วม (Active Learning) ของนักศึกษา และการปรับปรุงพัฒนาห้องเรียนอัจฉริยะ (Smart Classroom) ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี,” *วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, ปีที่ 40, ฉบับที่ 3, หน้า 66-78, พฤษภาคม-มิถุนายน, 2563.
- [5] เชนัญญ์ มิ่งศิริธรรม และประกอบ กรณีกิจ, *การพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับห้องเรียนอัจฉริยะแบบเปิดเพื่อส่งเสริมทักษะการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21 ด้านทักษะสารสนเทศ สื่อและเทคโนโลยีสำหรับผู้เรียนระดับอุดมศึกษา*. สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2560.
- [6] อัญชลี สุวิพัฒน์, วลลภ พัฒนพงศ์ และกฤษณ์ วัฒนารงค์, “การพัฒนารูปแบบเทคโนโลยีเสมือนจริงเชิงปฏิสัมพันธ์สำหรับห้องเรียนอัจฉริยะ,” *วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 15, ฉบับที่ 2, หน้า 42-50, 2564.
- [7] สุภาวดี สีสายุทธ และธนพนธ์ ลิ้มสุวรรณโรจน์, “การเปรียบเทียบผลการศึกษาทางการเรียนวิชาสถิติโดยใช้การใช้ออปพลิเคชัน,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ*, ปีที่ 19, ฉบับที่ 2, หน้า 87-95, มกราคม-มิถุนายน, 2566.
- [8] เยาวทิศา นามคุณ และคณะ, “รูปแบบการจัดการเรียนการสอนห้องเรียนอัจฉริยะสำหรับโรงเรียนที่ขาดแคลนครู,” *วารสารศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 1, หน้า 108-112, มกราคม-เมษายน, 2563.
- [9] สุภาวรรณ ฤกษ์กำลัง, “นวัตกรรมห้องเรียน: การจัดการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21,” *วารสารครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย*, ปีที่ 15, ฉบับที่ 2, หน้า 18-27, กรกฎาคม-ธันวาคม, 2564.
- [10] R. Huang, Y. Hu, J. Yang and G. Xiao, “The Functions of Smart Classroom in Smart Learning Age” [Online]. Available: <http://www.lsl.nic.edu.sg/icce2012/wp-content/uploads/2012/12/C4-3-162.pdf>. (Accessed: January 2014).
- [11] อนุสร หงษ์ขุนทด, “ห้องเรียนอัจฉริยะ (Smart Classroom),” [ออนไลน์]. Available: <https://pitcforteach.blogspot.com/2014/05/smart-classroom.html>. (เข้าถึงเมื่อ: มกราคม 2567).
- [12] S. S. Yau et al., “Smart Classroom: Enhancing Collaborative Learning Using Pervasive Computing Technology,” in *ASEE 2003 Annual Conference and Exposition*, 2003, pp. 13633-13642.
- [13] D. Pishva and G. G. D. Nishantha, “Smart Classrooms for Distance Education and their Adoption to Multiple Classroom Architectures,” *Journal of Networks*, vol. 5, no. 3, pp. 54-64, June 2018.
- [14] M. Bialik and C. Fadel, *Skills for the 21st century: What should students learn?*, Boston: Center for Curriculum Redesign, 2015.

- [15]สุนันท์ สิปาย และไพฑูรย์ สีนลรัตน์, “เปลี่ยนผ่านการศึกษาไทยสู่ การศึกษา 4.0,” *วารสารศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, ปีที่ 24, ฉบับที่ 2, หน้า 13–27, ธันวาคม, 2559.
- [16]วสันต์ เต็งกวน, *ห้องเรียนอัจฉริยะ: เพื่อการศึกษาไทยในยุค 4.0*, มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่, หน้า 173–180, 2561.
- [17]นารีลักษณ์ ศิริวรรณ, “ห้องเรียนอัจฉริยะ (*Smart Classroom*),” [ออนไลน์]. Available: <https://library.parliament.go.th/th/radioscript/rr2565-may1>. (เข้าถึงเมื่อ: มกราคม 2567).

ระบบแจ้งเตือนแสดงผลสภาพอากาศ สำหรับการฝึกนักเรียนนายเรืออากาศ โดยใช้ IoT Weather Alert System for Air Cadet Training Using IoT

เฉลิมขวัญ ศิริพันธุ์^{1*}, สิริวิชญ์ ตันตรา² และ ภูมิพัฒน์ จบกมลศึก³

¹กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

^{2, 3}กองการฝึกบิน โรงเรียนการบิน

Chalermkwan Siripanth^{1*}, Sirawich Tantra² and Poomipat Jobkonsuek³

¹Faculty of Academic, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

^{2, 3}Flight Training Division, Flight Training School

chalermkwan_s@rtaf.mi.th

Received 17 December 2024

Revised 03 March 2025

Accepted 11 March 2025

บทคัดย่อ

จากการสำรวจในช่วงปีการศึกษา 2561 – 2564 พบว่า มีนักเรียนนายเรืออากาศได้รับการบาดเจ็บจากสภาพอากาศร้อนชนิดรุนแรงรวมทั้งสิ้น 13 นาย ทำให้ผู้ควบคุมการฝึกหลักสูตร Commander Ready ประจำปีการศึกษา 2565 ได้ให้ความสำคัญกับการบาดเจ็บจากความร้อนของนักเรียนนายเรืออากาศโดยให้นโยบายว่า “ต้องไม่มีผู้ได้รับบาดเจ็บจากสภาพอากาศร้อนระหว่างการฝึกปรับสภาพนักเรียนเตรียมทหารให้เป็นนักเรียนนายเรืออากาศ” เพื่อที่จะแก้ปัญหาการบาดเจ็บจากความร้อนระหว่างการฝึกนักเรียนนายเรืออากาศ คณะผู้วิจัยเล็งเห็นว่าควรพัฒนาอุปกรณ์ วัดอุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์ ดัชนีความร้อน และความเข้มข้นของฝุ่น ที่สามารถแสดงผลผ่านอินเทอร์เน็ต พร้อมสามารถให้คำแนะนำแจ้งเตือนแก่ผู้รับผิดชอบการฝึก โดยใช้เกณฑ์จาก US. Army Public Health Command (USAPHC) และ สมาคมพิษวิทยาแห่งประเทศไทย การพัฒนาอุปกรณ์สนับสนุนการฝึกโดยใช้ตัวควบคุมชนิด ESP32 ตัวรับรู้วัดอุณหภูมิความชื้นชนิด DHT22 ตัวรับรู้วัดความเข้มข้นฝุ่นชนิด PMS5003 ระบบการแสดงผลแบบออนไลน์ โดยไม่ใช้แม่ข่าย และ การแจ้งเตือนผ่านระบบ Line Notify โดยผลการทดลองใช้จากผู้รับผิดชอบการฝึกและครูฝึก จำนวน 22 นาย ทดสอบใช้งานอุปกรณ์สนับสนุนการฝึกต้นแบบได้รับความพึงพอใจอยู่ที่ร้อยละ 86

คำสำคัญ: ระบบแจ้งเตือนแสดงผลสภาพอากาศ, การบาดเจ็บจากความร้อน, ฝึกนักเรียนนายเรืออากาศ, อุปกรณ์สนับสนุนการฝึก, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Abstract

A survey conducted during the academic years 2018–2021 found that 13 cadets from the Royal Thai Air Force Academy suffered from severe heat-related illnesses. As a result, the supervisor of the Commander Ready course for the academic year 2022 prioritized addressing heat-related injuries among cadets, implementing a policy that stated: *“There must be no heat-related injuries during the training of pre-cadet students transitioning into air cadets.”* To address this issue, the research team recognized the need to develop a device capable of measuring temperature, relative humidity, heat index, and dust concentration. The device should display real-time data via the internet and provide alerts and recommendations to those responsible for training, based on criteria from the U.S. Army Public Health Command (USAPHC) and the Thai Society of Toxicology. The proposed support device was developed using an ESP32 controller, a DHT22 sensor for temperature and humidity, a PMS5003 sensor for dust concentration, an online display system that operates without a central server, and a notification system through Line Notify. Testing by 22 training supervisors and instructors showed a satisfaction rate of 86% for the prototype device.

Keywords: Weather Alert System, Heat-Related Illnesses, Air Cadet Training, Training Support Device, IoT

1. บทนำ

จากวิสัยทัศน์ของกองทัพอากาศ ที่มุ่งสู่การเป็น “กองทัพอากาศชั้นนำในภูมิภาค” ตลอดจนยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (พ.ศ. 2561–2580) ซึ่งในประเด็นยุทธศาสตร์ที่ 2 ได้ให้ความสำคัญกับการ เสริมสร้างสมรรถนะและความพร้อมในการป้องกันประเทศ และ กลยุทธ์ที่ 2.13 ที่มุ่งเน้นการ พัฒนาสมรรถนะและคุณภาพชีวิตของกำลังพล [1, 2] นอกจากนี้ โรงพยาบาลโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช มีภารกิจหลักในการให้บริการรักษาพยาบาล ควบคู่ไปกับการให้ความรู้และคำแนะนำในการป้องกันโรคและอาการบาดเจ็บทุกประเภท รวมถึงการเฝ้าระวังอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการฝึกของนักเรียนนายเรืออากาศ ไม่ว่าจะเป็นการบาดเจ็บจากอุปกรณ์ฝึก การบาดเจ็บจากสถานที่ฝึก และการบาดเจ็บจากสภาพอากาศร้อน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะและความปลอดภัยของผู้เข้ารับการฝึก

ตามนโยบายของโรงพยาบาลโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชที่กำหนดไว้สำหรับ นักเรียนนายเรืออากาศชั้นปีที่ 4 รุ่นที่ 67 ในหลักสูตร Commander Ready ได้ระบุอย่างชัดเจนว่า ต้องไม่มีนักเรียนนายเรืออากาศได้รับบาดเจ็บจากสภาพอากาศร้อนระหว่างการฝึกปรับสภาพจากนักเรียนเตรียมทหารสู่การเป็นนักเรียนนายเรืออากาศ เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานด้านความปลอดภัยและสวัสดิภาพของผู้เข้ารับการฝึก นอกเหนือจากนี้สถานการณ์ฝุ่น PM2.5 ในปัจจุบันที่เพิ่มมากขึ้น ก็ถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการฝึกนักเรียนนายเรืออากาศ เช่นเดียวกับความร้อน ดังนั้น การใช้เครื่องวัดที่สามารถตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้น และค่าฝุ่น PM2.5 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำหนดเวลาการฝึกของนักเรียนนายเรืออากาศให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม ลดความเสี่ยงจากสภาวะอากาศที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสมรรถภาพของผู้ฝึก

คณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ออกแบบและพัฒนาระบบ รวมถึงทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ด้วยการนำอุปกรณ์ไปทดสอบการใช้งานจริง และให้ผู้เกี่ยวข้องกับการฝึกของนักเรียนนายเรืออากาศทดสอบความถูกต้องในการทำงาน รวมทั้งรับฟังความคิดเห็นเพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไข ให้มีความเหมาะสม ตรงกับความต้องการต่อไป

การพัฒนาระบบที่สามารถตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้น และค่าฝุ่น PM2.5 ไม่เพียงแต่ช่วยลดความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการฝึกของนักเรียนนายเรืออากาศ แต่ยังสอดคล้องกับเป้าหมายของกองทัพอากาศในการยกระดับคุณภาพชีวิตของกำลังพลและเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันประเทศ โดยระบบดังกล่าวสามารถนำไปใช้สนับสนุนการตัดสินใจในการกำหนดเวลาฝึก การปรับแผนการฝึกให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม ตลอดจนช่วยเฝ้าระวังสุขภาพของผู้ฝึกในสภาวะที่มีความร้อนและฝุ่นละอองสูง นอกจากนี้ การพัฒนาระบบยังเป็นตัวอย่างของการประยุกต์ใช้งานวิจัยและเทคโนโลยีเพื่อแก้ไขปัญหาในบริบทเฉพาะของกองทัพ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการบูรณาการระหว่างเทคโนโลยีและความต้องการทางยุทธศาสตร์ ทั้งนี้ ความสำเร็จของระบบจะขึ้นอยู่กับ การนำไปใช้งานจริง การปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง และการประเมินผลจากผู้ใช้งานในบริบทที่เกี่ยวข้องอย่างเป็นระบบ

2. ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบสำหรับวัดอุณหภูมิ ความชื้น และค่าฝุ่น เพื่อใช้ในการสนับสนุนการฝึกของกรมนักเรียนนายเรืออากาศรักษาพระองค์ รวมถึงการฝึกของหน่วยเฉพาะกิจ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยติดตามและประเมินสภาพอากาศแบบเรียลไทม์ สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการฝึก

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ลมร้อน

ลมร้อน (Heat Exhaustion) เป็นภาวะที่เกิดจากการสัมผัสอากาศร้อนอบอ้าวเป็นระยะเวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูง ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิร่างกายเพิ่มขึ้น กลไกของร่างกายจะปรับโดยเพิ่มการไหลเวียนของเลือดไปยังผิวหนังเพื่อระบายความร้อนผ่านการขับเหงื่อ อย่างไรก็ตาม หากหัวใจไม่สามารถสูบฉีดเลือดได้เพียงพอเพื่อรองรับทั้งความต้องการของระบบไหลเวียนโลหิตที่ไปยังผิวหนัง กล้ามเนื้อ และสมอง อาจส่งผลให้เลือดไปเลี้ยงสมองไม่เพียงพอ หากอยู่ในภาวะนี้เป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดอาการหน้ามืด หมดสติ หรือเป็นลมเนื่องจากสมองขาดออกซิเจน

บุคคลที่มีความเสี่ยงสูงต่อภาวะลมร้อน ได้แก่ ผู้ที่มีอาการเหนื่อยง่าย ผู้ที่ดื่มสุราเรื้อรัง ผู้ที่มีโรคเกี่ยวกับความดันโลหิต ผู้ที่มีน้ำหนักเกินเกณฑ์ รวมถึงบุคคลที่ไม่คุ้นชินกับการออกกำลังกายหรือทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีอากาศร้อนและความชื้นสูง นอกจากนี้ การสูญเสียน้ำและเกลือแร่ผ่านทางเหงื่อในปริมาณมากโดยไม่ได้รับสารน้ำทดแทนอย่างเพียงพอ อาจนำไปสู่ภาวะขาดน้ำ (Dehydration) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ร่างกายไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากภาวะลมร้อนแล้ว สภาวะอากาศที่ร้อนจัดยังสามารถก่อให้เกิดอาการอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ลมแดด (Heat Stroke), ตะคริวจากความร้อน (Heat Cramps), ผดร้อน (Heat Rash) และผิวหนังไหม้แดด (Sunburn) ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสมรรถภาพของบุคคลที่ต้องทำงานหรือฝึกซ้อมในสภาพแวดล้อมที่มีความร้อนสูง

3.2 ดัชนีความร้อน

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2530 เป็นต้นมา มีรายงานการเจ็บป่วยของทหารที่เข้ารับการฝึกเบื้องต้นจากทั่วประเทศไม่ต่ำกว่า 15 รายต่อปี และส่วนใหญ่พบในทหารที่เข้ารับการฝึกในผลัดที่ 1 ซึ่งเป็นการฝึกที่เริ่มตั้งแต่ต้นเดือนพฤษภาคมของทุกปี และมักเป็นกับทหารที่อยู่หน่วยงานในภาคกลาง ทั้งนี้ กรมอุตุนิยมวิทยาได้ระบุถึงเกณฑ์การวัดอากาศร้อนไว้

ที่ 35.0-39.9 องศาเซลเซียส และหากอุณหภูมิขึ้นสูงตั้งแต่ 40 องศาเซลเซียสขึ้นไป จัดว่าเป็นอากาศร้อนจัด ซึ่งบางครั้งตัวเลขบนเทอร์โมมิเตอร์ก็ไม่สามารถบอกความร้อนจริงได้ ต้องดูความชื้นในอากาศควบคู่กันไปด้วย จึงส่งผลให้มีการนิยาม ดัชนีความร้อน (Heat Index)

ดัชนีความร้อน คืออุณหภูมิที่มนุษย์เรารู้สึกได้ว่าขณะนั้นอากาศร้อนเป็นอย่างไรหรืออุณหภูมิที่ปรากฏในขณะนั้นเป็นเช่นไร ค่าดัชนีความร้อนเกิดจากการนำเอาค่าอุณหภูมิของอากาศที่ตรวจวัดได้จริงและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมาทำการวิเคราะห์หาค่าที่เป็นตัวแทนของอุณหภูมิที่รู้สึกได้ ตัวอย่างเช่น เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิได้ 38 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 60% เมื่อเทียบค่าจากตารางดัชนีความร้อนตามตารางที่ 1 จะได้ว่าร่างกายจะรู้สึกเหมือนอยู่ในอุณหภูมิ 56 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในภาวะเสี่ยงสูงที่จะเกิดอาการบาดเจ็บของร่างกายได้ [3]

จากสภาพอากาศปัจจุบันที่มีการเปลี่ยนแปลงและส่งผลให้เกิดสภาวะโรคลมร้อน กรมแพทย์ทหารบกจึงอ้างอิงค่าดัชนีความร้อนจากกรมอุตุนิยมวิทยา และกำหนดธงสัญญาณสีสำหรับการฝึกปฏิบัติ ตามตารางที่ 2 และ 3 ลงในประกาศคำแนะนำการป้องกัน ฝึกระวัง และการปฐมพยาบาลการเจ็บป่วยจากความร้อนในปี 2563 [4]

ตารางที่ 1 แผนภูมิดัชนีความร้อนตามอ้างอิงจาก National Weather Service (NWS)

ความชื้นสัมพัทธ์(%)	อุณหภูมิ (°C)											
	21	24	27	29	32	35	38	41	43	46	49	
0	18	21	23	26	28	31	33	35	37	39	42	
10	18	21	24	27	29	32	35	38	41	44	47	
20	19	22	25	28	31	34	37	41	44	49	54	
30	19	23	26	29	32	36	40	45	51	57	64	
40	20	23	26	30	34	38	43	51	58	66		
50	21	24	27	31	36	42	49	57	65			
60	21	24	28	32	38	46	56	65				
70	21	25	29	34	41	51	62					
80	22	26	30	36	45	58						
90	22	26	31	39	50							
100	22	27	33	42								



ภาวะเสี่ยงสูง

กิจกรรมระยะยาวสามารถนำไปสู่โรคลมร้อน

กิจกรรมระยะยาวอาจเกิดความเหนื่อยล้า

ตารางที่ 2 การจัดตั้งสัญญาณ สำหรับการฝึกทหารใหม่

สัญญาณธง	ดัชนีความร้อน (องศาเซลเซียส)	ปริมาณน้ำดื่ม (ลิตร/ชั่วโมง)	เวลาฝึกใน 1 ชั่วโมง (นาที)
ธงขาว	น้อยกว่า 27	อย่างน้อย ½ ลิตร	50
ธงเขียว	27 – 32	อย่างน้อย ½ ลิตร	50
ธงเหลือง	33 – 39	อย่างน้อย 1 ลิตร	45
ธงแดง	40 – 51	อย่างน้อย 1 ลิตร	30
ธงดำ	มากกว่า 51	อย่างน้อย 1 ลิตร	20

ตารางที่ 3 ดัชนีความร้อนตามกรมอุตุนิยมวิทยา พร้อมสีธงสัญญาณการฝึก

ปรอทแห้ง	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	
ความชื้นสัมพัทธ์	40-44	27	28	29	30	31	32	34	35	37	39	41	43	46	48	51	54	57	60
	45-49	27	28	29	30	32	33	35	37	39	41	43	46	49	51	54	57	61	64
	50-54	27	28	30	31	33	34	36	38	41	43	46	49	52	55	58	62	65	69
	55-59	28	29	30	32	34	36	38	40	43	46	48	52	55	59	62	66	70	75
	60-64	28	29	31	33	35	37	40	42	45	48	51	55	59	63	67	71	76	81
	65-69	29	30	32	34	36	39	41	44	48	51	55	59	63	67	72	77	82	87
	70-74	29	31	33	35	38	40	43	47	50	54	58	63	67	72	77	82	88	94
	75-79	29	31	34	36	39	42	46	49	53	58	62	67	72	77	83	88	94	101
	80-84	30	32	35	38	41	44	48	52	57	61	66	71	77	83	89	95	101	108
	85-89	30	33	36	39	43	47	51	55	60	65	70	76	82	88	95	102	109	116
	90-94	31	34	37	41	45	49	54	58	64	69	75	81	88	95	102	109	117	125
	95-99	31	35	38	42	47	51	57	62	68	74	80	87	94	101	109	117	125	134
	100	32	36	40	44	49	54	60	66	72	78	85	92	100	108	116	125	134	143

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 ศึกษาปัญหาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาก่อนหน้านี้ พบว่าการนำเทคโนโลยี IoT มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์แจ้งเตือนภาวะลมร้อนสามารถช่วยลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศร้อนระหว่างการฝึกได้ โดยอุปกรณ์ดังกล่าวพิจารณาทั้งปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิและความชื้น รวมถึงปัจจัยภายใน เช่น ดัชนีมวลกาย การใช้สารเสพติด และภาวะเจ็บป่วยเรื้อรังของผู้ฝึก [5-7] อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์รุ่นก่อนหน้ามีข้อจำกัดในหลายด้าน ได้แก่ ข้อจำกัดด้านพลังงานที่ใช้งานได้จำกัด ความไม่สะดวกในการขนย้าย และต้นทุนที่สูง คณะผู้วิจัยจึงเห็นถึงโอกาสในการพัฒนาและปรับปรุงอุปกรณ์ให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อตอบสนองต่อบริบทการฝึกที่ต้องการความคล่องตัว ความแม่นยำในการแจ้งเตือน และการใช้งานที่สะดวกยิ่งขึ้น

4.2 ศึกษาและออกแบบฮาร์ดแวร์

คณะผู้วิจัยเลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นแพลตฟอร์มหลักในการพัฒนา โดยทำงานร่วมกับ AM2302 (DHT22) ซึ่งเป็นตัวรับรู้วัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ [8] ที่มีความสามารถในการทนต่อสภาวะอากาศร้อนและชื้นได้ดี นอกจากนี้ ยังใช้ PMS5003 ซึ่งเป็นตัวรับรู้ตรวจจับอนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็ก [9] ที่สามารถวัดค่าฝุ่นละอองแขวนลอยในอากาศได้ในช่วง PM1.0 ถึง PM10

