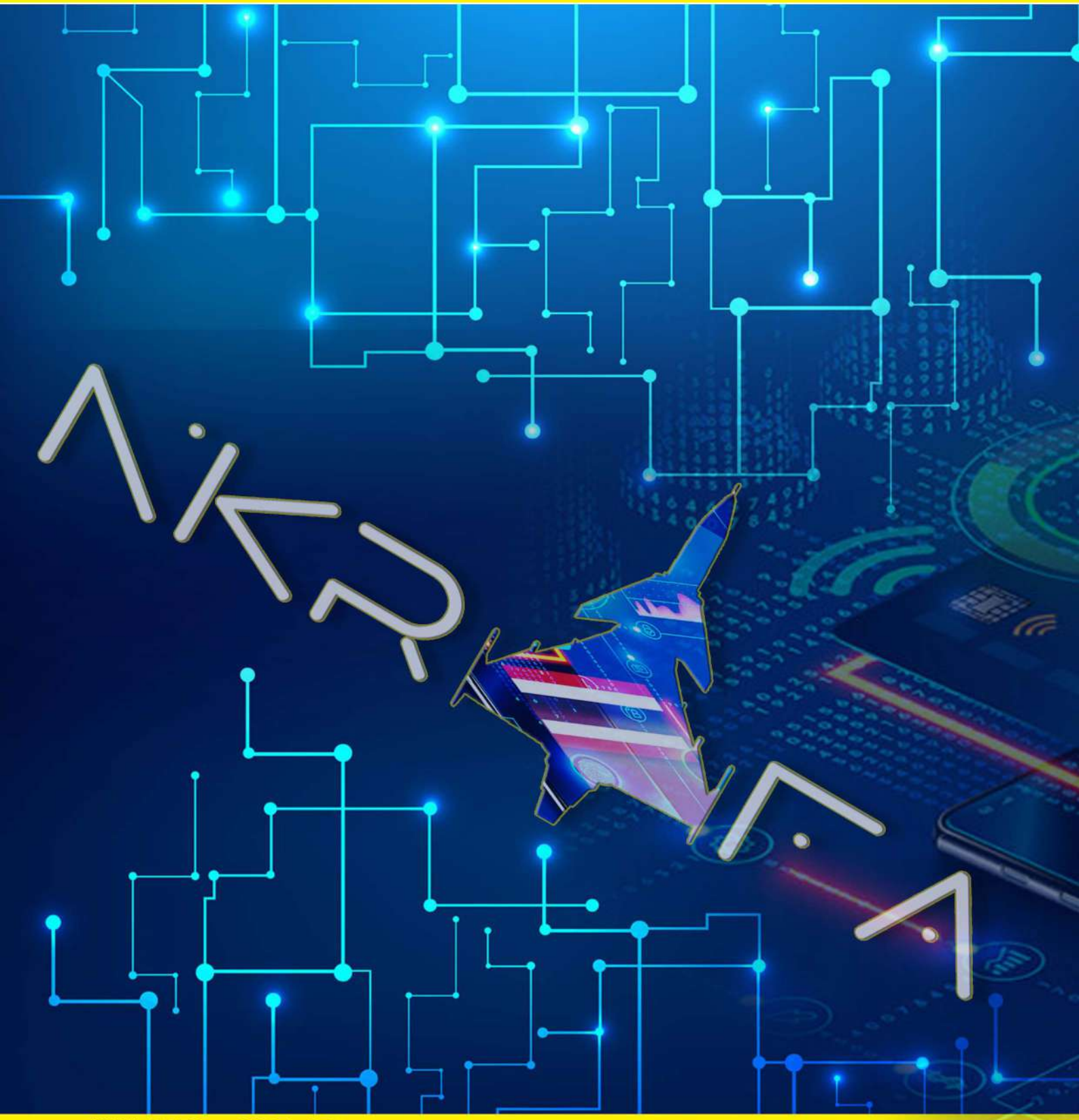
วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ

NKRAFA JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

ปีที่ 20 ฉบับที่ 2 ก.ค. - ธ.ค. 67



ISSN 2651 - 1134 (Print)
ISSN 2651 - 1002 (Online)

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ

บรรณาธิการ น.อ. ผศ.ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

คณะที่ปรึกษา

พล.อ.ท. จักรกฤษณ์ ธรรมวิชัย	ผู้บัญชาการ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
พล.อ.ต. รศ.สมเกียรติ สุกางโฮง	ผู้อำนวยการ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
พล.อ.ต. ผศ.วัชรินทร์ โกมุทผล	ผู้อำนวยการ สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
น.อ. ศ.ธนากร พีระพันธุ์	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
น.อ. ศ.ประสาทพร วงษ์คำช้าง	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