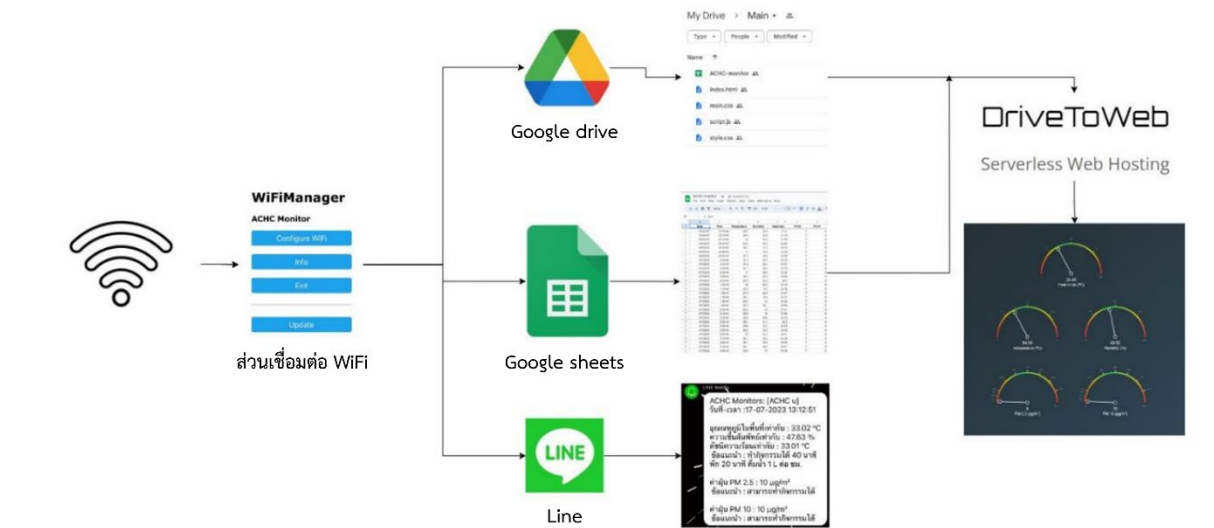
เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแสดงผล คณะผู้วิจัยได้นำ LED WS2812 ซึ่งเป็นโมดูล LED ที่สามารถแสดงสีด้วยความละเอียด 24 บิต มาใช้ร่วมกับระบบ นอกจากนี้ เพื่อให้สามารถพกพาและใช้งานได้สะดวก จึงออกแบบให้ระบบใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ 18650 จำนวน 2 ก้อน รายละเอียดของผังวงจรและอุปกรณ์ต้นแบบแสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 (ซ้าย) ผังวงจร (กลาง) อุปกรณ์ต้นแบบ (ขวา) วงจรภายใน

4.3 พัฒนาโปรแกรม

จากรูปที่ 2 กรอบการทำงานของระบบ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนการรับค่าจากตัวรับรู้และเชื่อมต่อฐานข้อมูล และส่วนการแสดงผล [10, 11] โดยคณะผู้วิจัยเลือกใช้ Google Sheets [12] เป็นฐานข้อมูลหลักในการจัดเก็บข้อมูลสภาพอากาศ และใช้ Line Notify [13] สำหรับการแจ้งเตือนข้อมูลสำคัญแก่ผู้ใช้งาน นอกจากนี้ระบบยังใช้ DriveToWeb เป็นแพลตฟอร์มแสดงผลผ่านเว็บโดยไม่ต้องใช้แม่ข่าย กระบวนการทำงานของระบบเริ่มต้นจากการเชื่อมต่อ WiFi ผ่าน WiFi Manager หลังจากที่ตัวรับรู้ (เซนเซอร์) ทำการอ่านค่าภาวะอากาศ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และค่าฝุ่นละออง บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จะทำการส่งข้อมูลไปยัง Google Sheets เพื่อจัดเก็บ จากนั้นระบบจะแจ้งเตือนผ่าน Line Notify ให้แก่ผู้ที่เกี่ยวข้อง และข้อมูลที่จัดเก็บไว้จะถูกนำไปใช้แสดงผลผ่าน DriveToWeb ในรูปแบบแดชบอร์ดออนไลน์ เพื่อให้สามารถติดตามและประเมินสถานการณ์ได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2 กรอบการทำงานระบบ (System Framework)

4.3.1 การโปรแกรมบน ESP32

คณะผู้วิจัยพัฒนาโปรแกรมโดยใช้ภาษา C ผ่าน Arduino IDE ซึ่งประกอบด้วยสองฟังก์ชันหลัก ได้แก่ setup() สำหรับกำหนดค่าตั้งต้น เช่น การเชื่อมต่อ WiFi การตั้งค่าเวลา และการเปิดใช้งานตัวรับรู้ และ loop() สำหรับการทำงานหลักที่ซ้ำอย่างต่อเนื่อง เช่น การรับค่าจากตัวรับรู้ การหน่วงเวลา การคำนวณค่าเฉลี่ย การบันทึกข้อมูลลงฐานข้อมูล Google Sheets และการส่งแจ้งเตือนผ่าน Line

4.3.2 การเชื่อมต่อ Google Sheets และ Line

คณะผู้วิจัยใช้ความสามารถของ ภาษา C ในการส่งข้อมูลผ่าน URL ร่วมกับการจัดการ Google Sheets ด้วย Google Script และใช้มอดูล WiFiClientSecure สำหรับการเชื่อมต่อกับ Line Notify โดยกระบวนการดังกล่าวถูกดำเนินการในฟังก์ชัน loop() ซึ่งทำงานซ้ำอย่างต่อเนื่อง เพื่อส่งข้อมูลและแจ้งเตือนตามที่กำหนด ดังแสดงรหัสเทียมในรูปที่ 3

```

DECLARE GOOGLE_SCRIPT_ID, root_ca, LINE_TOKEN as constants

FUNCTION loop():

    SET datasend TO formatted string containing: Temperature, Humidity, Air quality

    CALL sendData(datasend)

    SET message TO formatted string containing: Current time, Temperature, Humidity

    CALL Line_Notify(message)

FUNCTION sendData(params):

    INITIALIZE HTTPClient FROM GOOGLE_SCRIPT_ID and params

    EXECUTE HTTP GET request

FUNCTION Line_Notify(message):

    INITIALIZE WiFiClientSecure named client

    CONNECT to notify-api.line.me on port 443

    SET message TO HTTP request formatted string using LINE_TOKEN:

    CREATE HTTP request with message

```

รูปที่ 3 โค้ดส่วนหลักในการเชื่อมต่อ Google Sheets และ Line

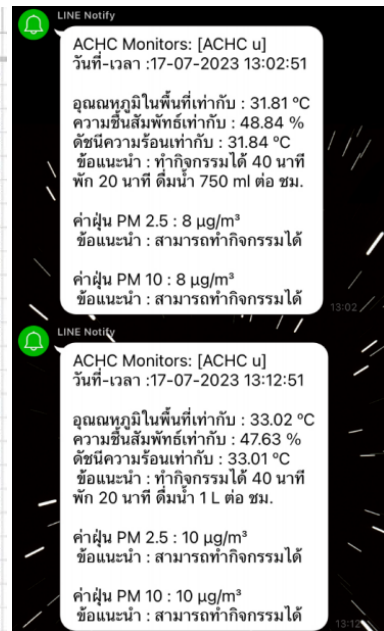
4.3.3 การอ่านค่าจากตัวรับรู้และส่งข้อมูลลงจัดเก็บในฐานข้อมูล

ตัวรับรู้ AM2302 (DHT22) ไม่มีค่ากำหนดเริ่มต้นสำหรับความถี่ในการอ่านข้อมูล ในขณะที่ตัวรับรู้ PMS5003 มีความถี่เริ่มต้นในการอ่านข้อมูลที่ทุก ๆ 1 วินาที อย่างไรก็ตาม จากการทดลองส่งข้อมูลจากตัวรับรู้ทั้งสองผ่านเครือข่าย WiFi ไปยังฐานข้อมูล Google Sheets พบว่าการตั้งค่าการอ่านและส่งข้อมูลในทุก ๆ 1 วินาทีส่งผลให้เกิดปัญหาหลายประการ ได้แก่ ความไม่คงที่ของค่าที่อ่านได้ ความไม่สอดคล้องกันของจังหวะการอ่านค่าระหว่างตัวรับรู้ และความล่าช้าจากกระบวนการเขียนข้อมูลลงใน Google Sheets

เมื่อพิจารณาข้อจำกัดดังกล่าว คณะผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงกระบวนการอ่านและแจ้งเตือนข้อมูล โดยคำนึงถึง รูปแบบการแจ้งเตือนของระบบแจ้งเตือนในโรงพยาบาลค่ายวชิรปราการ ซึ่งเป็นโรงพยาบาลในสังกัดกองทัพบกที่มีบทบาทสำคัญในการให้บริการทางการแพทย์และสนับสนุนภารกิจทางทหาร โดยโรงพยาบาลดังกล่าวได้พัฒนา เครื่องแจ้งเตือนดัชนีความร้อนต้นแบบ ซึ่งกำหนดให้มีการแจ้งเตือนทุก ๆ 1 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม จากข้อมูลในตารางที่ 3 ซึ่งแสดงดัชนีความร้อนตามกรมอุตุนิยมวิทยาและสัณฐานการณ์การฝึก พบว่า ระยะห่างของการแจ้งเตือนทุก 1 ชั่วโมงอาจไม่ทันทั่วถึงที่ต่ออาการบาดเจ็บจากสภาพอากาศร้อน เพื่อให้ระบบสามารถทำงานตอบสนองต่อสภาพ

อากาศแบบเรียลไทม์ และเพิ่มประสิทธิภาพในการแจ้งเตือน คณะผู้วิจัยจึงปรับจังหวะการอ่านข้อมูลของตัวรับรู้เป็นทุก ๆ 1 นาที และนำข้อมูลที่ได้ในช่วงเวลา 10 นาที มาคำนวณค่าเฉลี่ยก่อนนำไปแสดงผลและแจ้งเตือนผ่าน Line Notify การปรับปรุงดังกล่าวช่วยเพิ่มความแม่นยำ ลดความแปรปรวนของข้อมูล และสนับสนุนการตัดสินใจของผู้ควบคุมการฟักให้สามารถดำเนินการได้อย่างเหมาะสมและทันเวลา ดังแสดงในรูปที่ 4

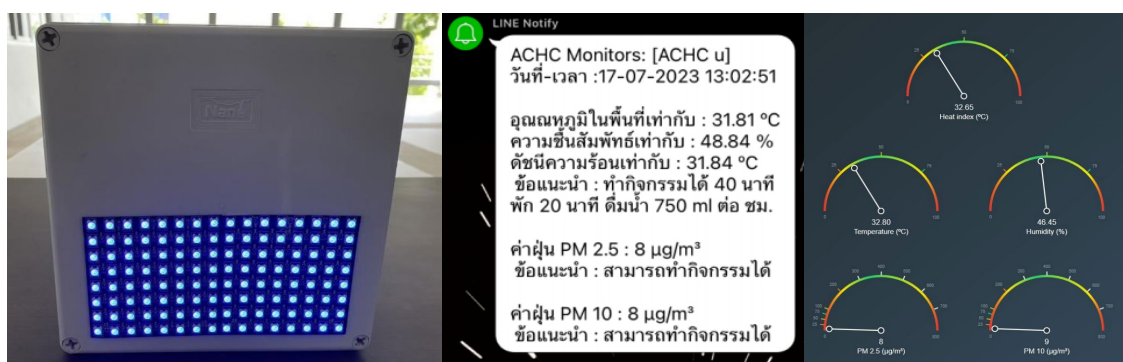
	A	B	C	D	E	F	G
1	Date	Time	Temperature	Humidity	Heatindex	Pm25	Pm10
628	6/25/2023	21:17:11	26.7	35.3	26.45	8	9
629	6/25/2023	21:25:22	27.7	41.4	27.5	10	10
630	6/25/2023	21:26:03	27.8	42.7	27.67	7	9
631	6/25/2023	21:35:56	31.45	45.11	31.12	9	11
632	6/25/2023	21:45:53	32.75	40.58	31.98	13	15
633	6/25/2023	21:55:53	33.26	38.95	32.34	14	16
634	6/25/2023	22:05:53	33.42	38.91	32.5	13	14
635	6/25/2023	22:15:53	33.89	39.98	33.03	11	13
636	6/25/2023	22:25:53	33.42	40.79	32.7	10	11
637	7/17/2023	9:06:01	25.9	36.1	25.49	1	1
638	7/17/2023	9:06:33	26.1	35.1	25.68	1	2
639	7/17/2023	9:16:34	27.7	33	27.02	2	2
640	7/17/2023	9:17:47	27.8	32	27.04	2	2
641	7/17/2023	9:27:19	30.92	33.66	29.93	1	1
642	7/17/2023	9:28:24	27.8	33	27.09	2	2
643	7/17/2023	12:42:48	28	29	27.05	12	12
644	7/17/2023	12:46:22	28.1	30.7	27.2	11	11
645	7/17/2023	12:49:31	27.8	30	26.95	8	8
646	7/17/2023	12:51:36	27.2	44.6	27.27	9	10
647	7/17/2023	12:52:56	28	46	28.11	6	7
648	7/17/2023	13:02:51	31.81	48.84	31.84	8	8
649	7/17/2023	13:12:51	33.02	47.63	33.01	10	10
650	7/17/2023	13:22:50	33.21	47.35	33.19	11	11
651	7/17/2023	13:32:50	33.23	46.83	33.15	11	12



รูปที่ 4 ข้อมูลที่เก็บใน Google Sheets และการแสดงผลผ่าน Line Notify

4.4 พัฒนาระบบแสดงผลและแจ้งเตือนสภาพอากาศ

คณะผู้วิจัยมองเห็นปัญหาของการแสดงผลเพียงอย่างเดียวหนึ่ง จึงออกแบบการแสดงผลออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ การแสดงผลผ่านสัญญาณไฟ LED สำหรับบุคคลที่อยู่ในบริเวณการฟัก การแจ้งเตือนผ่าน Line Notify สำหรับครูฟัก และการแสดงผลผ่าน Dashboard หรือเว็บไซต์สำหรับผู้บังคับบัญชาหรือผู้สนใจทั่วไป ตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 การแสดงผลในรูปแบบต่างๆ

4.5 ทดสอบประสิทธิภาพ

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบการใช้งานอุปกรณ์ระหว่างการศึกษา ณ โรงเรียนนายเรืออากาศ นวมินทราชดิยาธิราช โดยให้ผู้ที่เกี่ยวข้องกับการฝึกของนักเรียนนายเรืออากาศทำการประเมินการทำงานของเครื่องวัด พร้อมทั้งรวบรวมความคิดเห็นเพื่อใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาอุปกรณ์ให้เหมาะสมและตรงกับความต้องการของ โรงพยาบาลโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทราชดิยาธิราช

ในการประเมินความพึงพอใจ คณะผู้วิจัยใช้แบบสอบถามที่อ้างอิงมาตรวัดแบบลิเคิร์ต (Likert Scale) 5 ระดับ โดยมีเกณฑ์การให้คะแนนดังต่อไปนี้

4.51 – 5.00 หมายถึง ระดับความพึงพอใจในระดับมากที่สุด

3.51 – 4.50 หมายถึง ระดับความพึงพอใจในระดับมาก

2.51 – 3.50 หมายถึง ระดับความพึงพอใจในระดับปานกลาง

1.51 – 2.50 หมายถึง ระดับความพึงพอใจในระดับน้อย

1.00 – 1.50 หมายถึง ระดับความพึงพอใจในระดับน้อยที่สุด

ผลการประเมินจะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลสำคัญในการปรับปรุงระบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้ตอบสนองต่อข้อกำหนดและความต้องการของผู้ใช้งานในบริบทของการฝึกนักเรียนนายเรืออากาศได้อย่างเหมาะสม

5. ผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่มุ่งพัฒนาระบบตรวจวัดสภาพอากาศเพื่อสนับสนุนภารกิจฝึกของกรมนักเรียนนายเรืออากาศรักษาพระองค์และหน่วยเฉพาะกิจ โดยเน้นการติดตามและประเมินสภาพอากาศแบบเรียลไทม์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการฝึก การประเมินผลสำเร็จของงานวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบหลักได้แก่

5.1 ความสำเร็จในการพัฒนาอุปกรณ์

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นบอร์ดที่รองรับการเชื่อมต่อ WiFi ในมาตรฐาน 802.11 b/g/n คณะผู้วิจัยใช้การปล่อยสัญญาณเครือข่ายจากโทรศัพท์มือถือเพื่อใช้ในการส่งค่าที่อ่านได้จากตัวรับรู้ไปยังฐานข้อมูล Google sheet ผลการส่งข้อมูลเป็นไปอย่างราบรื่นตามมาตรฐาน WiFi ดังกล่าว แต่เนื่องจากตัวรับรู้มีการวัดและส่งข้อมูลตลอดเวลา ทำให้ค่าที่ได้มีความแปรปรวน ส่งผลต่อการแปรความหมาย คณะผู้วิจัยจึงใช้การเฉลี่ยค่าในช่วงเวลา 10 นาที ก่อนนำมาแสดงผล

5.2 ความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

จากการทดสอบการใช้งานอุปกรณ์และตอบข้อคำถามเกี่ยวกับความพึงพอใจของผู้ที่เกี่ยวข้องกับการฝึกนักเรียนนายเรืออากาศ ในส่วนของกรมนักเรียนนายเรืออากาศรักษาพระองค์ จำนวน 22 คน ซึ่งประกอบด้วย นายทหารผู้ควบคุมภาพรวมการฝึก (รองผู้บังคับการกรมนักเรียนนายเรืออากาศรักษาพระองค์) นายทหารควบคุมการฝึกในส่วนของการกำลังพล (ผู้บังคับบัญชากองร้อย 2 กองพันที่ 5 กรมนักเรียนนายเรืออากาศรักษาพระองค์) และครูฝึกกำลังพล (นักเรียนนายเรืออากาศชั้นปีที่ 4) จำนวน 20 คน จากตารางที่ 4 พบว่า ค่าเฉลี่ยระดับความพึงพอใจรวมอยู่ที่ 4.3 คิดเป็นร้อยละ 86 ซึ่งเมื่อแปลความหมายตามเกณฑ์มาตรวัดแบบลิเคิร์ต (Likert Scale) สามารถสรุปได้ว่า ผู้ใช้งานมีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

ตารางที่ 4 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้เกี่ยวข้อง

ลำดับ	ประเด็นคำถาม	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
1	ความเหมาะสมในการออกแบบ	4.32	0.65
2	ความเหมาะสมในการจัดวางส่วนประกอบต่างๆ	4.18	0.85
3	ความเหมาะสมของการใช้งาน	4.23	0.69
4	ขั้นตอนในการใช้งานมีความง่ายเหมาะสมต่อการฝึก	4.23	0.75
5	สามารถใช้งานได้ตรงตามวัตถุประสงค์	4.36	0.66
6	ช่วงเวลาการวัดค่าเหมาะสมกับการป้องกันโรคลมร้อน	4.27	0.70
7	สามารถแสดงผลได้อย่างชัดเจน	4.45	0.67
8	รองรับการเปลี่ยนแปลงผู้ใช้งาน	4.23	0.75
9	ช่วยลดปัญหาการบาดเจ็บที่เกิดจากความร้อน	4.45	0.67
10	ผู้เข้ารับการฝึกมีขวัญกำลังใจมากขึ้น	4.23	0.75
รวม		4.30	0.71

5.3 อภิปรายผล

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้เกี่ยวกับการใช้ Internet of Things (IoT) ในการติดตามสภาพอากาศและแจ้งเตือนภาวะลมร้อน โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการใช้ตัวรับรู้ร่วมกับแพลตฟอร์มคลาวด์ในการบันทึกข้อมูลและแจ้งเตือน แต่มีข้อจำกัดด้าน พลังงาน การขนย้าย และต้นทุน คณะผู้วิจัยได้นำปัจจัยเหล่านี้มาปรับปรุงให้ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้สะดวกขึ้น ลดภาระในการติดตั้ง และรองรับการทำงานแบบเรียลไทม์ที่มีความแม่นยำมากขึ้น

แม้ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นจะสามารถวัดและแจ้งเตือนสภาพอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังคงมีข้อจำกัดบางประการที่ต้องพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความเสถียร ความแม่นยำ และความสะดวกในการใช้งาน ได้แก่ ความเสถียรของเครือข่าย WiFi พลังงานของอุปกรณ์ และการตั้งค่าช่วงเวลาการอ่าน

6. สรุป

หลังจากดำเนินการวิเคราะห์ ศึกษา ออกแบบและทดสอบอุปกรณ์ที่สร้างด้วยตัวรับรู้ แฝงวงจร ในการส่งข้อมูลอุณหภูมิและค่าฝุ่น PM2.5 คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยในแต่ละขั้นตอนในการทำงานอย่างละเอียด และแก้ปัญหาต่างๆ ที่พบระหว่างการดำเนินการวิจัย เมื่อทุกขั้นตอนเสร็จสิ้น คณะผู้วิจัยได้ทำการสรุปผลและอธิบายการทำงานจริงของอุปกรณ์นี้ได้ข้อสรุปว่าอุปกรณ์สามารถส่งและวัดค่าข้อมูลอุณหภูมิและค่าฝุ่น PM2.5 ได้ในระดับที่ดีมาก สามารถลดความซ้ำซ้อนของข้อมูลเมื่อเทียบกับการดูค่าจากปรอทและสัญญาณธงแบบเดิมได้ ผู้ควบคุมการฝึกเข้าใจได้ง่ายและไม่เกิดปัญหาขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนผู้ควบคุมการฝึก มีรูปแบบการแสดงผลที่สวยงาม รวมทั้งยังมีขีดความสามารถเพิ่มขึ้นมาจากเดิมคือสามารถส่งข้อมูลลงไลน์กลุ่ม ซึ่งตอบโจทย์กับการตอบสนองความต้องการของผู้บังคับบัญชาในการทราบแนวทางการฝึกอีกด้วย

7. ข้อเสนอแนะ

ระบบแจ้งเตือนแสดงผลสภาพอากาศ สำหรับการฝึกนักเรียนนายเรืออากาศ โดยใช้ระบบ IoT นี้เป็นระบบต้นแบบเพื่อให้เกิดการนำความรู้การเขียนโปรแกรม ร่วมกับการจัดการฮาร์ดแวร์ นำไปสู่การพัฒนาต่อยอดด้าน IoT คณะผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะและแนวทางสำหรับการพัฒนาต่อยอดดังนี้

7.1 ควรปรับปรุงขั้นตอนการตั้งค่าเชื่อมต่อ Access Point ให้สะดวกและง่ายขึ้น พร้อมทดสอบระยะทางเชื่อมต่อสูงสุดตามขีดจำกัดของบอร์ด ESP32 (50-200 เมตร) รวมทั้งประเมินความถูกต้องของตัวรับรู้ด้วยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากตัวรับรู้ชนิดเดียวกันในหลายตำแหน่ง และดำเนินการสอบเทียบกับอุปกรณ์มาตรฐาน โดยแสดงผลในรูปแบบตารางเพื่อแสดงค่าความแม่นยำและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานให้ชัดเจน

7.2 ควรออกแบบการทดลองเพิ่มเติมเพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ระยะเวลาที่เหมาะสมในการอ่านค่าและแจ้งเตือน และการคำนวณค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมกับการใช้งานจริงในระยะยาว พร้อมทั้งจัดเก็บข้อมูลสถิติจำนวนผู้บาดเจ็บก่อนและหลังการใช้อุปกรณ์ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบในการลดอัตราการบาดเจ็บ โดยพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น สภาพแวดล้อม ลักษณะการฝึก และมาตรการเสริมอื่น ๆ

7.3 เนื่องจากบอร์ด ESP32 รองรับตัวรับรู้ได้หลากหลายประเภท จึงสามารถต่อยอดเป็นระบบ IoT ในรูปแบบอื่นได้ โดยควรมีการประเมินจากกลุ่มผู้ใช้งานจริง และผู้เชี่ยวชาญจากหลากหลายสาขา เช่น ด้านเทคโนโลยี IoT และระบบแจ้งเตือน เพื่อให้ได้ข้อเสนอแนะที่รอบด้าน นำไปสู่การพัฒนาต่อยอดระบบให้มีมาตรฐานและคุณภาพสูงขึ้น

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] กองทัพอากาศ, “หลักนิยมกองทัพอากาศ พ.ศ.2562,” [ออนไลน์]. Available: http://www.rtaf.mi.th/th/Documents/Publication/RTAF_Doctrine_2020.pdf. (เข้าถึงเมื่อ: 15 มกราคม 2567).
- [2] กองทัพอากาศ, “ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ.2563),” [ออนไลน์]. Available: http://www.rtaf.mi.th/th/Documents/Publication/RTAF_Strategy_Final_04122563.pdf. (เข้าถึงเมื่อ: 15 มกราคม 2567).
- [3] R.G. Steadman, “The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science,” *J. Appl. Meteorol*, vol. 18, pp. 861–873, 1979.
- [4] กองทัพบก, “ประกาศกรมแพทย์ทหารบก เรื่อง คำแนะนำการป้องกัน การแผ่รังสี และการปฐมพยาบาลการเจ็บป่วยจากความร้อน,” [ออนไลน์]. Available: <https://amed.rta.mi.th/main/download/upload/upload-20210427161318.pdf>. (เข้าถึงเมื่อ: 15 มกราคม 2567).
- [5] ปณิดดา หัตถโชติ, “การจัดการความรู้และถ่ายทอดเทคโนโลยีนวัตกรรมแอปพลิเคชัน RTA Heat Stroke เพื่อการป้องกันการบาดเจ็บจากความร้อนในห้วงการฝึกทหารใหม่,” รายงานกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัย, ภาควิชาสรีรวิทยา กองการศึกษา, วิทยาลัยแพทย์พระมงกุฎเกล้า, 2560.
- [6] โรงพยาบาลค่ายวชิรปราการ, 2565. “เครื่องแจ้งเตือนดัชนีความร้อน,” [ออนไลน์]. Available: <http://app.amedstgy.com/>. (เข้าถึงเมื่อ: 10 มกราคม 2567).
- [7] T. W. Son, D. A. Ramli, and A. A. Aziz, “Wearable heat stroke detection system in IoT-based environment,” *Procedia Computer Science*, vol. 192, pp. 3686–3695, 2021.

- [8] CyberTic, "บทความสอนใช้งาน Arduino DHT22," *CyberTic*, 2021. [Online]. Available: [https://www.cybertice.com/article/430/สอนใช้งาน-arduino-dht22-module-โมดูลวัดอุณหภูมิและความชื้น. \(เข้าถึงเมื่อ: 25 มกราคม 2567\).](https://www.cybertice.com/article/430/สอนใช้งาน-arduino-dht22-module-โมดูลวัดอุณหภูมิและความชื้น. (เข้าถึงเมื่อ: 25 มกราคม 2567).)
- [9] CyberTic, "การใช้งาน Laser Dust Sensor PMS5003," *CyberTic*, 2021. [Online]. Available: [https://www.cybertice.com/article/375/เซ็นเซอร์ตรวจจับฝุ่นละออง-วัดคุณภาพอากาศ-laser-dust-sensor-pms5003-g5. \(เข้าถึงเมื่อ: 25 มกราคม 2567\).](https://www.cybertice.com/article/375/เซ็นเซอร์ตรวจจับฝุ่นละออง-วัดคุณภาพอากาศ-laser-dust-sensor-pms5003-g5. (เข้าถึงเมื่อ: 25 มกราคม 2567).)
- [10] CyberTic, "บทความสอนการใช้งาน NodeMCU ESP32 ส่งข้อความ สติกเกอร์, รูปภาพ, แจ้งเตือนผ่านระบบ LINE Notify Tokens (2022)," *CyberTic*, 2022. [Online]. Available: [https://www.cybertice.com/article/638/สอนใช้งาน-nodemcu-esp32-ส่งข้อความ-สติกเกอร์-รูปภาพ-แจ้งเตือนผ่าน-line-notify-2022. \(เข้าถึงเมื่อ: 27 มกราคม 2567\).](https://www.cybertice.com/article/638/สอนใช้งาน-nodemcu-esp32-ส่งข้อความ-สติกเกอร์-รูปภาพ-แจ้งเตือนผ่าน-line-notify-2022. (เข้าถึงเมื่อ: 27 มกราคม 2567).)
- [11] CyberTic, "การบันทึกข้อมูล Arduino NodeMCU ESP32 ลง Google Sheet แบบเรียลไทม์," *CyberTic*, 2021. [Online]. Available: [https://www.allnewstep.com/article/365/วิธีเซฟข้อมูล-arduino-nodemcu-ลง-google-sheet-แบบเรียลไทม์-arduino-esp8266-ifttt-google-sheet. \(เข้าถึงเมื่อ: 27 มกราคม 2567\).](https://www.allnewstep.com/article/365/วิธีเซฟข้อมูล-arduino-nodemcu-ลง-google-sheet-แบบเรียลไทม์-arduino-esp8266-ifttt-google-sheet. (เข้าถึงเมื่อ: 27 มกราคม 2567).)
- [12] GoogleWorkspace, "AppScript เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชัน, GoogleWorkspace" [Online]. Available: [https://workspace.google.com/intl/th/products/apps-script/. \(เข้าถึงเมื่อ: 11 มีนาคม 2567\).](https://workspace.google.com/intl/th/products/apps-script/. (เข้าถึงเมื่อ: 11 มีนาคม 2567).)
- [13] P. Bua-ngam and S. Thanompolkrang, "The Application of Line BOT and Encryption Techniques in Securing Data from Screen Capturing of Online Social Media Conversations," *Journal of Information Science Research and Practice*, vol. 42, No. 4, pp. 102-116, October-December, 2024.

การพัฒนาระบบประเมินความสามารถด้านเทคโนโลยีสารสนเทศสำหรับ
นักเรียนนายเรืออากาศ

Development of an Information Technology Competency Evaluation System
for Air Cadet

ชญาวัจน์ สติภัทรสมบัติ¹, ชวพงษ์ ขุนสูงเนิน^{2*} และ เทวา กาญจนชม³

^{1, 2, 3}ภาควิชาคอมพิวเตอร์ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Chanyawat Sathidbhattarasombad¹, Chawaphong Khunsoongnoen^{2*} and Tewa Kanjanachom³

^{1, 2, 3}Computer Science Department Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

chawaphong_k@rtaf.mi.th

Received 15 January 2025

Revised 05 March 2025

Accepted 11 March 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบประเมินความสามารถด้านเทคโนโลยีสารสนเทศสำหรับนักเรียนนายเรืออากาศชั้นปีที่ 5 ของทุกปี ระบบเป็นเว็บแอปพลิเคชัน โดยใช้เทคโนโลยี ASP.NET และฐานข้อมูล Microsoft Access ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนผู้ดูแลระบบ และส่วนของนักเรียน โดยการพัฒนาได้ใช้รูปแบบการพัฒนาแบบ Waterfall Model เป็นหลัก หลังจากพัฒนาระบบและดำเนินการแก้ไขอย่างต่อเนื่องและทำการสอบมาเป็นระยะเวลา 8 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560 -2567 จากนั้น จากผลการวิจัยพบว่า ระบบประเมินความสามารถด้านเทคโนโลยีสารสนเทศสำหรับ นักเรียนนายเรืออากาศ ทำงานได้เป็นอย่างดี โดยได้ทำการประเมินระบบโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรก ประเมินผลโดยผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ 3 ท่าน ได้ค่าเฉลี่ยรวมที่ 3.75 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0.57 ส่วนที่ 2 ประเมินระบบโดยผู้ใช้งานจำนวน 765 คน โดยใช้วิธีการเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง ได้ค่าเฉลี่ยรวมที่ 3.60 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0.46 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพระบบอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

คำสำคัญ: การประเมินความสามารถด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ, ระบบการประเมินผล, เว็บแอปพลิเคชัน, เทคโนโลยี ASP.NET, นักเรียนนายเรืออากาศ

Abstract

This research aimed to develop an IT competency assessment system for fifth-year ~~class~~ Air Cadets, implemented as a web application using ASP.NET technology and Microsoft Access database. The system consisted of two main components: the administrator module and the student module. The development followed the Waterfall Model approach. After development,

the system was tested over a period of 8 years, from 2017 to 2024. The system was then evaluated in two parts: First, by IT experts, who rated it with an average score of 3.75 and a standard deviation of 0.57. Second, by 765 users, chosen through a purposive sampling method, who rated it with an average score of 3.60 and a standard deviation of 0.46. These results indicated that the system's performance was considered to be at a good level.

Keywords: Information Technology Competency, Evaluation System, Web Application, Waterfall Model, ASP.NET, Air Cadet

1. บทนำ

ปัจจุบันโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ซึ่งเป็นสถาบันหลักในการผลิตนายทหารชั้นสัญญาบัตรให้กับกองทัพอากาศ ที่เป็นผู้เฝ้ายพร้อมด้วยความรู้ความสามารถด้านวิชาการ วิชาทหาร คุณลักษณะผู้นำทหาร และคุณธรรมจริยธรรม พร้อมทั้งสามารถพัฒนาตนเองให้ทันกับการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งในปัจจุบันเปิดทำการเรียนการสอนมีทั้งหมด 7 สาขาวิชา แบ่งเป็น ด้านวิศวกรรม 5 สาขา และวิทยาศาสตร์ 2 สาขา ได้แก่ วิศวกรรมอากาศยาน วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการการบิน วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมไฟฟ้า คอมพิวเตอร์ และ วัสดุศาสตร์ทางอากาศยาน

อีกทั้งระบบประกันคุณภาพการศึกษาของโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชใช้ระบบเกณฑ์คุณภาพการศึกษาเพื่อการดำเนินการที่เป็นเลิศ (EdPEX) [1] มีตัวชี้วัดความสามารถของผู้เรียนในการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารในข้อที่ 1 โดยผู้สำเร็จการศึกษาจะต้องมีจำนวนมากกว่าหรือเท่ากับ 80% ของทั้งหมด ที่จะต้องสอบผ่านตามเกณฑ์การสอบ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราชได้มอบหมายให้ภาควิชาคอมพิวเตอร์รับผิดชอบตัวชี้วัดนี้ ภาควิชาคอมพิวเตอร์จึงจัดให้มีการสอบ Information Technology Competency Exam (ICT Exit Exam) ทุกปี ตั้งแต่ปีการศึกษา 2560 เป็นต้นมา โดยจากการสอบแบบระบบเดิมใช้กระดาษในการทดสอบทำให้ไม่สามารถทราบผลการทดสอบได้อย่างทันที และต้องใช้เจ้าหน้าที่ในการตรวจสอบข้อสอบ ซึ่งทำให้อาจจะส่งผลให้ล่าช้า และไม่ยืดหยุ่นต่อสถานการณ์ในปัจจุบันที่มีโรคระบาดโควิด ทำให้ภาควิชาคอมพิวเตอร์ต้องดำเนินการพัฒนาระบบประเมินความสามารถด้านสารสนเทศสำหรับนักเรียนนายเรืออากาศพร้อมทั้งแจ้งผลทันทีเมื่อผู้ทดสอบได้ทำการทดสอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว

2. ขอบเขตงานวิจัย

เพื่อพัฒนาระบบประเมินความสามารถด้านสารสนเทศสำหรับนักเรียนนายเรืออากาศชั้นปีที่ 5 ก่อนจบการศึกษา เพื่อให้มีความรู้ ความสามารถด้านสารสนเทศ และสามารถปฏิบัติงานให้กับกองทัพอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 Bloom's Taxonomy

ทีมผู้วิจัยได้มีหลักเกณฑ์การคัดเลือกข้อสอบที่เป็นข้อที่ดี ตามทฤษฎีของ Bloom's Taxonomy [2] โดยเกณฑ์การเลือกข้อสอบทั้ง 6 ระดับแบ่งได้ดังรูปที่ 1

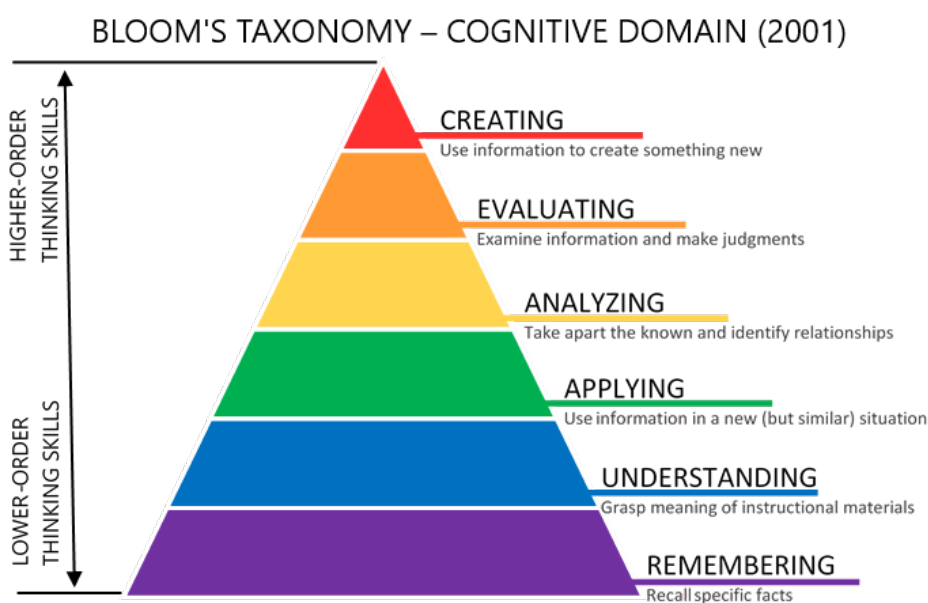
3.1.1 การจดจำ (Remembering) โดยข้อสอบบางข้อใช้ความจำโดยไม่ต้องทำความเข้าใจก็สามารถหาคำตอบได้

3.1.2 การทำความเข้าใจ (Understanding) รูปแบบข้อสอบแบบทำความเข้าใจจะเหนือกว่าแบบการจดจำ โดยผู้ทดสอบต้องมีความจำ และสามารถหาความสัมพันธ์นำไปสู่กระบวนการในการหาคำตอบที่ถูกต้อง

3.1.3 การประยุกต์ใช้ (Applying) รูปแบบข้อสอบที่ประยุกต์ใช้จะค่อนข้างนำความเป็นจริงมาพิจารณา เช่น ออกแบบระบบเครือข่ายที่ใช้ในองค์กร ผู้เรียนจำเป็นต้องจดจำ ทำความเข้าใจในทฤษฎีอย่างเป็นระบบถึงจะสามารถนำมาใช้ในชีวิตประจำวัน หรือสามารถแก้ปัญหาในองค์กรได้

3.1.4 การประเมิน (Evaluating) การประเมินผลในที่นี้ได้ประเมินผลผ่านระบบโดยข้อสอบที่เลือกมาจากผู้ทรงคุณวุฒิในโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช และทำการปรับปรุงข้อมูลให้ทันสมัยอย่างต่อเนื่อง

3.1.5 การสร้างสรรค์ (Creating) ผู้เรียนสามารถรวบรวมองค์ความรู้ไปสร้างสรรค์หรือทำสิ่งต่าง ๆ ในกองทัพอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 สามเหลี่ยมตามทฤษฎีของ Bloom's Taxonomy [2]

3.2 Learning Management System (LMS) [3]

การจัดการเรียนการสอนผ่านระบบเครือข่าย ที่เป็นซอฟต์แวร์ที่จัดทำมาเพื่ออำนวยความสะดวกให้แก่ผู้เรียน ผู้สอน และผู้ดูแลระบบ โดยมีระบบต่าง ๆ ภายใน เช่น ระบบจัดการรายวิชา ระบบจัดการผู้เรียน ระบบจัดการข้อสอบ และระบบตรวจสอบกิจกรรมต่าง ๆ ระบบการสอบ รวมทั้งการประเมินผลจากผู้เรียน ซึ่งมีซอฟต์แวร์อย่างมากมาย เช่น Moodle , Atutor, Claroline, VClass จากจำนวนของซอฟต์แวร์ที่มีมากขึ้นทำให้เกิดการควบคุมมาตรฐานของ LMS และ CMS ต่าง ๆ เรียกว่า มาตรฐาน “SCORM” (Sharable Content Object Reference Model) ซึ่งในปัจจุบันมีหน่วยงาน AICC (Airline Industry Computer-Based Training Committee) ดูแลเรื่องมาตรฐานนี้ โดยซอฟต์แวร์ที่สร้างขึ้นต้องมีย่อประกอบทั้ง 3 อย่าง ได้แก่ Content, Services และ Technology จากการดูแลมาตรฐานของ SCORM ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของผู้เรียน เนื่องจากมีระบบติดตามผลการเรียน การปรับปรุงของเนื้อหาที่ทันสมัย และการโต้ตอบระหว่างผู้เรียน และผู้สอนมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม

จากการศึกษาและทดลองใช้งาน LMS จากหลาย ๆ ผลิตภัณฑ์ยังพบว่าระบบมีขนาดใหญ่จนเกินไปและบางส่วนที่ทางทีมผู้วิจัยต้องการใช้งานเป็นแค่ส่วนย่อยที่เป็นระบบสอบ ทั้งยังไม่ตอบโจทย์ในการสอบของนักเรียนนายเรืออากาศ ทำให้ทีมผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาระบบขึ้นมาเอง

3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.3.1 เสาวนีย์ ปรัชญาเกรียงไกร, จุฑามาส ศิริอังกูรวาณิช และ สุปราณี ห่อมา [4] ได้ทำการพัฒนาระบบสนับสนุนการจัดทดสอบและการประเมินผลออนไลน์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี โดยการพัฒนาได้ใช้ภาษา PHP ร่วมกับฐานข้อมูล MySQL โดยมุ่งเน้นไปที่การมีข้อสอบที่เป็นทั้งตัวเลือก และการเติมคำเพื่อป้องกันกระบวนการทุจริต โดยวัดและประมวลผลค่าความยากง่ายของข้อสอบ รวมทั้งประเมินผลระบบโดยผู้เชี่ยวชาญทั้ง 5 ท่าน ซึ่งสามารถใช้งานระบบได้เป็นอย่างดี

3.3.2 พระครูศรีสิทธิบัณฑิต และ อภิชาติ รอดนิม [5] ได้ทำการพัฒนาแพลตฟอร์มการวัดและประเมินผลออนไลน์ รายวิชาข้อสอบกลาง มหาวิทยาลัยมหาจุฬาลงกรณราชวิทยาลัย จากเดิมที่การวัดและการประเมินผลใช้กระดาษในแต่ละรายวิชาที่เป็นข้อสอบกลางทำให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ต้องใช้เจ้าหน้าที่ในการคุมสอบและตรวจข้อสอบ ซึ่งเสียเวลาเป็นอย่างมาก ต่อมาได้ย้ายมาใช้แพลตฟอร์ม Moodle พบว่าผู้เรียนมีประสิทธิภาพในการเรียนที่มากขึ้น การเรียนการสอนมีความยืดหยุ่น มีการโต้ตอบระหว่างผู้สอนและผู้เรียนอย่างดี อีกทั้งยังลดค่าใช้จ่ายในด้านการวัดและประเมินผลผู้เรียนได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