กองบรรณาธิการ(ภายใน)

ร.อ. ผศ.ดร.วิศรุต คล้ายแจ้ง	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
ร.อ. ผศ.ภูมินันท์ บัวงาม	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
ร.ท.ดร.ธนธร ชื่นยินดี	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

กองบรรณาธิการ(ภายนอก)

ผศ.ดร.ธงจุฑา สุวรรณประเสริฐ	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ดร.ชัยศิริ สนิทพลกลาง	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ดร.ศิริวิมล สายเวช	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ดร.เกวลี สืบญาติ	วิทยาลัยวิทยาศาสตร์การแพทย์เจ้าฟ้าจุฬาภรณ์ ราชวิทยาลัยจุฬาภรณ์
ดร.ปวิตรา อวยจินดา	วิทยาลัยวิทยาศาสตร์การแพทย์เจ้าฟ้าจุฬาภรณ์ ราชวิทยาลัยจุฬาภรณ์
รศ.ดร.สันติ เชื้อเต๊อะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.พยุง มีสัจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.พงษ์พิสิฐ วุฒิดิษฐโชติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ณัฐพล บุญนำ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.รัตนศักดิ์ เหมะ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.นพรัตน์ โพธิ์ชัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ภัคคินี ชิตสกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร.ณัฐวุฒิ ผ่องหนู	มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตอุดรธานี

ดร.กมลภัสสร์ มั่นศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
รศ.ดร.พงศกร สุนทรายุทธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.วงศ์วิศรุต เขื่องสตุ่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุดาภรณ์ ภู่แพร	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ดร.ปิยดา โพธิ์ศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ผศ.ดร.พัชรินทร์ บัวเย็น	มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
ผศ.ดร.รสลิน เพตะกร	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
ผศ.ดร.เศรษฐวิทย์ ภูฉายา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.คมเดช ภาพัฒนบุรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผศ.ดร.บุญฤทธิ์ ชูประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร.อดิศร แก้วภักดี	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
อ.กวินทร์ จิวสุวรรณ	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ดร.ภูวสิษฐ์ ตุ่นแก้ว	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

กองจัดการวารสาร

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

ตรวจทานภาษาของบทความ

อ.ธีระพงศ์ คงด้วง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทบรรณาธิการ

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ (NKRAFA JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) ซึ่งฉบับนี้เป็นปีที่ 20 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2567 โดยวารสารออนไลน์ใช้ระบบ ThaiJo มีหมายเลข ISSN (Online) คือ 2651-1002 และวารสารเป็นเล่ม มี ISSN (Print) คือ 2651-1134 ซึ่งวารสารมีกำหนดออกปีละ 2 ฉบับ (ฉบัยที่ 1 มกราคม – มิถุนายน และฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม) ซึ่งในฉบับนี้ กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศได้มีการปรับปรุงคุณภาพ ปรับกระบวนการจัดการวารสาร เพื่อเตรียมเข้ารับการประเมินคุณภาพวารสารในรอบที่ 5 ในปี พ.ศ. 2568 จากศูนย์ TCI โดยมีเป้าหมายที่ต้องการเป็นวารสารกลุ่มที่ 1

ทั้งนี้กองบรรณาธิการ ฯ ขอขอบคุณผู้นิพนธ์บทความทุกท่านที่ให้ความไว้วางใจในการส่งบทความจำนวน 10 บทความ (บทความภายนอก 9 บทความ บทความภายใน 1 บทความ) เพื่อตีพิมพ์ในวารสารฯ ปีที่ 20 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2567 กองบรรณาธิการฯ ขอบพระคุณมูลนิธิพลอากาศเอก ศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ ฤทธาคณี คณะที่ปรึกษา และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่กรุณาสละเวลาในการตรวจสอบคุณภาพของบทความและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ยิ่ง สุดท้าย ขอขอบคุณ ทีมงานที่เกี่ยวข้องทุกคนที่ทำให้รูปเล่มของวารสารฯ มีความสมบูรณ์และสวยงาม จนเกิดความสำเร็จทั้งในด้านคุณภาพและปริมาณตามมาตรฐานคุณภาพของ TCI

นาวาอากาศเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง
บรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ

สารบัญ

หน้า

บทความวิจัย

คะแนนท็อปทูบ็อกของความพึงพอใจใน 7Ps ของธุรกิจที่พักอาศัย 1-10

A Hybrid Model for Path Loss Estimation in Avenue Environment 11-22

การวิเคราะห์และการประเมินแบบจำลองการทำนายอากาศยานบนพื้นฐานข้อมูล ของเป้าหมายไม่ทราบฝ่ายอัตโนมัติ 23-35

การหาปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมดในน้ำทะเล ด้วยวิธีสเปกโตรฟลูออโรเมทรีแบบลดสเกล 36-44

การวัดค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นด้วยลูกตุ้มแท่งกลมที่มีคาบน้อยที่สุด 44-45

การออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุฉนวนสุญญากาศ พิกัดการวัดสูงสุด 200 กิโลโวลต์ 56-71

การพัฒนาต้นแบบชุดรับส่งข้อมูลโดยใช้หลักการเรดิโอโอเวอร์ไอพีผ่าน วิทยุทหารรุ่น CNR 900 72-82

การประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์และการหาสูตรผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส เพื่อการฆ่าเชื้อโรคสำหรับใช้ในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า 83-97

การพัฒนาเส้นด้ายบัวหลวงด้วยเทคนิคการย้อมสีธรรมชาติ 98-109

ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการบริโภคอาหารภายใต้สถานการณ์การแพร่ ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 สายพันธุ์โอไมครอน 110-125

คะแนนท็อปทูบ็อกของความพึงพอใจใน 7Ps ของธุรกิจที่พักอาศัย

(Top 2 Box score of the 7Ps satisfaction of Residential Business)

[1*]อำนาจ วังจีน และ [2#]สุพล พรหมมาพันธุ์

[1] สาขาวิชาสถิติประยุกต์ สำนักวิชาศึกษาทั่วไป มหาวิทยาลัยศรีปทุม

[2] สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

[1*]**Amnart Vangjeen and [2#]Supon Phrommaphan**

[1]Department of Applied Statistics School of General Studies, Sripatum University

[2]Department of Information and Communication Technology, School of Information Technology, Sripatum University

[*]Amnart.va@spu.ac.th, [#]Supon.ph@spu.ac.th

Received: November 22,2023
Revised: March 29,2024
Accepted: April 1,2024

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีขอบเขตการวิจัยเพื่อ 1) ศึกษาระดับความพึงพอใจในส่วนประสมทางการตลาด 7Ps ของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัย และ 2) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตกับคะแนนท็อปทูบ็อกระดับความพึงพอใจในส่วนประสมทางการตลาด 7Ps ของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัย ประชากร คือ ลูกค้าที่พักอาศัยในบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัย ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล และส่วนภูมิภาค ใช้ตัวอย่างจำนวน 1,000 ตัวอย่าง ด้วยการสุ่มตัวอย่างแบบหลายขั้นตอน เครื่องมือที่ใช้เป็นแบบสอบถามชนิดมาตรประมาณค่า 5 ระดับ จำนวน 1 ชุด มีค่าความเชื่อมั่น 0.880 สถิติที่ใช้ได้แก่ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต คะแนนท็อปทูบ็อก สัมประสิทธ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมน

ผลการศึกษา พบว่า 1) ระดับความพึงพอใจในส่วนประสมทางการตลาดทั้ง 7 ด้าน (7Ps) อยู่ในระดับมาก เรียงลำดับตามค่าเฉลี่ยจากมากไปน้อย ได้แก่ ด้านราคา ผลิตภัณฑ์และบริการ ช่องการจัดจำหน่าย สิ่งแวดล้อมทางกายภาพ บุคคลหรือพนักงานในองค์กร กระบวนการ และ การส่งเสริมการตลาด 2) ค่าเฉลี่ยเลขคณิตกับคะแนนท็อปทูบ็อกระดับส่วนประสมทางการตลาด 7Ps ของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัย มีความสัมพันธ์กันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในทิศทางเดียวกันด้วยค่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน และแบบสหสัมพันธ์ สเปียร์แมน เท่ากับ 0.984 และ 0.929 ตามลำดับ

คำสำคัญ: บ้านจัดสรร, ส่วนประสมทางการตลาด (7Ps), สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมน, คะแนนท็อปทูบ็อก

ABSTRACT

This research aims to 1) Study the level of the 7Ps marketing mix of housing estate and residential condominium customers. 2) Study the relationship between the "Arithmetic mean" and "The top two box score". 7Ps Marketing Mix Level of Housing and Residential Condominium Customers. The population is customers living in housing estates and residential condominiums in Bangkok and its vicinity and the region Using 1,000 samples by multistage random sampling. The instrument used was a 5-level estimating questionnaire, merging as a set, with a reliability value of 0.880. The statistics used were: Arithmetic mean, Top two Box Score, Pearson correlation coefficient, and Spearman correlation coefficient.