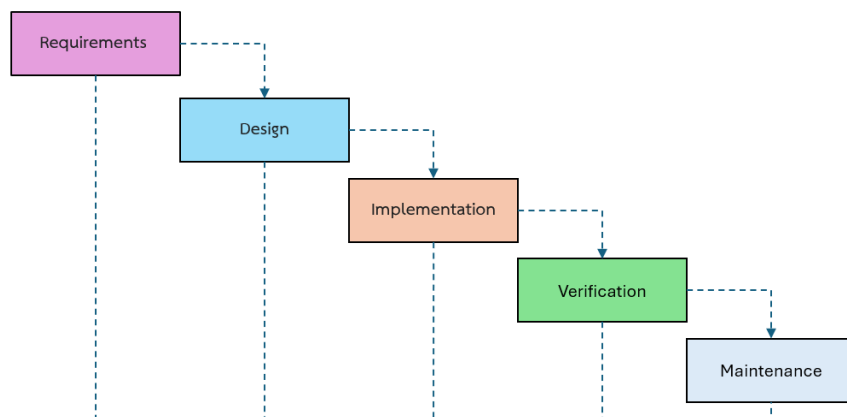
3.3.3 นิติ ทองดิงามเลิศ, ศรินย์พร ชัยวิศิษฐ์ และ วัธสาตรี ดิถียนต์ [6] ได้ทำการศึกษาผลการใช้บทเรียน e-learning ร่วมกับกระบวนการจัดการเรียนรู้แบบสืบเสาะหาความรู้ต่อความเข้าใจของผู้เรียน เรื่อง คุณธรรมจริยธรรมการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ในงานวิจัยได้กล่าวถึงการนำเอา e-learning ที่มีอยู่ในระบบของ Moodle มาใช้งานอย่างเป็นระบบ จากนั้นทำการทดสอบผู้เรียนและวัดประเมินผลด้วยค่า t-test

3.3.4 Suman Ninoriya, P.M.Chawan และ B.B.Meshram [7] ได้ทำการเปรียบเทียบการใช้งาน LMS และ CMS (Content Management System) ที่เข้ากับการเรียนการสอนในแบบ e-learning พบว่าเมื่อนำมาผสมผสานกันจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของผู้เรียนและง่ายต่อการบริหารและจัดการ

จากการที่ได้ทบทวนวรรณกรรมทางทีมผู้วิจัย ได้ศึกษาความต้องการของระบบและทรัพยากรที่มีในโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช พบว่าระบบเครือข่ายที่มีอยู่เป็นระบบแบบอินทราเน็ต ยากต่อการเข้าถึงจากภายนอก และเครื่องแม่ข่ายที่มีเป็น Windows Server [8] จึงทำให้ทีมผู้วิจัยเลือกภาษาที่ใช้ในการพัฒนาเป็น ASP.NET เพื่อให้เข้ากับเครื่องแม่ข่าย เนื่องจากระบบอินเทอร์เน็ตไม่ค่อยมีความเสถียรมากนัก จึงทำให้การพัฒนาเว็บไม่ได้มุ่งเน้นไปที่ความสวยงามเพื่อต้องการให้เว็บสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ประกอบกับทีมผู้วิจัยได้ทดลองใช้ LMS ที่เป็นที่นิยม เช่น Moodle พบว่ามีรายละเอียดที่มากเกินไปที่จะใช้งานจึงตัดสินใจเขียนโปรแกรมขึ้นมา

4. การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยได้ใช้การพัฒนาซอฟต์แวร์ในรูปแบบ Waterfall Model [9] โดยมีทั้งหมด 5 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2 ได้แก่ การเก็บความต้องการของระบบ ออกแบบระบบ พัฒนาระบบ ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่อง ดูแลรักษาระบบ

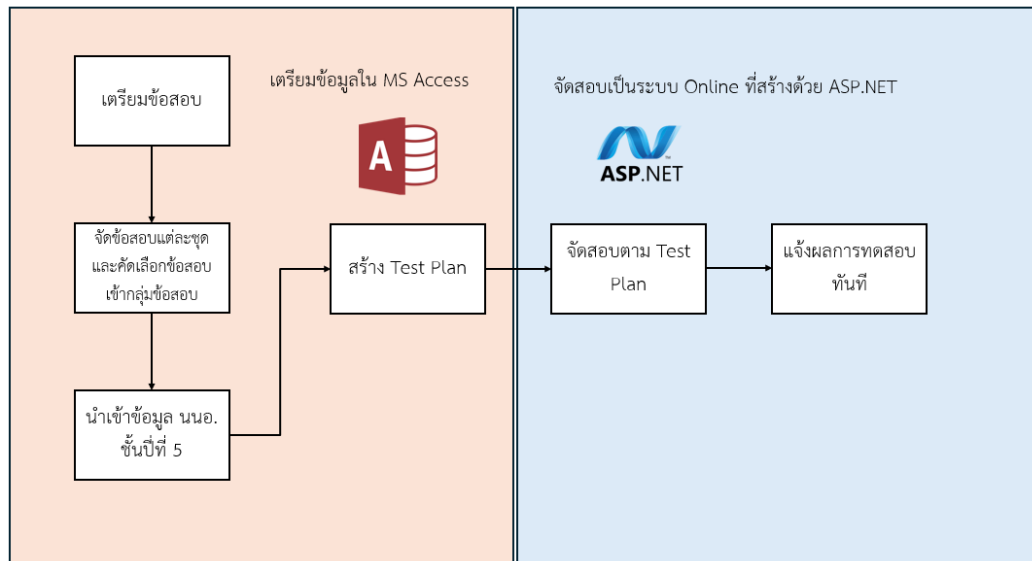


รูปที่ 2 แสดง Waterfall Model

ในขั้นตอนการเก็บความต้องการของระบบได้ทำการประชุมปรึกษากับผู้บังคับบัญชาว่าเป้าหมายของระบบ และทิศทางในการทดสอบของนักเรียนนายเรืออากาศ โดยการเลือกข้อสอบจะมีทั้งหมด 70 ข้อ จะเลือกด้านที่สำคัญ ๆ มาทั้ง 4 ด้าน ได้แก่ ความรู้คอมพิวเตอร์เบื้องต้น ความรู้ด้านระบบปฏิบัติการ ความรู้ด้านโปรแกรมประยุกต์ Microsoft Office และความรู้ด้านเทคโนโลยีสารสนเทศในชีวิตประจำวัน โดยเพิ่มเติมเนื้อหาข้อสอบเกี่ยวกับเทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อการสื่อสาร อินเทอร์เน็ต จริยธรรม กฎหมาย พบว่าด้วยการกระทำผิดทางกับคอมพิวเตอร์ ใช้เวลาสอบไม่เกิน 40 นาที โดยข้อสอบแต่ละคนจะถูกสลับข้อ และสลับตัวเลือกป้องกันการทุจริตในการสอบ

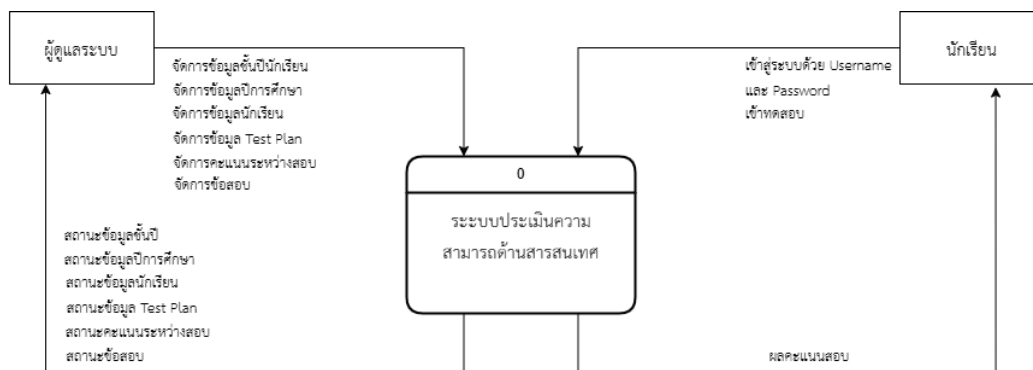
4.1 การออกแบบระบบ

ทางทีมผู้วิจัยได้ออกแบบระบบภาพรวมโดยแบ่งเป็น ระบบหลังบ้าน (Back End) จะใช้ฐานข้อมูล Microsoft Access 2008 กับ ระบบหน้าบ้าน (Front End) จะใช้ ASP.NET ในการพัฒนาเว็บไซต์โดยเป็นรูปแบบการพัฒนาแบบ Web Forms ดังรูปที่ 3 โดยทางซ้าย ผู้ดูแลระบบจะทำการเตรียมข้อสอบ จากนั้นคัดเลือกข้อสอบแต่ละข้อ เข้าสู่ชุดข้อสอบ พร้อมกับนำข้อมูล นนอ. ชั้นปีที่ 5 ที่จะสอบเข้าระบบ จากนั้นดำเนินการสร้าง Test Plan ซึ่งจะสามารถเลือกชุดข้อสอบ จากที่เคยสร้างไว้พร้อมกับกำหนดค่าว่า จะมีการสุ่มข้อคำถาม การสลับตัวเลือกของคำตอบ



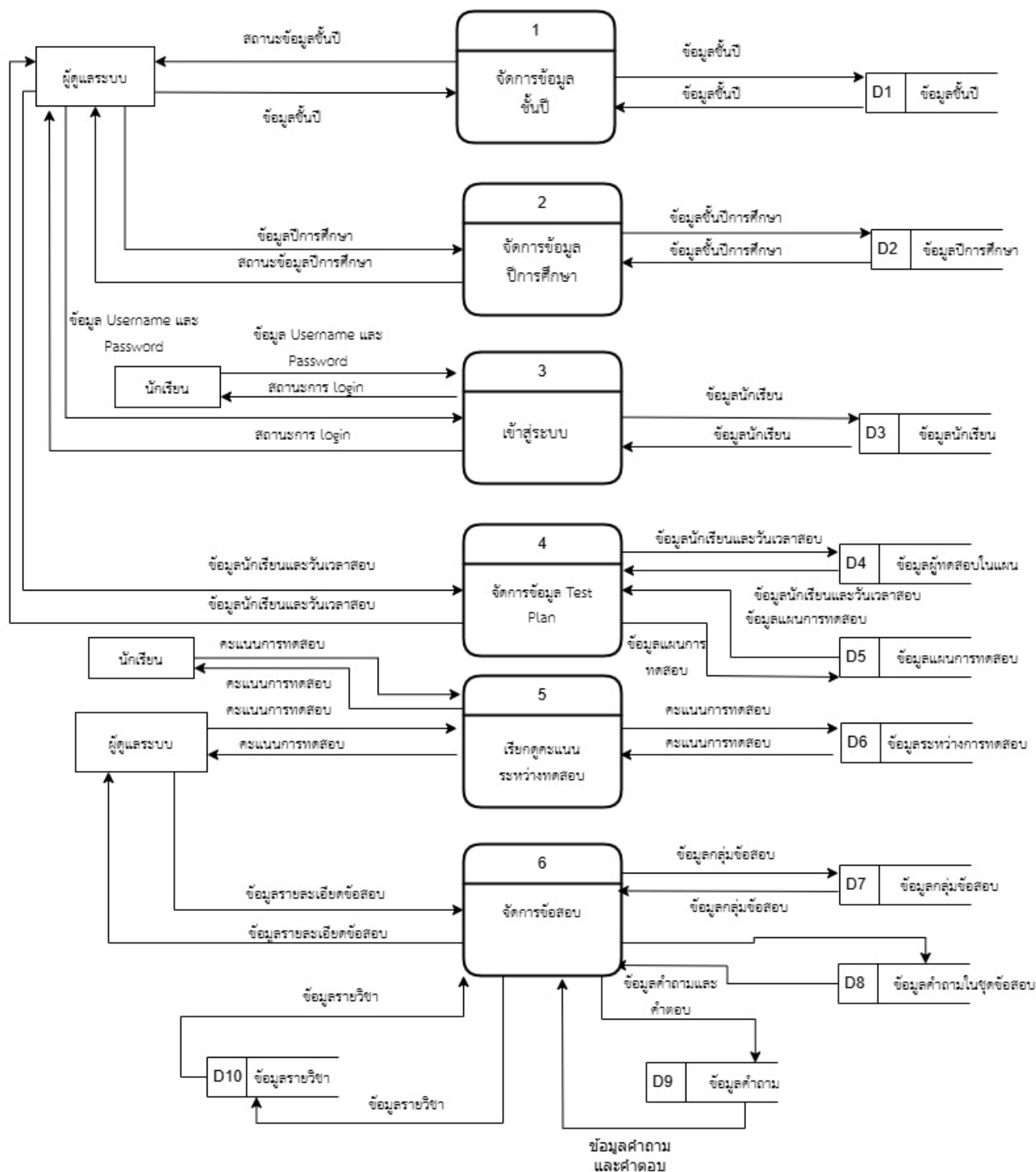
รูปที่ 3 ภาพรวมระบบที่ออกแบบจนจบกระบวนการ

ทางทีมผู้วิจัยได้ทำการออกแบบ Context Diagram เพื่อดูภาพรวมของระบบพบว่า มีผู้ใช้งานที่เกี่ยวข้อง 2 ส่วน ได้แก่ ผู้ดูแลระบบ และนักเรียน



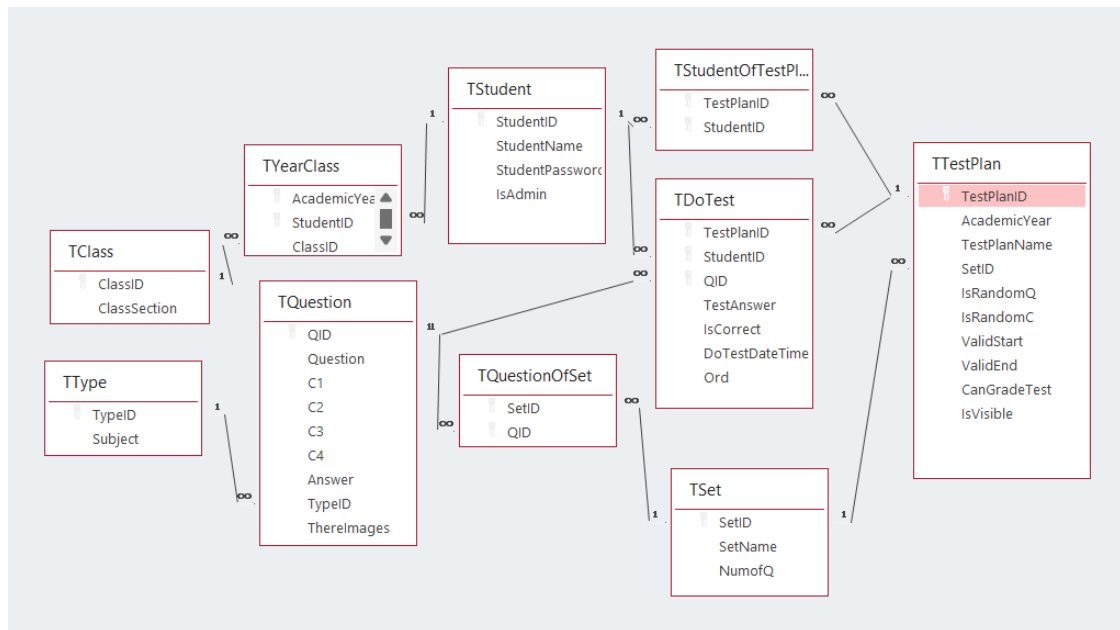
รูปที่ 4 Context Diagram ของระบบประเมินความสามารถด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ

ทางทีมผู้วิจัยได้ทำการออกแบบแผนภาพกระแสข้อมูลของระบบ โดยมีกระบวนการหลัก ๆ ทั้งหมด 6 กระบวนการ ได้แก่ จัดการข้อมูลชั้นปี จัดการข้อมูลปีการศึกษา เข้าสู่ระบบ จัดการข้อมูล Test Plan เรียกดูคะแนนระหว่างทดสอบ และจัดการข้อสอบ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดง Data Flow Diagram ของระบบประเมินความสามารถด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ

ทางที่ผู้วิจัยได้นำข้อมูลจาก Data Flow Diagram ไปเขียนเป็น ER Diagram ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงตาราง ER Diagram

ตารางที่ 1 แสดงการเก็บข้อมูลตารางของระบบ

ชื่อตาราง	การเก็บข้อมูล
TClass	เก็บข้อมูลชั้นปีของนักเรียนนายเรืออากาศที่ทำการสอบ
TYearClass	เก็บข้อมูลปีการศึกษาของนักเรียนนายเรืออากาศ
TStudent	เก็บข้อมูลรายชื่อนักเรียนนายเรืออากาศ
TStudentOfTestPlan	เก็บข้อมูลผู้ทดสอบในแผน
TTestPlan	เก็บข้อมูลแผนการทดสอบ
TDoTest	เก็บข้อมูลสำหรับผู้ดูแลระบบดูในระหว่างการทดสอบ
TSet	เก็บข้อมูลชนิดกลุ่มข้อสอบ
TQuestionOfSet	เก็บข้อมูลคำถามและชุดคำถาม
TQuestion	เก็บข้อมูลคำถามและคำตอบ
TType	เก็บข้อมูลรายวิชา

4.2 การพัฒนาระบบ

โดยหลังจากที่ได้ออกแบบทั้ง Context Diagram เพื่อดูระบบโดยรวมจากนั้นที่ผู้วิจัยได้ลงรายละเอียดการไหลของกระแสข้อมูลด้วยผัง Data Flow ต่อจากนั้นนำไปออกแบบระบบฐานข้อมูลเพื่อการจัดเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบ เพื่อให้เกิดความรวดเร็วและให้บริหารจัดการง่ายจึงสร้าง Microsoft Access Form ใช้งาน ดังรูปที่ 5 เพื่อนำเข้าข้อมูลข้อสอบแบบตัวเลือก ที่สามารถใส่รูปภาพได้ โดยเน้นความเข้าใจง่าย โดยที่ผู้ดูแลระบบที่ไม่ค่อยชำนาญด้านคอมพิวเตอร์ก็สามารถใช้งานได้

TQuestion

QID

Question

C1

C2

C3

C4

Answer

TypeID

☐ มีรูปภาพในข้อนี้

รูปที่ 7 แสดงฟอร์มการนำเข้าข้อมูลข้อสอบแบบตัวเลือก

เมื่อนำเข้าชุดข้อสอบเรียบร้อยแล้วจะมีการเลือกชุดข้อสอบโดยข้อสอบจะมีทั้งหมด 4 รายวิชา ได้แก่ เทคโนโลยีสารสนเทศ คอมพิวเตอร์เบื้องต้น สงครามไซเบอร์ การเขียนโปรแกรมเบื้องต้น ตามมาตรฐานของระบบประกันคุณภาพการศึกษา EdPEx โดยการนำเข้าข้อสอบนี้สามารถนำเข้าได้แบบสุ่มตามจำนวนข้อที่ต้องการ ดังรูปที่ 8

ชุดข้อสอบ *ถ้ามีนักเรียนสอบข้อสอบชุดนี้ไปบ้างแล้ว ก็ไม่ควรแก้ไขข้อสอบของข้อสอบชุดนี้

Subject

Question

ข้อสอบที่เพิ่มเข้ามาแล้ว

คอมพิวเตอร์เบื้องต้น	Microsoft Excel การอ้างอิงเซลล์ \$B5 หมายความว่าอย่างไร	Del
คอมพิวเตอร์เบื้องต้น	Microsoft PowerPoint เมื่อต้องการเพิ่มภาพนิ่ง (Slide) จะใช้คำสั่งใด	Del
คอมพิวเตอร์เบื้องต้น	option button กับ check box ต่างกันอย่างไร	Del
คอมพิวเตอร์เบื้องต้น	Word Art คืออะไร	Del
คอมพิวเตอร์เบื้องต้น	ก่อนที่เราจะปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ทุกครั้งต้องใช้คำสั่งใดเป็นอันดับสุดท้าย	Del
คอมพิวเตอร์เบื้องต้น	การเปิดเอกสารเก่าขึ้นมาใช้งาน ใช้คำสั่งใด	Del
คอมพิวเตอร์เบื้องต้น	ข้อใดคือคุณสมบัติที่สำคัญของโปรแกรม Microsoft Excel	Del
คอมพิวเตอร์เบื้องต้น	ข้อใดเป็นชื่อของพจนานุกรมโครงการพจนานุกรมมาตรฐานราชการไทย	Del
คอมพิวเตอร์เบื้องต้น	ข้อใดผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ 5*2+(8/2)	Del
คอมพิวเตอร์เบื้องต้น	คลิกที่เพิ่ม > จบการทำงาน คือขั้นตอนใด	Del
คอมพิวเตอร์เบื้องต้น	คอมพิวเตอร์คืออะไร	Del
คอมพิวเตอร์เบื้องต้น	คำสั่ง Save กับ Save As เหมือนหรือต่างกันอย่างไร	Del
คอมพิวเตอร์เบื้องต้น	เครื่องหมายการคำนวณในข้อใดสำคัญเป็นลำดับแรก	Del
คอมพิวเตอร์เบื้องต้น	ข้อใดไฟล์หรือโฟลเดอร์ต่อไปนี้ ข้อใดใช้ไม่ได้	Del

Record: 1 of 70 No Filter Search

รูปที่ 8 แสดงการนำเข้าข้อสอบจากคลังข้อสอบรายวิชา

เมื่อดำเนินการนำเข้าข้อสอบจากคลังข้อสอบแล้ว หลังจากนั้นจะดำเนินการสร้าง Test Plan ขึ้นมาแล้วนำเข้าข้อมูลนักเรียนชั้นปีที่ 5 ที่พร้อมสอบเข้า Test Plan โดยสามารถนำเข้าทีละคน หรือนำเข้าแบบกลุ่มได้เลย ดังรูปที่ 9

TestPlanName PlanICT63คต.(2020) 2020

เพิ่มทีละคน Add

เพิ่มทีละขั้นตอน 5-คต. Add

รายชื่อคนที่สามารถสอบตามแผน

StudentID	StudentName	
6937 กานต์นธิ ทองดี		Del
6940 เพลิมชัย ยิ่งยงยุทธนา		Del
6923 ชวพงษ์ ขุนสูงเนิน		Del
6918 ชุตติวิทย์ ปิ่นแก้ว		Del
6898 ณัฐสิทธิ์ โคตะโน		Del
6916 ตะวันรุ่ง ศรีประดัด		Del
6919 ธนภฤต จันทลีลา		Del
6930 ธนดล อินทียโกเศศ		Del
6881 ปฏิพัทธ์ ลำนมญูมิ		Del
6925 พิชญนศ รุณโฮสง		Del
6856 กุเบศ เมืองอินทร์		Del
6922 ภูวนาท โพธิ์อะ		Del
6924 มารวย เขาวนรัตน์		Del