The Research discovered 1) the level of satisfaction in the 7 marketing mix (7Ps) was at a high level. (Sorted by average values from highest to lowest): Price, Products and Services, Place, Physical environment and/or employees in an organization, Process, and Promotion. 2) Arithmetic mean and top-two-box score 7Ps Marketing Mix Level of Housing and Residential Condominium Customers reveals that there was a statistical correlation at the significant level of 0.05 in the same direction with the Pearson correlation coefficient value and the Spearman rank correlation coefficient equal to 0.984 and 0.929 respectively.

Keywords: Housing, Marketing Mixes (7Ps), Spearman's rho, Top 2 Box score

1. บทนำ

สถิติเป็นศาสตร์หนึ่งที่ใช้ในวางแผนการเก็บรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูลและการอธิบายผลของการวิจัยทั้งเชิงวิทยาศาสตร์และสังคมศาสตร์เป็นค่าอ้างอิงในการตอบวัตถุประสงค์ และสมมติฐานของงานวิจัยอย่างเป็นวิทยาศาสตร์ สถิติที่ใช้อธิบายผลเฉพาะกลุ่มที่ศึกษาเรียกว่าสถิติพรรณนา สถิติที่ใช้ข้อสรุปจากตัวอย่างหรือกลุ่มทดลองแล้วใช้อธิบายพารามิเตอร์ของประชากรเรียกว่าสถิติอนุมาน สถิติพรรณนาที่ใช้กันเป็นพื้นฐานของงานวิจัยได้แก่ จำนวน ร้อยละ การวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง และการวัดการกระจาย ค่าเฉลี่ยเลขคณิตเป็นแนวโน้มเข้าสู่ส่วนค่ากลางที่มีการใช้มากที่สุดทั้งในการอธิบายข้อมูลเชิงปริมาณและข้อมูลเชิงคุณภาพแบบริเคริท-สเกล จุดเด่นของค่าเฉลี่ยได้แก่ความละเอียดเข้าใจง่าย จุดอ่อนคือข้อมูลบางตัวที่ผิดปกติจะมีผลต่อค่าเฉลี่ยเลขคณิต ดังนั้นในงานวิจัยบางชิ้นที่ใช้มาตรวัดแบบประมาณค่า 5 ระดับจึงมีการใช้ ค่าคะแนนร้อยละแบบ ท็อปทูบ๊อกแทนค่าเฉลี่ยเลขคณิตแต่ก็ยังมีการใช้ไม่แพร่หลายนักในประเทศไทย

ช่วงปี 2565 จนถึงต้นปี 2566 ภาพรวมอสังหาริมทรัพย์ มีแนวโน้มขยายตัวอย่างต่อเนื่อง หลังจากสถานการณ์ท่องเที่ยวขยายตัวด้วยดี นักท่องเที่ยวให้ความสนใจเข้ามาเลือกซื้อที่อยู่อาศัยในไทย หลังเกิดสงครามรัสเซีย-ยูเครน พร้อมยังได้รับผลดีจากตลาดใหม่ที่เข้ามาทั้งตะวันออกกลางและอินเดีย รวมถึงมีตลาดจีนที่กลับเข้ามาในประเทศไทยแล้ว ทำให้การลงทุนอสังหาริมทรัพย์ ขยายตัวต่อเนื่อง ทั้งการซื้อเพื่ออยู่อาศัย และการซื้อเพื่อการลงทุน คาดการณ์โครงการคอนโดฯ เปิดใหม่ปี 2566 ขยายตัว 20% จากปีก่อน โดยเฉพาะแรงส่งจากซิตี้คอนโดฯ ในกรุงเทพฯ ส่วนหนึ่งมีกำลังซื้อจากต่างชาติเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง แม้จะมีแนวโน้มการขยายตัวที่สดใส แต่ก็มีอุปสรรคต่อธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ ได้แก่ 1)ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นจากค่าแรงขั้นต่ำปรับตัวขึ้น ค่าน้ำมันสูงขึ้น ค่าวัสดุก่อสร้างเพิ่มขึ้น ประมาณ 5-10% 2) ภาวะเงินเฟ้อ ดอกเบี้ยเงินกู้สูงขึ้น 3) ดอกเบี้ยนโยบายสูงขึ้นคณะกรรมการนโยบายการเงิน (กนง.) มีมติเป็นเอกฉันท์ให้ขึ้นอัตราดอกเบี้ยนโยบาย 0.25% ต่อปี จาก 1.25%

เป็น 1.50% ต่อปี ทำให้ภาระค่าผ่อนบ้านของผู้ซื้อบ้านยิ่งสูงขึ้นไปอีก 4) ราคาประเมินที่ดินสูงขึ้นถึง 8.93% โดยที่ดินในกรุงเทพฯ (กรุงเทพธุรกิจ, 2566)

ธุรกิจอสังหาฯ มีแนวโน้มขยายตัวภายใต้ข้อจำกัดต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วซึ่งเป็นทั้งโอกาสและภัยคุกคาม การแข่งขันในธุรกิจยังมีความรุนแรงเช่นเดิม กลยุทธ์ทางการตลาดต่าง ๆ จึงถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขันและการเติบโตขององค์กรของตนเอง ส่วนประสมทางการตลาด 7Ps เป็นกลยุทธ์ทางการตลาดที่นักการตลาดนำมาใช้เพื่อความสำเร็จของธุรกิจของตน ซึ่งประกอบด้วย 1) ผลิตภัณฑ์และบริการ 2) ราคา 3) ช่องทางการจัดจำหน่าย 4) การส่งเสริมการตลาด 5) บุคคลหรือพนักงานในองค์กร 6) สิ่งแวดล้อมทางกายภาพ และ 7) กระบวนการ (Kotler, P. 1997.) ความพึงพอใจต่อส่วนประสมทางการตลาดจึงเป็นกลยุทธ์ที่มีการนำมาใช้ในธุรกิจบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัย สถิติที่ใช้เป็นพื้นฐานสำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับความพึงพอใจในส่วนประสมทางการตลาดส่วนใหญ่คือค่าเฉลี่ยเลขคณิตแต่ก็จะมีงานวิจัยบางชิ้นที่ใช้คะแนนท็อปทูบ็อกเช่นงานวิจัยของการแคหะแห่งชาติมีการใช้สถิตินี้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการศึกษาความสัมพันธ์หรือความสอดคล้องระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตและคะแนนท็อปทูบ็อก (Top 2 Box score) ของความพึงพอใจในส่วนประสบทางการตลาด 7Ps

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาระดับความพึงพอใจในส่วนประสมทางการตลาดทั้ง 7 ด้าน ได้แก่ 1) ผลิตภัณฑ์และบริการ 2) ราคา 3) ช่องทางการจัดจำหน่าย 4) การส่งเสริมการตลาด 5) บุคคลหรือพนักงานในองค์กร 6) สิ่งแวดล้อมทางกายภาพ และ 7) กระบวนการของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัย

2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตกับคะแนนท็อปทูบ็อกของระดับความพึงพอใจในส่วนประสมทางการตลาดทั้ง 7 ด้าน

2.3 แหล่งข้อมูลการวิจัยในส่วนนี้ ผู้วิจัยทำการเลือกตัวแทนลูกค้าธุรกิจบ้านจัดสรร ทั้งในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล รวมทั้งในส่วนภูมิภาคโดยการสุ่มตัวอย่างแบบหลายขั้นตอนเพื่อตอบแบบสอบถามจำนวน 1,000 ราย

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ส่วนประสมการตลาด 7P's (Marketing Mix 7P's)

เป็นแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับธุรกิจให้บริการกำหนด กลยุทธ์การตลาดไว้ 7 อย่างเรียกว่าส่วนประสมการตลาด (Marketing Mix) 7P's ของ ศาสตราจารย์ ฟิลลิป ค็อตเล่อร์ (Philip Kotler) กูรูด้านการตลาดชั้นนำของโลก ประกอบด้วย 1) ผลิตภัณฑ์และบริการ (Product & Service) 2) ราคา (Price) 3) ช่องทางการจัดจำหน่าย (Place) 4) การส่งเสริมการตลาด (Promotion) 5) บุคคลหรือพนักงานในองค์กร (People) 6) สิ่งแวดล้อมทางกายภาพ (Physical Environment) และ7) กระบวนการ (Process)