Record: 1 of 19 No Filter Search

รูปที่ 9 แสดงการนำเข้านำเข้าข้อมูลนักเรียนสู่ Test Plan

หลังจากที่ได้ทำการเตรียมข้อมูลนักเรียนที่พร้อมสอบ เตรียมข้อมูลข้อสอบ เลือกข้อสอบและสร้าง Test Plan เพื่อเตรียมสอบ จากนั้นนำไฟล์อัปโหลดขึ้นระบบที่ทำด้วย ASP.NET เลือก Test Plan แล้วใส่เวลานัดหมายนักเรียนเพื่อทำการสอบ และแจ้งเจ้าหน้าที่ให้เตรียมห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ให้เหมาะสมกับจำนวนนักเรียนที่เข้าสอบ จากนั้นสามารถเข้าไปตั้งค่า Test Plan โดยสามารถเลือกชุดข้อสอบว่าให้สุ่มหรือตัวเลือกแบบสลับ เริ่มตั้งค่าวันเวลาที่ใช้ในการสอบ ดังรูปที่ 10

การจัดการ แผนการสอบ

เพิ่ม TestPlan (Add แล้วไปแก้ไขข้างล่าง)

TestPlanID 50 Add

จัดการ Test Plan ที่มีอยู่แล้ว

TestPlan ID	Academic Year	TestPlan Name	ชุดข้อสอบ	Random Question	Random Choice	ValidStart dd mm yyyy hh min sec	ValidEnd dd mm yyyy hh min sec	Can GradeTest	แสดงเฉพาะ ถูกเลือก	Click
49	2025	PlanICT68คต.	SetICT68คต.(70)	True	True	3 11 2024 0 0 0	30 11 2024 0 0 0	False	☒	Upd Del
48	2022	xxx	ชุดข้อสอบ ICT1(116)	True	True	1 1 1970 0 0 0	1 1 1970 0 0 0	False	☒	Upd Del
47	2022	PlanICT65วค.	SetICT65วค.(70)	True	True	1 1 1970 0 0 0	1 1 1970 0 0 0	False	☒	Upd Del
46	2022	PlanICT65คค.	SetICT65คค.(70)	True	True	1 1 1970 0 0 0	1 1 1970 0 0 0	False	☒	Upd Del
45	2022	PlanICT65วส.	SetICT65วส.(70)	True	True	1 1 1970 0 0 0	1 1 1970 0 0 0	False	☒	Upd Del
44	2022	PlanICT65วธ.	SetICT65วธ.(70)	True	True	1 1 1970 0 0 0	1 1 2023 0 0 0	False	☒	Upd Del
43	2022	PlanICT65วฟ.	SetICT65วฟ.(70)	True	True	1 1 1970 0 0 0	1 1 1970 0 0 0	False	☒	Upd Del
42	2022	PlanICT65วค.	SetICT65วค.(70)	True	True	1 1 1970 0 0 0	1 1 1970 0 0 0	False	☒	Upd Del
41	2022	PlanICT65วา.	SetICT65วา.(70)	True	True	24 1 2022 0 0 0	25 1 2022 0 0 0	False	☒	Upd Del

รูปที่ 10 หน้า Test Plan ในการกำหนดเวลาในการสอบของนักเรียนในแต่ละตอน

เมื่อได้ทำการตั้งค่าสิ่งต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว เมื่อนักเรียนเข้าสู่ระบบจะเห็นแผนการทดสอบที่จะทำการสอบ เมื่อนักเรียนกด Go ระบบจะดำเนินการทำการทดสอบ ดังรูปที่ 11

แผนการสอบที่เปิดไว้ให้ท่าน

1. PlanICT68คต. (2025 - Opened from 3/11/2567 to 30/11/2567) Go

รูปที่ 11 หน้าต่างแสดงเมื่อข้อมูลนักเรียนเข้าสู่ระบบแล้วพบกับ Test Plan

เมื่อนักเรียนเข้าทำการทดสอบจะเห็นหน้าจอการทดสอบและข้อสอบจะแสดงผลทีละ 5 ข้อ จนข้อสุดท้ายซึ่งในระหว่างที่ทำการทดสอบจะสามารถกดบันทึกไปจนจบกระบวนการ ดังรูปที่ 12

ตั้งโปรแกรม กังวลไหม เวลาปัจจุบันที่โหลดหน้า : 26/11/2567 13:37:25
PlanICT68คต. (2025 - Valid from 3/11/2567 to 30/11/2567) (ผ่านแล้ว /0 ข้อ) Page 1/0

1. คลิ๊กที่แฟ้ม > จบการทำงาน คือขั้นตอนใด
 - ☐ a. ออกจากโปรแกรม PowerPoint
 - ☐ b. บันทึกงานที่ทำเสร็จแล้ว
 - ☐ c. ดูปุ่มมองก่อนการนำเสนอ
 - ☐ d. เปิดโปรแกรมทำงาน
2. ช่องทางการสื่อสารไร้สายประเภทใดที่สามารถเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ได้สะดวก ไม่ต้องติดตั้งสายสัญญาณ เหมาะกับการส่งข้อมูลในระยะใกล้ แต่ไม่สามารถส่งผ่านสิ่งกีดขวางได้ ?
 - ☐ a. ดาวเทียม (Satellite)
 - ☐ b. อินฟราเรด (Infrared)
 - ☐ c. ไมโครเวฟ (Microwave)
 - ☐ d. เซลลูลาร์ (Cellular)
3. Microsoft Excel การอ้างอิงเซลล์ \$B5 หมายความว่าอย่างไร
 - ☐ a. แถวคงที่คอลัมน์คงที่
 - ☐ b. แถวคงที่คอลัมน์เปลี่ยนแปลง
 - ☐ c. แถวเปลี่ยนแปลงคอลัมน์คงที่
 - ☐ d. ระบุแถวและคอลัมน์ไม่ถูกต้อง
4. ซอฟต์แวร์สเปรดชีต ได้แก่โปรแกรมอะไร
 - ☐ a. ไมโครซอฟท์เวิร์ด
 - ☐ b. ไมโครซอฟท์เวิร์ด
 - ☐ c. ไมโครซอฟท์เพาเวอร์พอยต์
 - ☐ d. ไมโครซอฟท์เอกเซล
5. คณะกรรมการพัฒนามาตรฐาน IEEE 802.11b โดยใช้คลื่นความถี่ในย่านใด
 - ☐ a. 2.4 GHz
 - ☐ b. 3 GHz
 - ☐ c. 5 GHz
 - ☐ d. 3.5 GHz

Save

รูปที่ 12 แสดงหน้าจอการทำข้อสอบของนักเรียน

5. ผลการวิจัย

ได้ทำการประเมินความพึงพอใจโดยแยกการประเมินเป็น 2 แบบ คือ ประเมินระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ และประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน การประเมินใช้มาตรวัดแบบลิเคิร์ต 5 ระดับ (Likert rating Scale) [9] โดยมีรายละเอียดการวัดและการแปลผลดังตารางที่ 2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 รายละเอียดมาตรฐานวัดแบบลิเคิร์ต

ระดับ	การแปลผล
4.50 - 5.50	ดีมาก
3.50 - 4.49	ดี
2.50 - 3.49	พอใช้
1.50 - 2.49	น้อย
0.00 - 1.49	ควรปรับปรุง

โดยการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญใช้ผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่านประเมินระบบโดยมีรายการประเมิน 5 ด้าน ดังตารางที่ 3 ที่มีรายการประเมิน ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3 รายการประเมินระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ

รายการประเมินระบบ	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	แปลผล
1.ด้านความครบถ้วนของข้อมูลระบบ	3.2	0.40	พอใช้
2.ด้านประสิทธิภาพในการตอบสนองของระบบ	4	0.89	ดี
3.ด้านความปลอดภัยของระบบ	4.6	0.49	ดี
4.ด้านความเร็วในการแสดงผลของระบบ	3.48	0.75	พอใช้
5.ด้านความสวยงามของระบบ	3.48	0.40	พอใช้
รวม	3.75	0.57	ดี

จะเห็นได้ว่าด้านความปลอดภัยของระบบมีค่าเฉลี่ย 4.6 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.49 ซึ่งมีค่ามากที่สุด เนื่องจากใช้ระบบ Intranet ภายในของกองทัพอากาศ ส่วนที่ได้คะแนนน้อยที่สุดคือ ด้านความครบถ้วนของข้อมูลระบบ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.2 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.40 เนื่องจากข้อมูลสาขาของนักเรียนแต่ละคนในการทดสอบอาจมีนักเรียนบางส่วนติดภารกิจทางทหารทำให้ตกหล่นและต้องมีการสอบภายหลังจึงทำให้ข้อมูลส่วนนี้อาจจะไม่เหมือนในสาขาที่ตนเองเรียน ในส่วนต่อมา รายการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบจากผู้ใช้งานระบบ 765 คน จากปีการศึกษา 2560 – 2567 ดังตารางที่ 4 ได้ทำการเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง คือ นักเรียนนายเรืออากาศ ชั้นปีที่ 5 ทุกสาขาวิชา

ตารางที่ 4 แสดงรายการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบจากจำนวนประชากร 765 คน

รายการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบ	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	แปลผล
1.ด้านความสวยงามของระบบ	2.81	0.39	ควรปรับปรุง
2.ด้านการจัดรูปแบบที่ง่ายต่อการใช้งาน	3.05	0.68	พอใช้
3.ด้านการตอบสนองของระบบ	4.06	0.24	ดี
4.ด้านความสะดวกต่อผู้ใช้งาน	4.64	0.48	ดี
5.ด้านความพึงพอใจในภาพรวม	3.48	0.50	พอใช้
รวม	3.60	0.46	พอใช้

จะเห็นได้ว่าด้านความสะดวกต่อผู้ใช้งานมีค่าคะแนนเฉลี่ยมากที่สุด 4.64 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.48 เนื่องจากการออกแบบให้มีความเข้าใจและง่ายต่อการใช้งานไม่มีความซับซ้อน และด้านความสวยงามของระบบมีค่าคะแนนเฉลี่ย 2.81 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.39 ซึ่งค่อนข้างต่ำกว่าด้านอื่น ๆ เนื่องมาจากไม่ได้ใส่ CSS ในการออกแบบหน้าเว็บเพราะต้องการใช้เว็บแอปพลิเคชันทำงานได้อย่างรวดเร็วและใช้เวลาในการโหลดข้อมูลให้น้อยที่สุดเน้นการตอบสนองรวดเร็วเป็นสำคัญ

6. อภิปรายผลการวิจัย

จากการวิจัยได้ดำเนินการสอบมาทั้งหมด 7 ปี ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2560 – 2567 โดยมีนักเรียนเข้าทำการทดสอบจำนวน 765 คน โดยมีทั้งหมด 7 สาขาวิชา ดังตารางที่ 5 และการทดสอบตลอด 7 ปี เป็นไปอย่างเรียบร้อยดีตลอดมา ตัวระบบมีความเสถียรและทนทานต่อการใช้งาน จะเห็นได้ว่าจากรายการประเมินความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญด้านระบบ คะแนนค่าเฉลี่ย 3.75 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.57 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดี แต่ในส่วนของการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบ คะแนนค่าเฉลี่ย 3.60 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.46 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์พอใช้ แสดงว่าระบบยังต้องดำเนินการพัฒนาต่อยอดให้มีความสมบูรณ์ต่อไป

ตารางที่ 5 แสดงผู้เข้าทดสอบตั้งแต่ปีการศึกษา 2560 - 2567

สาขาวิชา	ปีการศึกษา							
	2560	2561	2562	2563	2564	2565	2566	2567
วิศวกรรมอากาศยาน (วอ.)	12	10	18	16	20	21	19	14
วิศวกรรมเครื่องกล (วก.)	8	8	10	8	15	16	14	10
วิศวกรรมไฟฟ้า (วฟ.)	12	14	10	16	20	20	20	14
วิศวกรรมโยธา (วธ.)	8	8	8	8	12	10	10	7
วิศวกรรมอุตสาหการ (วบ.)	10	8	18	8	20	20	20	18
คอมพิวเตอร์ (คต.)	14	13	18	19	20	20	20	20
วัสดุศาสตร์ (วด.)	8	8	8	8	15	10	10	8
รวม	72	69	90	83	123	124	113	91

7. สรุปผล

จากการพัฒนาระบบประเมินความสามารถทางสารสนเทศสำหรับนักเรียนนายเรืออากาศชั้นปีที่ 5 นั้น เป็นไปตามความต้องการที่โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ต้องการและตอบโจทย์ให้กับระบบเกณฑ์คุณภาพการศึกษาตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ตั้งไว้ แม้ว่าจะมีข้อจำกัดทางด้านความเสถียรของระบบอินเทอร์เน็ตแต่ก็สามารถใช้ในทดสอบนักเรียนนายเรืออากาศได้เป็นอย่างดี

8. ข้อเสนอแนะ

ถ้าในอนาคตงานวิจัยนี้มีการต่อยอดสามารถเพิ่มเติมในส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูลข้อสอบที่ทำการสอบ เพื่อวิเคราะห์ว่าข้อสอบแต่ละข้อมีความยากง่ายและมีอำนาจในการจำแนกได้ต่อไปในอนาคต

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Phuangsuwan, S. Siripipatthanakul, R. Suttipong and S. Praesri, "Development of Higher Education Institutions Based on Education Criteria for Performance Excellence (EdPEX) in Thailand," *Advance Knowledge for Executives*, vol. 3, no. 1, pp. 1-14, May, 2024.
- [2] D. R. Krathwohl, *A Revision Bloom's Taxonomy: An Overview*, Ohio State University: Taylor & Francis, 2002.
- [3] V. M. Bradley, "Learning Management System (LMS) Use with Online Instruction," *International Journal of Technology in Education*, vol. 4, no. 1, pp. 68-92, 2021.
- [4] เสาวนีย์ ปรัชญาเกรียงไกร, จุฑามาส ศิริอังกูรวาณิช และ สุปราณี ห้อมมา, "การพัฒนาระบบสนับสนุนการจัดทดสอบและการประเมินผลออนไลน์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรธานี*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 1, หน้า 83-103, มกราคม-เมษายน, 2567.
- [5] พระครูศรีสิทธิบัณฑิต และ อภิชาติ รอดนิยม, "การพัฒนาแพลตฟอร์มการวัดและประเมินผลออนไลน์ รายวิชา ข้อสอบกลาง มหาวิทยาลัยมหาจุฬาลงกรณราชวิทยาลัย," *วารสาร มจร ปรัชญาปริทรรศน์*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 1, หน้า 176-186, มกราคม-มิถุนายน, 2567.
- [6] นิติ ทองดิงามเลิศ, ศรีนัยพร ชัยวิศิษฐ์ และวัธสาตรี ดิถียนต์, "การศึกษาผลการใช้บทเรียน e-learning ร่วมกับการบริหารจัดการเรียนรู้แบบสืบเสาะหาความรู้ต่อความเข้าใจของผู้เรียน เรื่อง คุณธรรมจริยธรรมการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร," *วารสารเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 22, หน้า 59-70, เมษายน-มิถุนายน, 2567.
- [7] S. Ninoriya, P.M. Chawan and B.B. Meshram, "CMS, LMS and LCMS for e-Learning," *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, vol. 8, no. 2, pp. 644, March, 2011.
- [8] P. Bua-ngam and S. Thanompolkrang, "The Application of Line BOT and Encryption Techniques in Securing Data from Screen Capturing of Online Social Media Conversations," *Journal of Information Science Research and Practice*, vol. 42, no. 4, pp. 102-116, October-December, 2024.
- [9] K. A. and K. N. "The Likert scale what it is and how to use it." USA: Phalanx , 2017, 32-39.

การตรวจวัดสารระเหยจากการคั่วเมล็ดกาแฟด้วยเครื่องมือสำหรับตรวจวัดคุณภาพอากาศ ชนิดพกพา

Measuring of Volatile Compound from Roasting of Coffee Beans Using Portable Air Quality Device

พลาธิป คัคโนภาส^{1*} และ นภัสนันท์ เขียวเขว้า²

¹ภาควิชาเคมี-ฟิสิกส์ กองวิชาวิทยาศาสตร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

²ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Palathip Kakanopas^{1*} and Napassanan Khiawkhwa²

¹Chemistry-Physics Department Sciences Division, Academic Faculty,
Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

²Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University
palathip_ka@rtaf.mi.th

Received 16 January 2025

Revised 17 March 2025

Accepted 25 March 2025

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับการจำหน่ายเครื่องคั่วกาแฟเกิดขึ้นทั่วประเทศไทยอย่างแพร่หลาย ทำให้เกิดการแข่งขันทางการค้าสูง ผู้ประกอบการจึงมีการลงทุนตกแต่งสถานที่ให้มีบรรยากาศที่สวยงาม มีสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ราคาที่สมเหตุสมผลเพื่อดึงดูดผู้บริโภคให้มาใช้บริการ แต่อีกหนึ่งปัจจัยสำคัญคือการคั่วเมล็ดกาแฟแต่ละสายพันธุ์ให้มีความเหมาะสม ซึ่งจะส่งผลต่อรสชาติโดยตรง จึงมีการพัฒนากรรมวิธีมากมายในการผลิตและการคั่วเมล็ดกาแฟเพื่อให้ได้กลิ่นและรสชาติที่กลมกล่อม ซึ่งเทคนิคที่นิยมใช้วิเคราะห์กลิ่นหรือสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ได้จากการคั่วเมล็ดกาแฟ คือ แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) แต่เทคนิคดังกล่าวต้องการผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์และมีราคาแพง จึงไม่เหมาะกับผู้ประกอบการรายย่อยทั่วไป ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิคการตรวจวัดสารระเหยจากการคั่วเมล็ดกาแฟ (อาราบิก้า โรบัสต้า และลิบัส) ด้วยเครื่องมือสำหรับตรวจวัดคุณภาพอากาศชนิดพกพา เพื่อให้ผู้ประกอบการรายย่อยสามารถพัฒนาและตรวจสอบคุณภาพเมล็ดกาแฟได้ตามต้องการ โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณระหว่างเทคนิคที่ใช้เครื่องมือตรวจวัดคุณภาพอากาศชนิดพกพา และแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่ามีค่า $R^2 = 0.9792$

คำสำคัญ: การตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย, การคั่วเมล็ดกาแฟ, กลิ่นของกาแฟ, การวิเคราะห์เชิงปริมาณ, เครื่องวัดคุณภาพอากาศชนิดพกพา

Abstract

The coffee beverage industry has proliferated across Thailand, leading to intense competition. To attract customers, businesses have invested in aesthetically pleasing spaces, amenities, and affordable prices. However, another crucial factor is the roasting of coffee beans to achieve the right aroma, which directly influences the taste. Various methods have been developed for roasting coffee beans to obtain a harmonious flavor profile. Gas chromatography is a popular technique for analyzing the volatile organic compounds produced during roasting, but it requires specialized expertise and is costly, making it unsuitable for small-scale businesses. This research aimed to develop a technique for measuring volatile compounds from roasted coffee beans (Arabica, Robusta and Civet coffee) using portable air quality device. This would enable small-scale businesses to develop and assess the quality of their coffee beans as needed. A comparison of quantitative analysis results between the portable air quality monitor and gas chromatography revealed a correlation coefficient (R^2) of 0.9792.