3.2 คะแนนท็อปทูบ็อก (Top 2 Box score)

เป็นร้อยละของสัดส่วนกลุ่มตัวอย่างที่มีความพึงพอใจระดับ 4 และ 5 จาก 5 ระดับ ดังสมการที่ (1)

$$\text{ScoreTop2boxes} = \frac{\sum_{i=4}^{5} f_i}{n} \times 100\% \quad (1)$$

f_i = จำนวนตัวอย่างที่ตอบ 4 และ 5 n = จำนวนตัวอย่างทั้งหมด

3.3. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์

3.3.1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมน เป็นสถิติสำหรับ วิเคราะห์ความสอดคล้องของลำดับที่ของตัวแปร 2 ตัว ดังสมการที่ (2)

$$\rho = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (2)$$

ρ = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมน n = ขนาดตัวอย่าง

d_i = ผลต่างระหว่างอันดับของตัวแปรทั้ง 2 ตัว ของตัวอย่างที่ i

3.3.2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันเป็นสถิติสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว ดังสมการที่ (3)

$$r = \frac{n(\sum_{i=1}^{n} x_i y_i) - (\sum_{i=1}^{n} x_i)(\sum_{i=1}^{n} y_i)}{\sqrt{[n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} x_i)^2][n\sum_{i=1}^{n} y_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} y_i)^2]}} \quad (3)$$

r = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเพียร์สัน

x_i = ค่าสังเกตของตัวแปร x ในตัวอย่างที่ i

y_i = ค่าสังเกตของตัวแปร y ในตัวอย่างที่ i

n = ขนาดตัวอย่าง

3.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเฉลี่ยและคะแนนท็อปทูบ็อกของความพึงพอใจใน 7Ps ของธุรกิจบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัย ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่พอจะเทียบเคลียงได้ เช่น งานวิจัยของ อำนาจ วังจีน และคณะ (2563.) ได้ศึกษาเรื่องความสอดคล้องระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตรวมกับคะแนนองค์ประกอบของความพึงพอใจในส่วนประสมทางการตลาด 7Ps ของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัย พบว่า ส่วนประสมทางการตลาดที่มีสำคัญที่สุดคือด้านผลิตภัณฑ์และบริการ ด้านสิ่งแวดล้อมทางกายภาพ และด้านราคา [8]

รุ่งกานต์ ภู่หอมเจริญ และ พัศพันธน์ ชาญวสุนันท์ (2564) ศึกษาเรื่อง ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อคอนโดมิเนียมประเภทเช่าระยะยาว: กรณีศึกษา โครงการทริปเปิ้ล วาย เรสซิเดนซ์ ผลของงานวิจัยพบว่าส่วนประสมทางการตลาดด้านราคามีผลต่อการตัดสินใจซื้อคอนโดมิเนียม [5]

กิตติคม พจนี (2566) ศึกษาเรื่อง 10 ปัจจัยที่คนส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับการเลือกที่อยู่อาศัยในปัจจุบัน พบว่าใน 10 ปัจจัยสำคัญที่ได้จากการศึกษาไม่แตกต่างจากส่วนประสมทางการตลาด ได้แก่ 1) ทำเล 2) ศักยภาพทำเลในอนาคต 3) ความปลอดภัยบนพื้นที่ 4) ราคา 5) การเข้าถึงระบบขนส่งสาธารณะ 6) ดีไซน์ที่อยู่อาศัย 7) พื้นที่ใช้สอยของที่อยู่อาศัย 8) ความสามารถทางการเงินในการเลือกซื้อที่อยู่อาศัย 9) สิ่งอำนวยความสะดวกในโครงการและ 10) ใกล้ชิดรถไฟฟ้า สอดคล้องกับการศึกษาของ อดุลย์ อุฬุมปานนท์ (2563) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้อบ้านเดี่ยวสำเร็จรูปในเขตกรุงเทพมหานคร ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาด (7Ps) ที่ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้อบ้านเดี่ยว ได้แก่ ปัจจัยด้านผลิตภัณฑ์ ด้านการส่งเสริมการตลาด ด้านกระบวนการและด้านลักษณะทางกายภาพ [1]