Keywords: Volatile Organic Compounds Measurement, Coffee Bean Roasting, Coffee Aroma, Quantitative Analysis, Portable Air Quality Device

1. บทนำ

กาแฟเป็นเครื่องดื่มที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคอย่างมาก เนื่องจากเป็นเครื่องดื่มที่มีส่วนผสมของคาเฟอีนซึ่งจะออกฤทธิ์กระตุ้นประสาท ทำให้ภายหลังจากดื่มกาแฟสามารถนั่งทำงานระหว่างวันหรือขับชี่ยานพาหนะได้โดยไม่รู้สึกร่วง อีกทั้งในปัจจุบันมีการพัฒนาสายพันธุ์เมล็ดกาแฟ กรรมวิธีในการผลิตเพื่อให้รสชาติ กลิ่น และส่วนผสมให้ตอบสนองความต้องการผู้บริโภคมากขึ้น จึงส่งผลให้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542 มีการแข่งขันการส่งออกเมล็ดกาแฟในแต่ละภูมิภาคทั่วโลกสูงถึง 6,828 กิโลกรัมและสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง [1] แต่ละผู้ประกอบการจะมีกรรมวิธีเฉพาะในการคั่วเมล็ดกาแฟเพื่อให้เมล็ดกาแฟมีกลิ่นหอมซึ่งกลิ่นของกาแฟเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อรสชาติของกาแฟ [2] โดยการคั่วเมล็ดกาแฟจะมี 3 ระดับ ได้แก่ การคั่วระดับอ่อน คั่วระดับกลาง และคั่วระดับเข้ม ซึ่งแต่ละระดับของการคั่วจะใช้ระยะเวลาและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เมล็ดกาแฟแตกออก (Cracking) และมีการปลดปล่อยกลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวของเมล็ดกาแฟที่เกิดจากสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds) เช่น Polyphenols, Amino Acids, Caffeine และส่วนที่ส่งกลิ่นหอม เช่น 4-vinylguaiacol, Guaiacol, Phenol, Indol, Furfural, Phenylacetaldehyde Methanethiol, 2-methylfuran Pyridine และ Furfural โดยระยะเวลาในการแตกออกของเมล็ดกาแฟ (Cracking Time) เป็นช่วงที่เกิดกลิ่นมากที่สุด [3, 4] เพื่อรักษาคุณภาพของกาแฟ การตรวจวัดสารระเหยจากการคั่วเมล็ดกาแฟจึงเป็นสิ่งที่ผู้ประกอบการไม่ควรละเลย

โดยปัจจุบันเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและปริมาณของสารอินทรีย์ระเหยง่ายและกึ่งระเหยง่าย (Semi Volatile Compound) คือ แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography; GC) โดยหลักการวิเคราะห์ของเทคนิคดังกล่าวจะอาศัยปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างเฟสนิ่ง (Stationary Phase) คือ สารที่เคลือบหรือบรรจุอยู่ภายในคอลัมน์ (Column) และเฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) คือ โมเลกุลของสารตัวอย่าง (Analyte) [5, 6] แต่ด้วย

เครื่องมือ GC มีราคาสูง ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์และซ่อมบำรุง จึงไม่เหมาะกับผู้ประกอบการทั่วไปที่ต้องการตรวจสอบหรือพัฒนาคุณภาพสินค้าเมล็ดกาแฟก่อนวางจำหน่าย

ดังนั้นผู้วิจัยจึงพัฒนาเทคนิคการนำเครื่องตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเครื่องมือแบบพกพาหรือเครื่องวัดคุณภาพอากาศที่วางจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาดในการศึกษาผลของระยะเวลาของการคั่วเมล็ดกาแฟต่อการปลดปล่อยกลิ่นของเมล็ดกาแฟ เพื่อลดต้นทุน สร้างความสะดวกในการวิเคราะห์ และส่งเสริมให้ผู้ประกอบการรายย่อยที่ต้องการพัฒนากรรมวิธีในการผลิตและตรวจสอบคุณภาพกลิ่นของเมล็ดกาแฟเพื่อเพิ่มมูลค่าแก่สินค้า

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 ตัวอย่างสายพันธุ์เมล็ดกาแฟที่นำมาวิเคราะห์ ได้แก่ อาราบิก้า (จากจังหวัดเชียงราย) โรบัสต้า (จากจังหวัดชุมพร) และชีแซมด (จากประเทศอินโดนีเซีย)

2.2 เครื่องมือสำหรับตรวจวัดสารระเหยชนิดพกพาที่นำมาวิเคราะห์มีวางจำหน่ายทั่วไป เป็นชนิดเซนเซอร์ตรวจวัดการกระจายของแสง ได้แก่ 1) Air Quality Monitor ZYG-101 2) KKmoom Air Quality Detector และ 3) ATO-AIR-DM502 ทุกเครื่องมือมีค่า Resolution = 0.001 mg/m³ และ Accuracy = ±0.03 mg/m³

2.3 ปริมาณการปลดปล่อยกลิ่น (mg/m³) ในการคั่วเมล็ดกาแฟเป็นระยะเวลา 50 นาที โดยมีการจดบันทึกทุกๆ 5 นาที

2.4 ปริมาณการปลดปล่อยกลิ่น (mg/m³) ในการคั่วเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิ 200 225 และ 250 °C

2.5 ปริมาณการปลดปล่อยกลิ่น (mg/m³) ในการคั่วเมล็ดกาแฟที่ถูกเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 1 4 8 และ 12 เดือน

2.6 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณระหว่างเทคนิคที่ใช้เครื่องมือตรวจวัดคุณภาพอากาศชนิดพกพา และ แก๊สโครมาโทกราฟี

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ชนิดของเมล็ดกาแฟ

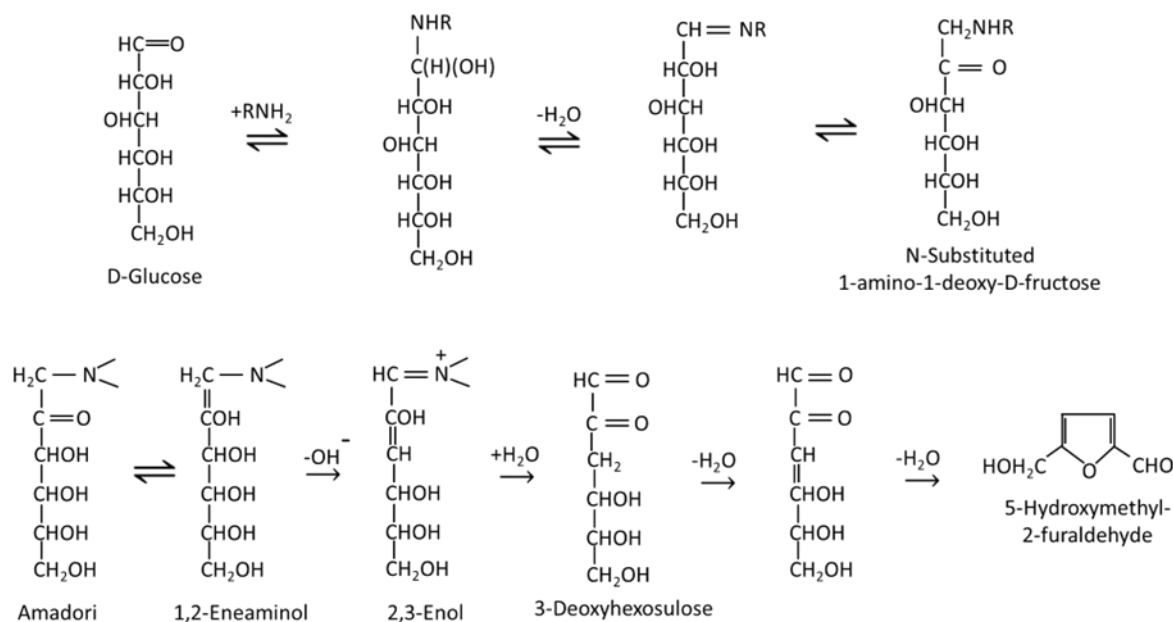
กาแฟมีสองสายพันธุ์หลัก คือ อาราบิก้าและโรบัสต้า โดยอาราบิก้า (Coffea Arabica) มีต้นกำเนิดจากเอธิโอเปีย ให้รสชาติซับซ้อนและกลิ่นหอม เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่ซับซ้อนกว่า และมีปริมาณคาเฟอีนน้อยกว่าโรบัสต้า (Coffea Canephora) ซึ่งมีต้นกำเนิดจากแอฟริกา จะให้รสชาติเข้มและขมกว่า และมีปริมาณคาเฟอีนสูงกว่า เหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการความกระปรี้กระเปร่า [7, 8] นอกจากนี้ยังมีกาแฟชีแซมด (Civet Coffee) ซึ่งได้จากมูลของชะมด (Paradoxurus Hermaphroditus) มีรสชาติเป็นเอกลักษณ์และมีราคาแพง เนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนและมีปริมาณจำกัด โดยกาแฟชีแซมดนั้นเกิดจากการที่ชะมดจะกินผลกาแฟสุกเข้าไป เอนไซม์ในกระเพาะของชะมดจะช่วยย่อยเนื้อและเปลือกของผลกาแฟ เหลือไว้แต่เมล็ดกาแฟที่ไม่ถูกย่อย จากนั้นจึงเก็บมูลชะมดที่ยังมีเมล็ดกาแฟอยู่มาล้างทำความสะอาด คั่ว และบดเพื่อนำมาชงเป็นกาแฟ ซึ่งกระบวนการนี้ส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดกาแฟ ทำให้เกิดรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์ [9]

3.2 กระบวนการคั่วเมล็ดกาแฟ

ภายหลังจากการแปรรูปเมล็ดกาแฟสุกเพื่อคัดคุณภาพและแยกสิ่งแปลกปลอมออก จะได้เป็นผลิตภัณฑ์เมล็ดกาแฟสำหรับนำไปคั่วต่อไป โดยการคั่วเมล็ดกาแฟจะเป็นการให้ความร้อนแก่เมล็ดกาแฟ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส (Pyrolysis) คือ ใช้ความร้อนไปสลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ (คาร์โบไฮเดรต น้ำตาล และโปรตีน) โดยไม่ใช้แก๊สออกซิเจน ผลที่ได้ คือ สารระเหยที่มีขนาดโมเลกุลขนาดเล็ก กลาง หรือสารให้กลิ่น [10-12]

ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) คือ ปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ซิง (Reducing Sugar) เช่น น้ำตาลคีโทส (Ketose) ฟรุคโทส (Fructose) และ ซูโครส (Sucrose) กับกรดอะมิโน (Amino Acid) หรือสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆภายในเมล็ดกาแฟที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์โดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดสีน้ำตาล กลิ่น และรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวของเมล็ดกาแฟนั้นๆ โดยขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดมีดังนี้ (รูปที่ 1)

- 1) น้ำตาลรีดิวซ์ซิง (Sugar Reducing) เป็นปฏิกิริยาที่น้ำตาลซูโครสรวมตัวกับหมู่อะมิโนได้เป็นไกลโคซิลามีน (Glycosylamine)
- 2) ปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) ทำให้โมเลกุลของน้ำตาลหลุดออกจากไกลโคซิลามีนกลายเป็นอิมีน (Imines) จากนั้นจึงมีการจัดเรียงโมเลกุลใหม่เป็นสารประกอบอะมาโดรี (Amadori Rearrangement) เป็นแอลโดซามีน (Aldosamine) หรือ คีโตซามีน (Ketosamine)
- 3) ปฏิกิริยาอีโนไลเซชัน (Enolization) คือ ปฏิกิริยาที่หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) เข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอะมาโดรีทำให้หมู่คีโตนถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิลได้เป็น 1,2-Eneaminol จากนั้นมีการหลุดออกของหมู่ไฮดรอกซิลกลายเป็น 3-Deoxyhexosulose
- 4) ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันได้เป็นอนุพันธ์ของสารประกอบฟูแรน (Furan) คือ 5-hydroxymethyl-2-furaldehyde (HMF) โดย HMF เป็นสารที่สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรซ์ (Polymerization) ได้เป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีสีน้ำตาลที่ไม่มีขั้ว จึงไม่สามารถละลายน้ำได้ [13, 14]



รูปที่ 1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) [15, 16]

ปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชัน (Caramelization) คือ ปฏิกิริยาเช่นเดียวกับไพโรไลซิสที่น้ำตาลซูโครสและคาร์โบไฮเดรตสลายตัวจากความร้อนเป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็กลง ผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับกรดอะมิโน (ปฏิกิริยาเมลลาร์ด) อีกส่วนหนึ่งจะรวมตัวกันเป็นพอลิเมอร์ (ปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชัน) ที่ให้รสชาติต่างๆ (หวาน เปรี้ยว และขม) และกลิ่นน้ำตาลไหม้ [15-17]

3.3 การวิเคราะห์สารระเหยในเมล็ดกาแฟ

Puviprom, J. et al. [18] วิเคราะห์สารระเหยที่สกัดจากเมล็ดกาแฟโรบัสต้าของไทยที่ผ่านการอบ 15 นาที ด้วยอุณหภูมิ 240 °C ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas-chromatography-mass Spectrometry; GC-MS) HP-6890 คอลัมน์ HP-Innowax 60 เมตร $\times$ 0.25 มิลลิเมตร $\times$ 0.25 ไมโครเมตร อุณหภูมิ

เริ่มต้น 40 °C อุณหภูมิสุดท้าย 220 °C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 3 °C/min โดยใช้ฮีเลียมเป็นแก๊สตัวพา อัตราการไหล 40 cm³/s พบสารระเหย 52 ชนิด ได้แก่ ไพราซีน (Pyrazine) ฟูแรน (Furan) ฟีนอล (Phenol) ไพร์โรล (Pyrrole) คีโตน (Ketone) อัลดีไฮด์ (Aldehyde) เป็นต้น

G. H. Lee. et al. [19] วิเคราะห์กลิ่นที่ได้จากการคั่วเมล็ดกาแฟด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์การดม (Sniff Port) คือ Gas-Chromatography-Olfactometry (GCO) โดยใช้ดีเทคเตอร์ชนิด Flame Ionization Detector (FID) ซึ่งเทคนิคนี้ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับการดมกลิ่นกาแฟมาทดสอบการดม พบว่าสารระเหยที่ให้กลิ่นที่ส่งผลต่อกลิ่นกาแฟได้แก่ 2,3-pentanedione และ 2-ethyl-3,5- Dimethylpyrazine เป็นต้น

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 การศึกษาระยะเวลาในการคั่วเมล็ดกาแฟ

4.1.1 ชั่งเมล็ดกาแฟ อาราบิก้า โรบัสต้า และซี้แซมด ชนิดละ 10 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร

4.1.2 ติดตั้งเครื่องมือการจำลองการคั่วเมล็ดกาแฟ (รูปที่ 2) โดยใช้เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (Hotplate Stirrer) (MI0102003, Four E's Scientific, China) ในการให้ความร้อนแก่เมล็ดกาแฟ วางเครื่องมือสำหรับตรวจวัดสารระเหยชนิดพกพาเหนือบีกเกอร์ เพื่อตรวจวัดปริมาณการปลดปล่อยกลิ่นของเมล็ดกาแฟที่ระยะเวลาต่างๆ

4.1.3 เมื่ออุณหภูมิของ Hotplate Stirrer บันทึกราคาที่อ่านได้จากเครื่องมือที่เวลา 5-50 นาที

4.1.4 ทำการทดลองซ้ำโดยใช้เครื่องมือสำหรับตรวจวัดสารระเหยชนิดพกพา 1) Air Quality Monitor ZYG-101 2) KKmoom Air Quality Detector และ 3) ATO-AIR-DM502 โดยทำการทดลองในห้องปิดที่มีค่าฝุ่น 30-40 µg/m³

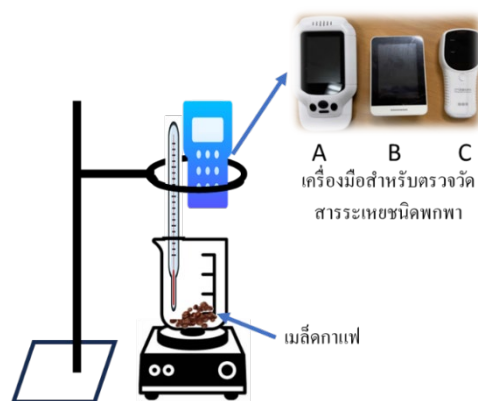
4.2 การศึกษาอุณหภูมิในการคั่วเมล็ดกาแฟที่เวลา 50 นาที

4.2.1 ชั่งเมล็ดกาแฟ อาราบิก้า โรบัสต้า และซี้แซมด ชนิดละ 10 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร

4.2.2 ติดตั้งเครื่องมือการจำลองการคั่วเมล็ดกาแฟ (รูปที่ 2) โดยใช้ Hotplate Stirrer ให้ความร้อนแก่เมล็ดกาแฟ วางเครื่องมือสำหรับตรวจวัดสารระเหยชนิดพกพาเหนือบีกเกอร์ 5 เซนติเมตร เพื่อตรวจวัดปริมาณการปลดปล่อยกลิ่นของเมล็ดกาแฟที่ระยะเวลาต่างๆ

4.2.3 บันทึกค่าสัญญาณที่อ่านได้จากเครื่องมือที่อุณหภูมิ 200 225 และ 250 °C

4.2.4 ทำการทดลองซ้ำโดยใช้เครื่องมือสำหรับตรวจวัดสารระเหยชนิดพกพา 1) Air Quality Monitor ZYG-101 2) KKmoom Air Quality Detector และ 3) ATO-AIR-DM502 โดยทำการทดลองในห้องระบบปิดที่มีค่าฝุ่นอยู่ในช่วง 30-40 µg/m³



รูปที่ 2 การติดตั้งเครื่องมือการคั่วเมล็ดกาแฟโดยเครื่องมือสำหรับตรวจวัดสารระเหยชนิดพกพา (A) Air Quality Monitor ZYG-101 (B) KKmoom Air Quality Detector และ (C) ATO-AIR-DM502

4.3 การศึกษาระยะเวลาการเก็บรักษาเมล็ดกาแฟหลังจากการคั่ว

4.3.1 ชั่งเมล็ดกาแฟ อาราบิก้า โรบัสต้า และชีซะมด ชนิดละ 10 กรัม ลงในภาชนะปิดสนิทพร้อมใส่สารดูดความชื้น

4.3.2 เก็บเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 1 4 8 และ 12 เดือน

4.3.3 ติดตั้งเครื่องมือการจำลองการคั่วเมล็ดกาแฟ (รูปที่ 2) โดยใช้ Hotplate Stirrer ให้ความร้อนแก่เมล็ดกาแฟ วางเครื่องมือสำหรับตรวจวัดสารระเหยชนิดพกพาเหนือบีกเกอร์ 5 เซนติเมตร เพื่อตรวจวัดปริมาณการปลดปล่อยกลิ่นของเมล็ดกาแฟที่ระยะเวลาต่างๆ

4.3.4 บันทึกค่าสัญญาณที่อ่านได้จากเครื่องมือที่อุณหภูมิ 250 °C

4.3.5 ทำการทดลองซ้ำโดยใช้เครื่องมือสำหรับตรวจวัดสารระเหยชนิดพกพา 1) Air Quality Monitor ZYG-101 2) KKmoom Air Quality Detector และ 3) ATO-AIR-DM502 โดยทำการทดลองในห้องระบบปิดที่มีค่าฝุ่นอยู่ในช่วง 30-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

4.4 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณระหว่างเทคนิคที่ใช้เครื่องมือตรวจวัดคุณภาพอากาศชนิดพกพา และแก๊สโครมาโทกราฟี

4.4.1 ชั่งเมล็ดกาแฟ อาราบิก้า 10 กรัมลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร

4.4.2 ติดตั้งเครื่องมือการจำลองการคั่วเมล็ดกาแฟ (รูปที่ 2) โดยใช้ Hotplate Stirrer ให้ความร้อนแก่เมล็ดกาแฟ 250 °C เป็นระยะเวลา 5-50 นาที

4.4.3 นำเมล็ดกาแฟที่คั่วแล้วมาใส่ในภาชนะปิด

4.4.4 นำกระบอกฉีดยาขนาด 5 มิลลิลิตร ดูดสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่บริเวณเหนือเมล็ดกาแฟ 3 เซนติเมตร

4.4.6 ฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี (JMS-T200GC) คอลัมน์ ZB-WAX, 30 m x 0.18 mm, 0.18 mm อุณหภูมิเริ่มต้น 40 °C (3 min) อุณหภูมิสุดท้าย 250 °C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Ramp Rate) 30 °C/min

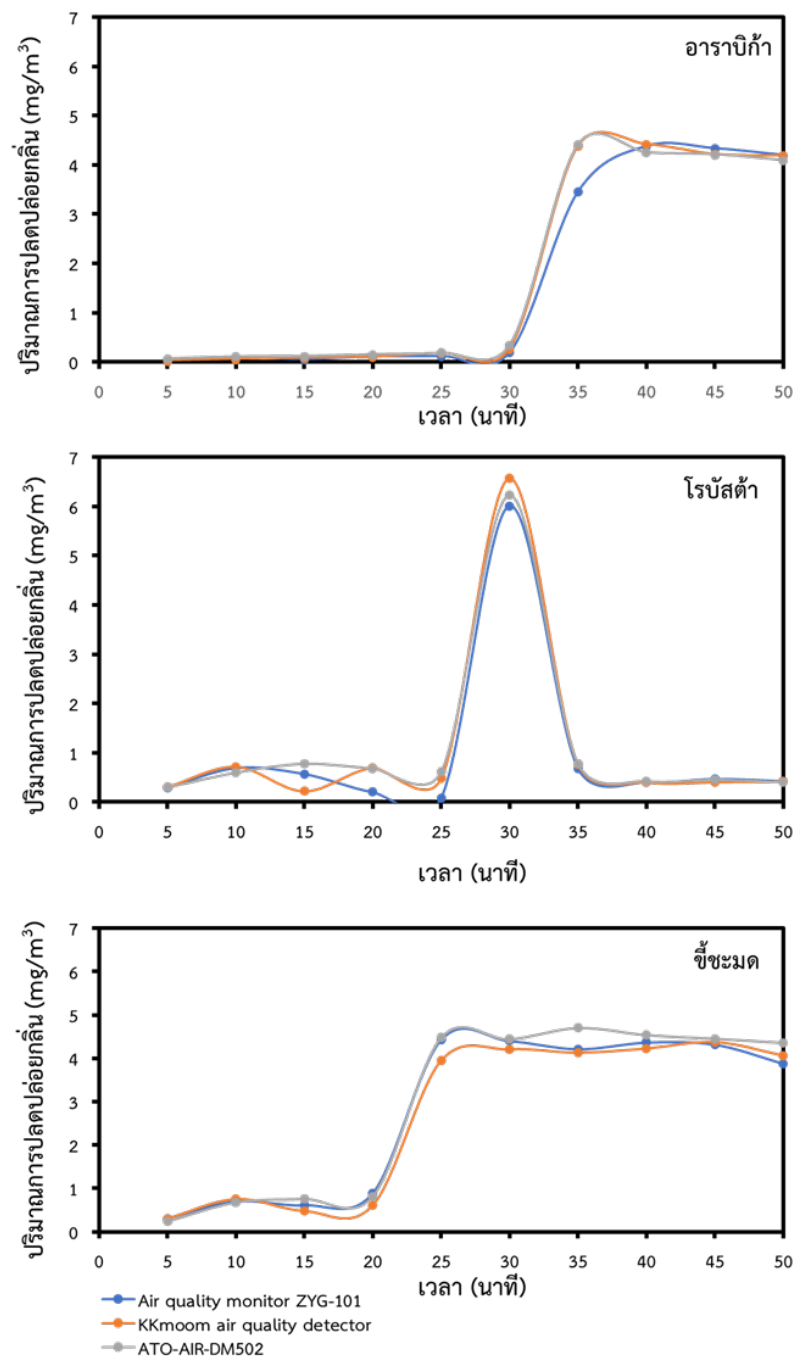
5. ผลการวิจัย

5.1. ระยะเวลาในการคั่วเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิ 250 °C

จากการศึกษาระยะเวลาในการคั่วเมล็ดกาแฟอาราบิก้า โรบัสต้า และชีซะมด ด้วยเครื่อง 1) Air Quality Monitor ZYG-101 2) KKmoom Air Quality Detector และ 3) ATO-AIR-DM502 ที่อุณหภูมิ 250°C ระยะเวลา 5-50 นาที ทำซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1 และเมื่อนำค่าเฉลี่ยมาหาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณการปลดปล่อยกลิ่นและอุณหภูมิในการคั่วจะได้ผลดังรูปที่ 3 พบว่าระยะเวลาในการคั่วเมล็ดกาแฟ อาราบิก้า โรบัสต้า และชีซะมดแล้วเกิดการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่ายสูงที่สุดคือ 35 30 และ 25 นาที ตามลำดับ เมล็ดกาแฟชีซะมดจะใช้เวลาในการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่ายน้อยที่สุด เนื่องจากกรรมวิธีในการผลิตมาจากมูลของชะมด ทำให้เปลือกของเมล็ดกาแฟผ่านการย่อยโดยน้ำย่อยของชะมดมาก่อนแล้ว จึงง่ายต่อการแตกตัวเมื่อได้รับความร้อน