ภัทระ ลิ่มกาญจนา (2566) ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกซื้อบ้านจัดสรร ของบุคลากรทางการแพทย์ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดยะลา ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกซื้อบ้านจัดสรร จำนวน 3 ด้าน ได้แก่ ด้านราคา ด้านช่องทางการจัดจำหน่าย และด้านบุคลากร [4]

จิราวรรณ ศรีเปรม และ บุฏกา ปัณฑุรอัมพร (2564) ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อที่อยู่อาศัย ของประชากร ในเขตกรุงเทพมหานคร ภายหลังการเกิดสถานการณ์ Covid-19 ผลการศึกษาสรุปได้ว่าปัจจัย ด้านราคา ด้านผลิตภัณฑ์ และด้านทำเลที่ตั้งมีผลต่อการตัดสินใจซื้อที่อยู่อาศัยของประชากร ใน เขตกรุงเทพมหานคร [5]

หนึ่งฤทัย ทาเอื้อ (2563) ศึกษาเรื่องปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อที่อยู่อาศัยประเภทคอนโดมิเนียมของกลุ่มลูกค้า GEN Y ประเภทเพื่ออยู่อาศัย (Real Demand) ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อที่อยู่อาศัยประเภทคอนโดมิเนียมของกลุ่มลูกค้า GEN Y ประเภทเพื่ออยู่เพื่ออยู่อาศัย คือ ด้านการส่งเสริมการตลาด ซึ่งอาจจะเป็นเพราะเป็นการศึกษาเฉพาะกลุ่ม ที่อยู่อาศัยประเภทคอนโดมิเนียม และกลุ่มลูกค้า GEN Y เท่านั้น [6]

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรในการศึกษา คือ ลูกค้าที่อาศัยอยู่ในบ้านจัดสรรและ/หรืออาคารชุดที่พักอาศัย ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล และส่วนภูมิภาค สุ่มตัวอย่างด้วยวิธีการสุ่มแบบหลายขั้นตอน ประกอบด้วย 1) สุ่มตัวอย่างจังหวัดตามภูมิภาคที่มีความเป็นเมืองและมีบ้านจัดสรรและ/หรืออาคารชุดหนาแน่นในพื้นที่ ประกอบด้วย ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออก ภาคตะวันตก และภาคใต้ จำนวน 1 จังหวัดต่อ 1 ภาค รวม 6 จังหวัด ปริมณฑล 1 จังหวัด และ กรุงเทพฯ รวม 8 จังหวัด ได้แก่ ขอนแก่น ชลบุรี เชียงใหม่ ภูเก็ต ราชบุรี อยุธยา สมุทรปราการ และ กรุงเทพฯ ด้วยการสุ่มอย่างแบบเจาะจง 2) สุ่มตัวอย่างโครงการบ้านจัดสรรและหรืออาคารชุดที่พักอาศัยมาจังหวัดละ 2 โครงการ และ กรุงเทพฯ 6 โครงการ รวม 20 โครงการด้วยการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจงและ 3) สุ่มกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 50 ตัวอย่างต่อโครงการ โดยการสุ่มตัวอย่างอย่างง่าย รวมเป็นจำนวนทั้งสิ้น 1,000 ตัวอย่าง

4.2 แหล่งข้อมูล

แหล่งข้อมูลการวิจัยในส่วนนี้ คือ ลูกค้าที่อาศัยอยู่ในบ้านจัดสรรและ/หรืออาคารชุดที่พักอาศัย ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลและส่วนภูมิภาคจำนวน 20 โครงการ ด้วยแบบสอบถามจำนวน 1 ฉบับ

4.3 เครื่องมือในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ประกอบด้วยแบบสอบถามแบบประเมินค่า 5 ระดับในเรื่องความพึงพอใจในส่วนประสมทางการตลาดทั้ง 7 ด้าน จำนวน 1 ชุดรวม 17 ข้อ

ทำการตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือโดย

1) ตรวจสอบความเที่ยงตามเนื้อหาของแบบสอบถาม (Content Validity) โดยใช้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน ได้ค่า IOC มากกว่า 0.5 ทุกข้อ

2) การทดสอบความเชื่อมั่น ได้ค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.880

4.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยการขอความร่วมมือจากโครงการบ้านและที่พักอาศัยต่าง ๆ ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล และส่วนภูมิภาคโดยดำเนินการด้วยตนเองทีมงาน

4.5 การวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

1) ใช้การจำแนกความถี่ (Frequency) การหาค่าร้อยละ (Percentage) ในการแจงนับจำนวนและหาค่าร้อยละในการอธิบายระดับความพึงพอใจในส่วนประสมทางการตลาดทั้ง 7 ด้าน