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยปริมาณการปลดปล่อยกลิ่น (mg/m³) ในการคั่วเมล็ดกาแฟอาราบิก้า โรบัสต้า และขี้ชะมด ด้วย
เครื่องตรวจวัดคุณภาพอากาศ ที่อุณหภูมิ 250°C ระยะเวลา 5-50 นาที

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยปริมาณการปลดปล่อยกลิ่น (mg/m ³)								
	อาราบิก้า			โรบัสต้า			ขี้ชะมด		
	Air	KKmoom	ATO-	Air	KKmoom	ATO-	Air	KKmoom	ATO-
	Quality Monitor ZYG-101	Air Quality Detector	AIR- DM502	Quality Monitor ZYG-101	Air Quality Detector	AIR- DM502	Quality Monitor ZYG-101	Air Quality Detector	AIR- DM502
5	0.058	0.033	0.078	0.288	0.302	0.298	0.299	0.302	0.238
	±0.012	±0.013	±0.010	±0.010	±0.025	±0.018	±0.010	±0.004	±0.012
10	0.107	0.062	0.117	0.692	0.716	0.598	0.693	0.753	0.68
	±0.005	±0.022	±0.016	±0.035	±0.023	±0.017	±0.013	±0.006	±0.016
15	0.061	0.087	0.129	0.571	0.217	0.778	0.605	0.478	0.758
	±0.015	±0.016	±0.015	±0.004	±0.002	±0.018	±0.016	±0.006	±0.018
20	0.118	0.104	0.163	0.202	0.693	0.685	0.879	0.606	0.819
	±0.007	±0.020	±0.014	±0.013	±0.003	±0.024	±0.014	±0.023	±0.029
25	0.126	0.188	0.197	0.085	0.479	0.613	4.431	3.953	4.478
	±0.011	±0.003	±0.018	±0.018	±0.019	±0.023	±0.007	±0.018	±0.035
30	0.198	0.269	0.349	6.011	6.567	6.234	4.403	4.213	4.443
	±0.016	±0.004	±0.005	±0.017	±0.017	±0.017	±0.009	±0.019	±0.47
35	3.462	4.398	4.422	0.685	0.758	0.774	4.214	4.136	4.704
	±0.016	±0.001	±0.014	±0.011	±0.004	±0.011	±0.024	±0.042	±0.035
40	4.387	4.427	4.262	0.404	0.399	0.426	4.367	4.232	4.541
	±0.014	±0.019	±0.002	±0.015	±0.007	±0.011	±0.027	±0.018	±0.002
45	4.343	4.225	4.224	0.468	0.401	0.455	4.32	4.382	4.456
	±0.041	±0.020	±0.023	±0.004	±0.014	±0.018	±0.001	±0.053	±0.003
50	4.204	4.194	4.107	0.423	0.415	0.402	3.877	4.068	4.362
	±0.028	±0.014	±0.015	±0.003	±0.018	±0.025	±0.009	±0.047	±0.011



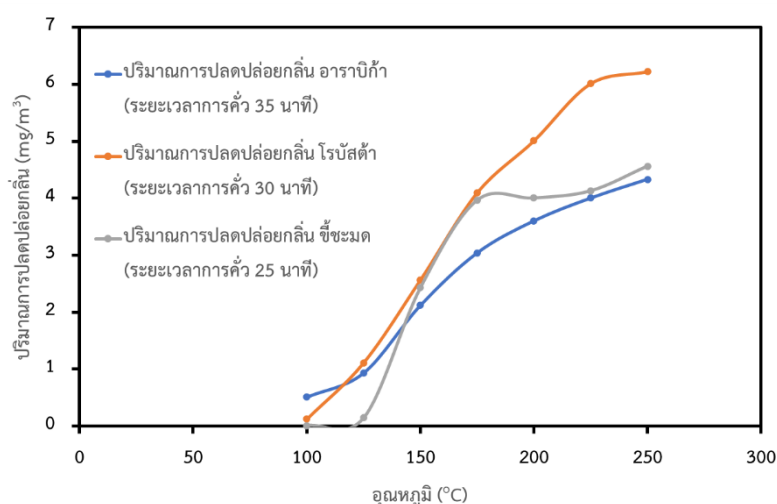
รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยกลิ่นของเมล็ดกาแฟ (mg/m³) ที่ระยะเวลาในการคั่วเมล็ดกาแฟ อาราบิก้า โรบัสต้า และชี้ชะมด 5-50 นาที ด้วยเครื่องตรวจวัดคุณภาพอากาศ 1) Air Quality Monitor ZYG-101 2) KKmoom Air Quality Detector และ 3) ATO-AIR-DM502 ที่อุณหภูมิ 250°C

5.2. อุณหภูมิในการคว่ำเมล็ดกาแฟ

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการคว่ำเมล็ดกาแฟที่มีผลต่อการปลดปล่อยกลิ่น (mg/m^3) ของเมล็ดกาแฟอาราบิก้า โรบัสต้า และชีแซมด เป็นระยะเวลา 35 30 และ 25 นาที ตามลำดับ ด้วยเครื่อง 1) Air Quality Monitor ZYG-101 2) KKmoom Air Quality Detector และ 3) ATO-AIR-DM502 ที่อุณหภูมิ 100-250 °C ทำซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2 และเมื่อนำค่าเฉลี่ยมาหาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณการปลดปล่อยกลิ่นและอุณหภูมิในการคว่ำจะได้ผลดังรูปที่ 4 พบว่า อุณหภูมิในการคว่ำเมล็ดกาแฟอาราบิก้า โรบัสต้า และชีแซมดแล้วเกิดการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่ายสูงที่สุด คือ 200-250 °C เนื่องจากเปลือกของเมล็ดกาแฟประกอบไปด้วยน้ำตาลและคาร์โบไฮเดรตที่มีเพคตินเป็นส่วนประกอบ และมีน้ำอยู่ภายใน เมื่อน้ำได้รับความร้อนและเดือดจึงพยายามหาช่องทางออกมา และอุณหภูมิถึงจุดที่เปลือกของเมล็ดกาแฟเสียสภาพ น้ำที่เดือดจึงดันออกมาทางปลายเมล็ดกาแฟ

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยปริมาณการปลดปล่อยกลิ่น (mg/m^3) ในการคว่ำเมล็ดกาแฟอาราบิก้า โรบัสต้า และชีแซมด เป็นระยะเวลา 35 30 และ 25 นาที ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 100-250°C ด้วยเครื่องตรวจวัดคุณภาพอากาศ

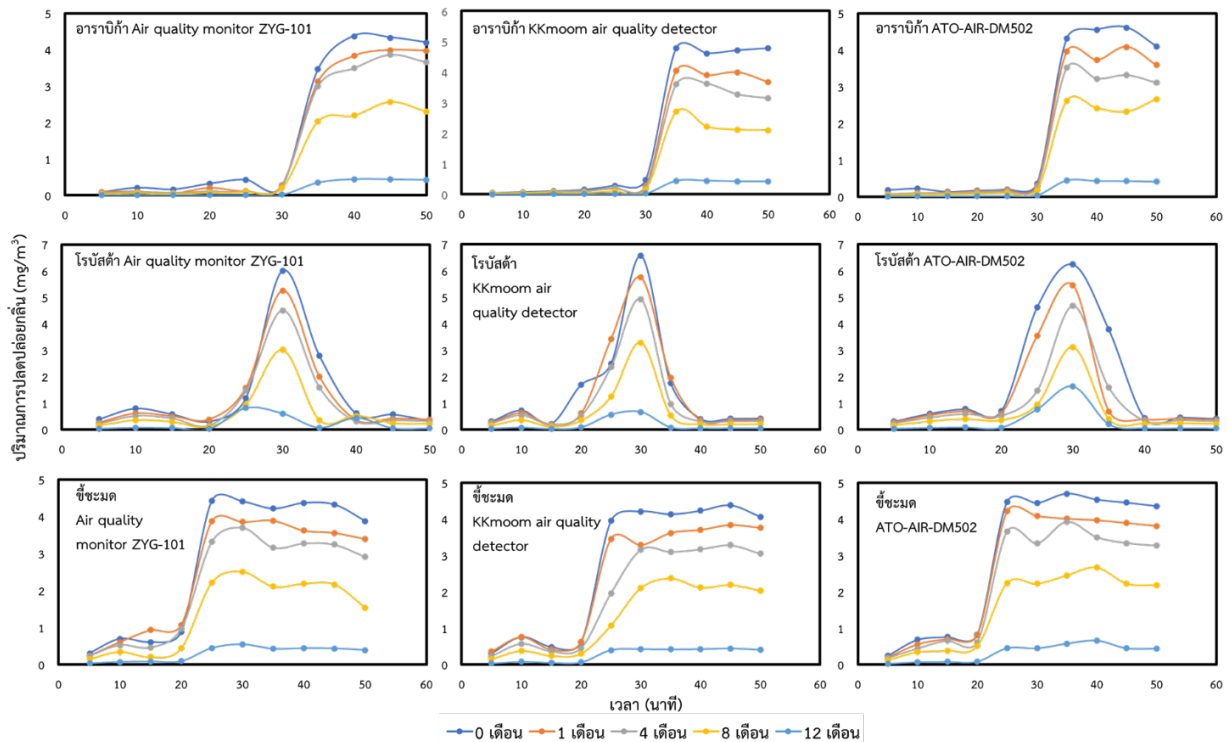
อุณหภูมิ (°C)	ค่าเฉลี่ยปริมาณการปลดปล่อยกลิ่น (mg/m^3)		
	อาราบิก้า	โรบัสต้า	ชีแซมด
100	0.512±0.011	0.125±0.012	0.012±0.015
125	0.936±0.014	1.114±0.012	0.147±0.045
150	2.122±0.020	2.568±0.015	2.431±0.030
175	3.042±0.014	4.098±0.014	3.967±0.005
200	3.604±0.030	5.011±0.018	4.004±0.007
225	4.004±0.011	6.014±0.019	4.131±0.014
250	4.333±0.018	6.224±0.014	4.564±0.008



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยกลิ่นของเมล็ดกาแฟ (mg/m^3) จากการคว่ำเมล็ดกาแฟ อาราบิก้า โรบัสต้า และชีแซมด เป็นระยะเวลา 35 30 และ 25 นาที ตามลำดับ ด้วยเครื่อง 1) Air Quality Monitor ZYG-101 2) KKmoom Air Quality Detector และ 3) ATO-AIR-DM502 ที่อุณหภูมิ 100-250 °C

5.3. ระยะเวลาการเก็บรักษาเมล็ดกาแฟหลังการคั่ว

จากการศึกษาการปลดปล่อยกลิ่นของเมล็ดกาแฟ อาราบิก้า โรบัสต้า และชีแซมด ที่ถูกเก็บรักษาภายหลังการคั่วเป็นระยะเวลา 1 4 8 และ 12 เดือน ด้วยเครื่อง 1) Air Quality Monitor ZYG-101 2) KKmoom Air Quality Detector และ 3) ATO-AIR-DM502 เป็นระยะเวลา 5-50 นาที ที่อุณหภูมิ 250 °C ทำซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง เมื่อนำค่าเฉลี่ยมาหาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณการปลดปล่อยกลิ่นและเวลาการเก็บรักษาภายหลังการคั่วเมล็ดกาแฟจะได้ผลดังรูปที่ 5 เนื่องจากยิ่งเก็บเมล็ดกาแฟที่คั่วแล้วเป็นระยะเวลานาน จะทำให้สารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ให้กลิ่นหอมของกาแฟสลายตัวไป



รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยกลิ่นของเมล็ดกาแฟ (mg/m^3) เมล็ดกาแฟ อาราบิก้า โรบัสต้า และชีแซมด ที่ถูกเก็บรักษาภายหลังการคั่วเป็นระยะเวลา 1, 4, 8 และ 12 เดือน ด้วยเครื่อง 1) Air Quality Monitor ZYG-101 2) KKmoom Air Quality Detector และ 3) ATO-AIR-DM502 เป็นระยะเวลา 5-50 นาที ที่อุณหภูมิ 250 °C

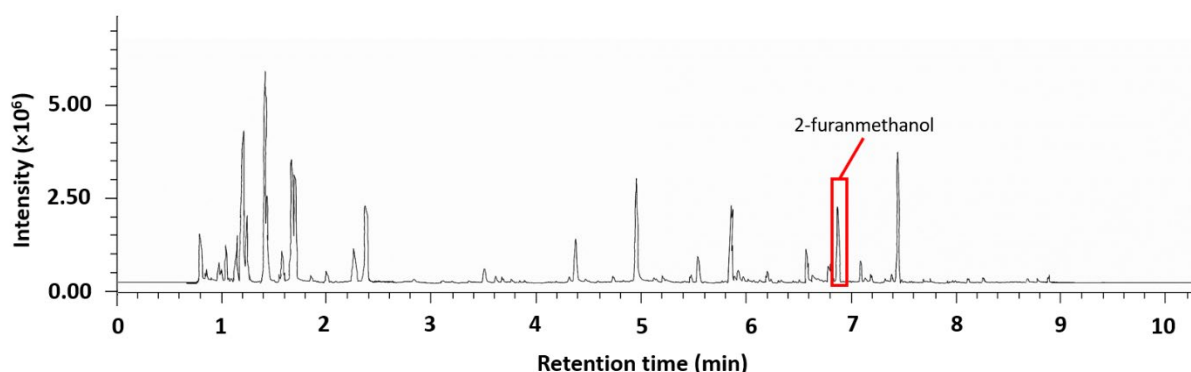
5.4. เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณระหว่างเทคนิคที่ใช้เครื่องมือตรวจวัดคุณภาพอากาศชนิดพกพา และแก๊สโครมาโทกราฟี

จากการศึกษาผลการวิเคราะห์ปริมาณการปลดปล่อยกลิ่นของเมล็ดกาแฟด้วยปัจจัยต่างๆ ได้แก่ 1) ระยะเวลาในการคั่วเมล็ดกาแฟ 2) อุณหภูมิในการคั่วเมล็ดกาแฟ และ 3) ระยะเวลาในการเก็บรักษาเมล็ดกาแฟหลังการคั่ว ผู้วิจัยจะเลือกผลการทดลองที่ให้การปลดปล่อยกลิ่นที่มากที่สุดของเมล็ดกาแฟอาราบิก้า โดยเก็บข้อมูลที่ระยะเวลาการคั่ว 25 27 30 33 และ 35 นาที เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวมีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการปลดปล่อยกลิ่นและเวลาเป็นเส้นตรง (อุณหภูมิในการคั่ว 250°C และระยะเวลาในการเก็บรักษาหลังคั่วเมล็ดกาแฟ 1 เดือน) มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง 1) Air Quality Monitor ZYG-101 2) KKmoom Air Quality Detector และ 3) ATO-AIR-DM502 เพื่อหาค่าเฉลี่ยของปริมาณการปลดปล่อยกลิ่น (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยปริมาณการปลดปล่อยกลิ่น (mg/m^3) ของเมล็ดกาแฟอาราบิก้า โดยเก็บข้อมูลที่ระยะเวลาการคั่ว 25 27 30 33 และ 35 นาที ที่อุณหภูมิ 250°C และระยะเวลาในการเก็บรักษาหลังคั่วเมล็ดกาแฟ 1 เดือน

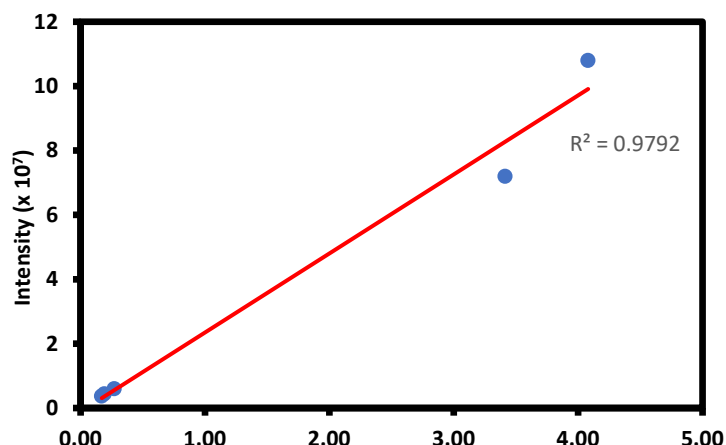
เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยปริมาณการปลดปล่อยกลิ่น (mg/m^3)			ค่าเฉลี่ย
	Air quality Monitor ZYG- 101	KKmoom Air Quality Detector	ATO-AIR- DM502	
25	0.126	0.188	0.197	0.511 ± 0.03
27	0.150	0.191	0.235	0.576 ± 0.04
30	0.198	0.269	0.349	0.816 ± 0.08
33	3.221	3.335	3.684	3.413 ± 0.24
35	3.254	4.445	4.542	4.080 ± 0.71

และวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (GC-TOFMS คอลัมน์ ZB-WAX 30 เมตร $\times$ 0.18 มิลลิเมตร อุณหภูมิเริ่มต้น 40°C (3 นาที) อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $30^\circ\text{C}/\text{นาที}$ และอุณหภูมิสุดท้าย 250°C (10 นาที)) (รูปที่ 7) โดยให้สารมาตรฐานเพื่อวัดปริมาณเป็น 2-furanmethanol (Merck 97-99-4) มีค่า $t_R = 7.22$ นาที และเก็บข้อมูลที่ระยะเวลาการคั่วเมล็ดกาแฟ 25 27 30 33 และ 35 นาที



รูปที่ 7 โครมาโทแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์การปลดปล่อยกลิ่นของเมล็ดกาแฟอาราบิก้า ระยะเวลาการคั่ว 30 นาที อุณหภูมิ 250°C และระยะเวลาในการเก็บรักษาหลังคั่วเมล็ดกาแฟ 1 เดือน ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (GC-TOFMS คอลัมน์ ZB-WAX 30 เมตร $\times$ 0.18 มิลลิเมตร อุณหภูมิเริ่มต้น 40°C (3 นาที) อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ $30^\circ\text{C}/\text{นาที}$ และอุณหภูมิสุดท้าย 250°C (10 นาที))

จากการทดลองพบว่าสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ยการปลดปล่อยกลิ่น และพื้นที่ใต้พีคสารมาตรฐาน 2-furanmethanol (ที่ $t_R = 7.22$) วินาที ไปในทิศทางเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นจึงนำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่องมือตรวจวัดคุณภาพอากาศชนิดพกพาและเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีมาสร้าง Correlation Plot พบว่า ค่า R^2 มีค่าเป็น 0.9792 ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 Correlation Plot ระหว่าง Intensity ของสารมาตรฐาน 2-furanmethanol ที่มีค่า $t_R = 7.22$ (Merck 97-99-4) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (GC-TOFMS คอลัมน์ ZB-WAX 30 เมตร $\times$ 0.18 มิลลิเมตร อุณหภูมิเริ่มต้น 40 °C (3 นาที) อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 30 °C/นาที และอุณหภูมิสุดท้าย 250 °C (10 นาที)) และ ค่าเฉลี่ยปริมาณการปลดปล่อยกลิ่น (mg/m^3) ระยะเวลาการคั่ว 25 27 30 33 และ 35 นาที

6. สรุป

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือตรวจวัดคุณภาพอากาศชนิดพกพาทั้งสามชนิด ระยะเวลาในการคั่วเมล็ดกาแฟอาราบิก้า โรบัสต้า และชีชะมด ที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วง 25-30 นาที หากเก็บรักษาเมล็ดกาแฟไว้นาน ปริมาณการปลดปล่อยกลิ่นจะลดลง และเมื่อนำผลการทดลองการปลดปล่อยกลิ่นของเมล็ดกาแฟอาราบิก้าไปเปรียบเทียบกับเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่า เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองเทคนิคด้วย Correlation Plot ได้ค่า R^2 เป็น 0.9792 แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เครื่องมือตรวจวัดคุณภาพอากาศชนิดพกพาในการตรวจวัดปริมาณการปลดปล่อยกลิ่นของเมล็ดกาแฟในเบื้องต้นได้ จึงเหมาะกับผู้บริโภคที่ต้องการคั่วเมล็ดกาแฟด้วยตัวเองหรือผู้ประกอบการรายย่อยที่ต้องการตรวจคุณภาพและปรับปรุงกรรมวิธีในการคั่วเมล็ดกาแฟ

7. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากวิเคราะห์การปลดปล่อยกลิ่นที่ได้จากการคั่วเมล็ดกาแฟในสภาวะต่างๆ ได้ทำการทดลองในห้องปิดที่มีค่าฝุ่น 30-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ดังนั้น หากผู้ประกอบการนำเทคนิคที่งานวิจัยนี้ได้นำเสนอไปประยุกต์ใช้ อาจต้องหลีกเลี่ยงพื้นที่ที่มีฝุ่น กลิ่นน้ำหอมปรับอากาศ กลิ่นดอกไม้ และกลิ่นกายของผู้ทดลอง เป็นต้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ. ดร.ชฎิล กุลสิงห์ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] อภิชาติ จินแพทย์ และ เอี่ยมพร รัตนสิงห์, “การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีไอออนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกากกาแฟ,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ*, ปีที่ 17, ฉบับที่ 2, หน้า 69-78, กรกฎาคม-ธันวาคม, 2564.

- [2] M. Kleinwächter, G. Bytof and D. Selmar, *Coffee in Health and Disease Prevention*, Preedy, V. R. Ed., San Diego: Academic Press, 2015, 73-81.
- [3] U. Jumhawan, S. P. Putri, Yusianto, T. Bamba and E. Fukusaki, "Quantification of coffee blends for authentication of Asian palm civet coffee (Kopi Luwak) via metabolomics: A proof of concept," *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 122, no. 1, pp. 79-84, July 2016.
- [4] U. Jumhawan, S. P. Putri, Yusianto, E. Marwani, T. Bamba and E. Fukusaki, "Selection of discriminant markers for authentication of Asian palm civet coffee (Kopi Luwak): a metabolomics approach," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 61, no. 33, pp.7994-8001, August 2013.
- [5] P. Kakanopas, P. Janta, S. Vimolmangkang, F. Hermatasia and C. Kulsing, "Retention index based approach for simulation of results and application for validation of compound identification in comprehensive two-dimensional gas chromatography," *Journal of Chromatography A*, vol. 1679, pp.463394, August 2022.
- [6] S. Pojjanapornpun, et al., "Simulation of peak position and response profiles in comprehensive two-dimensional gas chromatography," *Journal of Chromatography A*, vol. 1607, December 2019.
- [7] I. Blank and W. Grosch, "On the Role of (-)-2-Methylisoborneol for the Aroma of Robusta Coffee," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 50, no. 16, pp. 4653-4656, July 2002.
- [8] Z. Wang, et al., "Effect of monosaccharide composition and proportion on the bioactivity of polysaccharides: A review," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 254, January 2024.
- [9] M. Muzaifa, D. Hasni, A. Patria, F. Febriani and A. Abubakar, "Sensory and microbial characteristics of Civet coffee," *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 165-171, January 2018.
- [10] P. B. Andrade, R. Leita, R. M. Seabra, M. B. Oliveira and M. A. Ferreira, "Development of an HPLC/diode array detector method for simultaneous determination of seven hydroxy cinnamic acids in green coffee," *Journal of Liquid Chromatography and Related Technologies*, vol. 20, no. 13, pp. 2023-2030, August 1997.
- [11] A. Amanpour and S. Selli, "Differentiation of Volatile Profiles and Odor Activity Values of Turkish Coffee and French Press Coffee," *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 40, no. 5, pp. 1116-1124, December 2015.
- [12] O. Al-abbasy, S. Younus, A. Rashan and O. Sheej Ahmad, "Maillard reaction: formation, advantage, disadvantage and control. A review," *Food Science and Applied Biotechnology*, vol. 7, no.1, pp. 145-161, March 2024.

- [13] M. Adrover, B. Vilanova, J. Frau, F. Munoz and J. Donoso, "The pyridoxamine action on Amadori compounds: a reexamination of its scavenging capacity and chelating effect," *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, vol. 16, no. 10, pp. 5557-5569, May 2008.
- [14] N. Tamanna and N. Mahmood, "Food Processing and Maillard Reaction Products: Effect on Human Health and Nutrition," *International journal of food science*, vol. 2015, January 2015.
- [15] G. Sengar and H. K. Sharma, "Food caramels: a review," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 51, no. 9, pp. 1686-1696, February 2014.
- [16] L. W. Kroh, "Caramelisation in food and beverages," *Food Chemistry*, vol. 51, no. 4, pp. 373-379, January 1994.
- [17] U. Jumhawan, S. P. Putri, Yusianto, E. Marwani, T. Bamba and E. Fukusaki, "Contribution of roasted grains and seeds in aroma of oleang (Thai coffee drink)," *International Food Research Journal*, vol. 19, no. 2, pp. 583-588, January 2012.
- [18] J. Puviprom and S. Chaiseri, "Contribution of roasted grains and seeds in aroma of oleang (Thai coffee drink)," *International Food Research Journal*, vol. 19, no. 2, pp. 583-588, January 2012.
- [19] G. H. Lee, O. Suriyaphan and K. R. Cadwallder, "Aroma components of cooked tail meat of American lobster (*Homarus americanus*)," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 49, no. 9, pp. 4324-4332, August 2001.

ใช้ตัวอักษรไม่เกิน 135 ตัวอักษร รวมระยะห่างระหว่างตัวอักษรภาษาไทยและอังกฤษ
ใช้ตัวอักษร TH Sarabun PSK ขนาด 18 pt. ระยะห่างระหว่างบรรทัด 22 pt.
A Comparative Study of Classifiers for Analyzing Agricultural Land Use

ชื่อผู้แต่ง นามสกุล¹, ชื่อผู้แต่ง นามสกุล^{2*} และ ชื่อผู้แต่ง นามสกุล³

¹ภาควิชาวิศวกรรมนิวตกรรม มหาวิทยาลัย ABC

^{2,3}ภาควิชาวัสดุนิวตกรรม มหาวิทยาลัย XYZ

Author Name Lastname¹, Author Name Lastname^{2*} and Author Name Lastname³

¹Author Office 1 Department University

^{2,3}Author Office 2 Department University

CorrespondenceAuthor@university.ac.th

Received xx September 2024

Revised xx December 2024

Accepted xx December 2024

บทคัดย่อ

โปรดใส่เครื่องหมาย * ตรงตำแหน่งของชื่อผู้พิมพ์ประสานงาน (Corresponding Author) สำหรับการเขียนบทคัดย่อควรครอบคลุมเนื้อหาไม่เกิน 2 ย่อหน้า โดยใช้คำ จำนวน 150 - 250 คำ ด้วยอักษร TH Sarabun PSK ขนาด 15 pt. ระยะห่างระหว่าง Exactly 22 pt. บทคัดย่อควรสรุปถึงเนื้อหาที่จะกล่าวในบทความทั้งหมด โดยประกอบด้วยวัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานที่ศึกษา และผลการทดลอง ไม่ควรมีการอ้างอิงถึงข้อมูลอื่นในส่วนของบทคัดย่อ ควรหลีกเลี่ยงการใช้สูตรทางวิทยาศาสตร์ที่ซับซ้อน ควรมีการใส่คำสำคัญในส่วนของบทคัดย่อนี้ด้วย

คำสำคัญ: คำแนะนำ, บทความ, ส่วนของบทคัดย่อ (โปรดระบุคำสำคัญ 3-5 คำ)

Abstract

Abstract in EnglishContrary to popular belief, Lorem Ipsum is not simply random text. It has roots in a piece of classical Latin literature from 45 BC, making it over 2000 years old. Richard McClintock, a Latin professor at Hampden-Sydney College in Virginia, looked up one of the more obscure Latin words, consectetur, from a Lorem Ipsum passage, and going through the cites of the word in classical literature, discovered the undoubtable source. Lorem Ipsum comes from sections 1.10.32 and 1.10.33 of "de Finibus Bonorum et Malorum" (The Extremes of Good and Evil) by Cicero, written in 45 BC.

Keywords: Research, Writing, Random (โปรดระบุคำสำคัญ 3-5 คำ)

1. บทนำ

ให้ส่งบทความในรูปแบบไฟล์ PDF และ MS word กำหนดรูปแบบหน้าเป็น A4 ขอบซ้าย ขวา บน และล่าง เท่ากับ 2.5 ซม. เนื้อหาใช้ตัวอักษร TH Sarabun PSK ขนาด 15 pt. ระยะห่างระหว่างบรรทัด Exactly 18 pt. จัดตัวอักษรกระจายแบบไทย (Thai distribution) จัดหน้าเป็นคอลัมน์เดียว รูปและตารางสามารถแทรกในเนื้อหาตามความเหมาะสม หากต้องการเน้นคำหรือวลีควรใช้ตัวเอียง ห้ามใช้ตัวหนา ยกเว้นกรณีที่จำเป็นหัวข้อต่าง ๆ ซึ่งจะอธิบายในส่วนถัดไป นอกจากนี้ควรใช้หน่วย SI ในการรายงานในบทความ

2. ขอบเขตงานวิจัย

หัวข้อของบทความวิจัย ประกอบด้วยหัวข้อต่อไปนี้ตามลำดับ 1. บทนำ 2. ขอบเขตงานวิจัย 3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4. การดำเนินการวิจัย 5. ผลการวิจัย 6. สรุป 7. ข้อเสนอแนะ 8. กิตติกรรมประกาศ และ 9. เอกสารอ้างอิง โดยหัวข้อใช้ตัวอักษรหนา สามารถมีหลายหัวข้อย่อยโดยแต่ละหัวข้อย่อย ให้อยู่หน้าจากหัวข้อก่อนหน้า 0.75 ซม.

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การพิมพ์บทความไม่ต้องใส่เลขหน้า บทความฉบับเต็มควรมีความยาวของเนื้อหาประมาณ 8 - 15 หน้า อาจประกอบด้วย สัญลักษณ์พิเศษ สมการ รูปภาพ ตาราง โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การใส่สัญลักษณ์พิเศษในบทความ

สัญลักษณ์พิเศษควรพิมพ์ด้วยตัวอักษร Times New Roman ขนาด 12 pt. ตัวอย่างเช่น β , μ

3.2 การใส่สมการในบทความ

ต้องเว้นระยะห่างระหว่างข้อความกับสมการ 1 Enter เพื่อป้องกันการสับสน และควรจัดให้สมการอยู่กึ่งกลางหน้ากระดาษ และระยะห่างระหว่างสมการตามความเหมาะสม เช่น สมการพิทาโกรัส ตามสมการที่ 1 สมการปริมาตรทรงกลม ตามสมการที่ 2 และสมการพื้นที่ผิวทั้งหมดของทรงกระบอก ตามสมการที่ 3 พร้อมกำหนดเลขที่ของสมการในวงเล็บ (x) เรียงตามลำดับและชิดกับขอบขวาของหน้ากระดาษ ดังแสดง

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad (1)$$

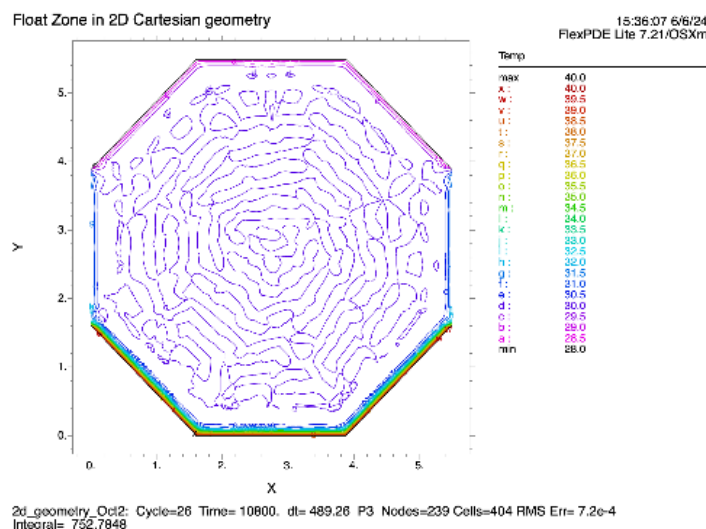
$$V = \pi r^2 h + 2\pi rh \quad (2)$$

$$S = ut + 0.5at^2 \quad (3)$$

3.3 การใส่รูปภาพในบทความ

สามารถแทรกรูปภาพในเนื้อหาได้ โดยควรจะเป็นรูปภาพที่สื่อความหมายเพื่อให้เกิดความเข้าใจในบทความ ถ้ามีข้อความในรูปภาพนั้น ข้อความควรต้องอ่านได้อย่างชัดเจน ต้องเว้นระยะห่างระหว่างบรรทัดที่แสดงชื่อรูปกับเนื้อหาให้มีความเหมาะสมเพื่อป้องกันการสับสน ซึ่งการใส่ชื่อรูปจะไว้ในตำแหน่งใต้รูป ดังรูปที่ 1

ในกรณีที่รูปภาพมีลิขสิทธิ์ให้ใส่เครดิตไว้หลังชื่อรูปนั้น



รูปที่ 1 Contour แสดงการแพร่กระจายความร้อนของพื้นที่หน้าตัดรูปแปดเหลี่ยม (เอกสารอ้างอิง [1])

3.4 การใส่ตารางในบทความ

โดยต้องเว้นระยะห่างระหว่างบรรทัดที่แสดงชื่อตารางกับเนื้อหาให้มีความเหมาะสมเพื่อป้องกันการสับสน และควรจัดตารางให้อยู่กึ่งกลาง ใส่ชื่อตารางไว้ด้านบนตามตัวอย่างตารางที่ 1 และรูปแบบของตารางแบ่งเป็นคอลัมน์ และแสดงกรอบชัดเจนตามตารางด้านล่าง

ตารางที่ 1 สมบัติของวัสดุ

วัสดุ	การนำความร้อน λ (W/ mK)	ความร้อนจำเพาะ C_p (kJ/ kgK)	ความหนาแน่น ρ (g/ cm ³)
พลาสติก PS	0.12	1.20	1.06
พลาสติก PVC	0.21	1.10	1.40
พลาสติก PMMA	0.20	1.45	1.18
พลาสติก SAN	0.12	1.40	1.08
พลาสติก ABS	0.25	1.40	1.02

4. การดำเนินการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกำหนดการวิจัย วิธีการ กิจกรรมต่าง ๆ และรายละเอียดของการวิจัย ผู้วิจัยจะต้องทำเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลนับตั้งแต่ ประชากร กลุ่มตัวอย่าง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย เป้าหมายสำคัญ การได้มาซึ่งข้อมูลที่สามารถตอบปัญหาการวิจัยที่ได้มุ่งหมายไว้

5. ผลการวิจัย

ผลที่ได้กระบวนกรจากการดำเนินการวิจัย ผลลัพธ์นี้จะอยู่ในรูปของตาราง รูปภาพ เป็นต้น

6. สรุป

หัวข้อนี้เป็นการนำผลการวิเคราะห์หรือสิ่งที่พบมาสรุปโดยย่อ ซึ่งเป็นการนำคำอธิบายได้ตารางหรือการแปลผลการวิจัย ซึ่งเป็นผลมาจากการสรุปผลการวิจัย โดยการสรุปผลการวิจัยหรือสิ่งที่ค้นพบ จะต้องสรุปเฉพาะประเด็นสำคัญเท่านั้น

7. ข้อเสนอแนะ

เป็นการเขียนข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ เสนอขึ้นมาจากผลการวิจัย ข้อค้นพบจากการวิจัย โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้ข้อมูล แนวทาง วิธีการ คำแนะนำ ต่อผู้ที่อ่านงานวิจัยชิ้นนี้ เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อการพัฒนาปรับปรุง ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องต่อการนำงานวิจัยไปใช้ประโยชน์หรือต่อยอด

8. กิตติกรรมประกาศ

เป็นการกล่าวขอบคุณผู้ที่ช่วยเหลือในงานวิจัยนี้ให้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีได้แก่ ผู้ที่สนับสนุนเงินทุนวิจัยในการทำวิจัยชิ้นนี้ อาจารย์ เพื่อนร่วมงาน เป็นต้น

9. เอกสารอ้างอิง

การเขียนเอกสารอ้างอิง คือการนำรายชื่อเอกสาร สิ่งพิมพ์ หรือบุคคลที่ผู้เขียนบทความนำมาอ้างอิง มารวบรวมไว้ส่วนท้ายของบทความ ในการเขียนอ้างอิงตามข้อกำหนดของวารสารนี้จะใช้ระบบการเขียนแบบ (IEEE Style) โดยมีรูปแบบการเขียนดังนี้

การอ้างอิงแบบ IEEE มีวิธีการดังนี้

1. ใส่ตัวเลขกำกับไว้ในเครื่องหมาย [] ท้ายข้อความหรือชื่อบุคคลที่อ้างอิง โดยให้ตัวเลขอยู่ในระดับบรรทัดเดียวกันกับเนื้อหา เช่น [1]
2. ให้ใส่ตัวเลขอ้างอิงเรียงลำดับตั้งแต่เลข 1 เป็นต้นไป ต่อเนื่องกัน และในกรณีที่มีการอ้างอิงซ้ำให้ใช้ตัวเลขเดิมที่เคยใช้อ้างมาก่อนแล้ว
3. แหล่งที่ใช้อ้างอิงทั้งหมดในเนื้อหาจะไปปรากฏอยู่ในบรรณานุกรม โดยการเรียงลำดับตามหมายเลข และพิมพ์หมายเลขอยู่ในเครื่องหมาย []
4. กรณีที่อ้างอิงเอกสารหลายรายการในคราวเดียวกัน
 - 4.1 อ้างอิงไม่เกิน 2 รายการให้ใส่หมายเลขของเอกสารที่อ้างเรียงลำดับโดยใส่เครื่องหมายจุลภาค (,) คั่น เช่น [1, 2] หรือ [1, 5]
 - 4.2 อ้างอิงเกิน 2 รายการและเป็นรายการที่ต่อเนื่องกันให้ใส่หมายเลขของเอกสารที่อ้างเรียงลำดับโดยใส่เครื่องหมายยัติภังค์ (-) คั่น เช่น [1-3] หรือ [1-5]
 - 4.3 อ้างอิงเกิน 2 รายการและเป็นรายการทั้งต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ให้ใส่หมายเลขของเอกสารที่อ้างเรียงลำดับโดยใส่เครื่องหมายจุลภาค (,) คั่นในกรณีไม่ต่อเนื่อง และเครื่องหมายยัติภังค์ (-) คั่นในกรณีต่อเนื่อง เช่น [1, 4-5]
5. ชื่อผู้แต่ง
 - 5.1 ไม่ต้องลงคำนำหน้า ตำแหน่งวิชาการ คำเรียกทางวิชาชีพ ยศทางทหารและตำรวจ

- 5.2 ชื่อผู้แต่งชาวไทยเขียนเป็น ชื่อ นามสกุล
- 5.3 ชื่อผู้แต่งชาวต่างชาติเขียนเป็น อักษรย่อของ ชื่อต้น ชื่อรอง, นามสกุล รวมถึงผู้แต่งชาวไทยที่เขียนบทความเป็นภาษาอังกฤษ
- 5.4 ผู้แต่งมากกว่า 6 คนขึ้นไป ให้ลงผู้แต่งคนแรกแล้วตามด้วย และคณะ หรือ et al.
6. ชื่อเรื่อง ชื่อหนังสือ ชื่อวารสาร ชื่อวิทยานิพนธ์ ใช้ตัวเอียง

ตัวอย่างการอ้างอิงหนังสือ

- รูปแบบภาษาไทย [#] ชื่อผู้แต่ง, *ชื่อหนังสือ*, ครั้งที่พิมพ์. เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์, ปีที่พิมพ์, หน้า.
- รูปแบบภาษาอังกฤษ [#] J. K. Author. *Title of Book*, ed. City of Publisher: Publisher, Year, Pages.

- [1] สุพักตร์ พิบูลย์, *กลยุทธ์การวิจัยเพื่อพัฒนางานวิจัย*, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: จตุพรดีไซน์, 2547, 45-52.
- [2] A. Gilbert, *Cities Poverty and Development Urbanization in the Third World*, London: Oxford University Press, 1982, 48-50.

ตัวอย่างการอ้างอิงจากการประชุมวิชาการ

- รูปแบบภาษาไทย [#] ชื่อผู้แต่ง, “ชื่อบทความ,” ใน *ชื่อการประชุมวิชาการ*, ชื่อสถานที่จัดงาน, วัน เดือน ปีที่จัด, หน้า.
- รูปแบบภาษาอังกฤษ [#] Author, “Title of paper,” in *Title of Conference*, City, Country of Conference, Month Date, Year, Pages number.

- [3] นิตยา เงินประเสริฐศรี, “ผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดรู Orifice และ Nozzle ต่อคุณสมบัติการวัดของแอร์เกจ,” ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 (MENETT 28)*, จังหวัดขอนแก่น, 15-17 ตุลาคม 2557, น. 45-47.
- [4] S. Müller, D. Bermbach, S. Tai, and F. Pallas, “Benchmarking the Performance Impact of Transport Layer Security in Cloud Database Systems,” in *Cloud Engineering (IC2E) 2014 IEEE International Conference*, Boston, Massachusetts, 2014, pp. 27-36.

ตัวอย่างการอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์หรือสารนิพนธ์

- รูปแบบภาษาไทย [#] ชื่อผู้แต่ง, “ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์,” วิทยานิพนธ์ ชื่อย่อปริญญา (สาขา), ชื่อมหาวิทยาลัย, ชื่อเมือง, ชื่อประเทศ, ปีที่พิมพ์.
- รูปแบบภาษาอังกฤษ [#] J. K. Author, “Title of dissertation,” Ph.D. dissertation, Department, University, City of University, State, year.
- [#] J. K. Author, “Title of Thesis,” M.S. thesis, Department, University, City of University, State, year.

- [5] กอchem มะแซ, “สภาพปัญหาและแนวทางการพัฒนาครูในโรงเรียนเอกชนสอนศาสนาอิสลาม สังกัดสำนักงานการศึกษาเอกชนจังหวัดปัตตานี,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, 2555.
- [6] D. W. Nickel, “The Relationship between IT-Business Alignment and Organizational Culture: An Exploratory Study,” Doctoral Dissertation, University of Memphis, Tennessee, United State, 2005.

ตัวอย่างการอ้างอิงจากเว็บไซต์

รูปแบบภาษาไทย [๕] ชื่อผู้แต่ง, “ชื่อเรื่อง,” ชื่อเว็บไซต์ (ถ้ามี) [ออนไลน์]. เว็บไซต์: <http://...> (เข้าถึงเมื่อ: วัน เดือน ปี).

รูปแบบภาษาอังกฤษ [๕] J. K. Author, “Page title.” Website title. [Online]. Available :Web Address (accessed date retrieved).

[7] CNN Wire Staff, “The Session Initiation Protocol - The Internet Protocol.” [Online]. Available: <http://www.cnn.com> (Accessed: July. 10, 2011).

[8] อนุรักษ์ โชติติลล, “ตัวแบบการพัฒนาผู้นำที่เหมาะสมในสถานการณ์วิกฤติ,” [ออนไลน์]. Available: <http://www.tci-thaijo.org> (เข้าถึงเมื่อ: 2 สิงหาคม 2561).

ตัวอย่างการอ้างอิงจากวารสาร

รูปแบบภาษาไทย [๕] ชื่อผู้แต่ง, “ชื่อบทความ,” ชื่อวารสาร, ปีที่, ฉบับที่, หน้า, เดือน, ปี.

รูปแบบภาษาอังกฤษ [๕] J. K. Author, “Title of Article,” Title of Journal, Volume, Issue, Pages. Month. Year.

[9] นิตยา เงินประเสริฐศรี, “องค์การแนวนอน,” วารสารสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์, ปีที่ 27, ฉบับที่ 15, หน้า 37-42, มกราคม-มิถุนายน, 2554.

[10] J. R. Beveridge and E. M. Riseman, “How easy is matching 2D line models using local search?,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine intelligence*, vol. 19, no. 6, pp. 564-579, June 1997.



Published by
NKRAFA Journal of Science and Technology