2) คำนวณคะแนนท็อปทูบ็อกของความพึงพอใจในในส่วนประสบทางการตลาด 7Ps

3) ใช้หาค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ในการอธิบายระดับความพึงพอใจในส่วนประสมทางการตลาดทั้ง 7 ด้าน (การแปลความหมายของค่าเฉลี่ยเลขคณิต 1.00 - 1.79 หมายถึงระดับน้อยที่สุด 1.80 - 2.59 หมายถึงระดับน้อย 2.60 - 3.39 หมายถึงระดับปานกลาง 3.40 - 4.19 หมายถึงระดับมาก และ 4.20 - 5.00 หมายถึงระดับมากที่สุด)

4) ใช้การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สเปียร์แมน วิเคราะห์ความสอดคล้องของลำดับค่าเฉลี่ยเลขคณิตและคะแนนท็อปทูบ็อกของความพึงพอใจในในส่วนประสบทางการตลาด 7Ps

5) ใช้การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันวิเคราะห์ความสอดคล้องของลำดับค่าเฉลี่ยเลขคณิตและคะแนนท็อปทูบ็อกของความพึงพอใจในในส่วนประสบทางการตลาด 7Ps

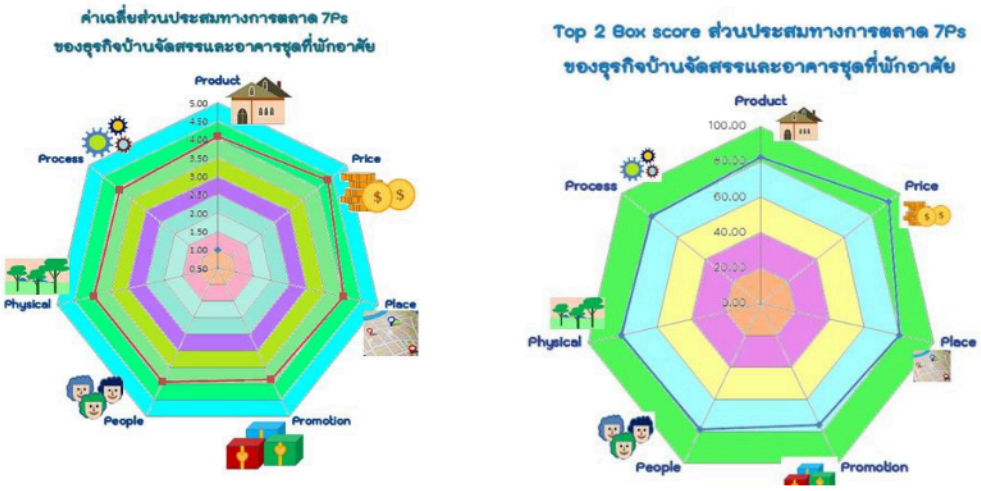
6) การใช้สถิติเชิงอนุมานทดสอบสมมติฐานทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

5. ผลการวิจัย

5.1 ภาพรวมค่าเฉลี่ยเลขคณิตความพึงพอใจส่วนประสมทางการตลาดของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัยอยู่ในระดับมาก (มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 4.02) โดยด้านที่มีความพึงพอใจสูงที่สุดได้แก่ ราคา อยู่ในระดับมากที่สุด (มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 4.34) รองลงมาเป็นผลิตภัณฑ์และบริการ อยู่ในระดับมาก (มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 4.09) ถัดมาเป็นด้านด้านช่องทางการจัดจำหน่ายอยู่ในระดับมาก (มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 4.02) และต่ำที่สุดเป็นด้านการส่งเสริมการตลาดอยู่ในระดับมาก (มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 3.88) ส่วนร้อยละคะแนนท็อปทูบ็อกมีภาพรวมเท่ากับ 81.01 โดยด้านที่มีร้อยละคะแนนความพึงพอใจท็อปทูบ็อก สูงที่สุดได้แก่ ราคา (ร้อยละ 92.10) รองลงมาเป็นด้านผลิตภัณฑ์และบริการ (มีร้อยละคะแนนความพึงพอใจท็อปทูบ็อก 82.68) ถัดมาเป็นสิ่งแวดล้อมทางกายภาพ(ร้อยละคะแนนความพึงพอใจท็อปทูบ็อก 80.63) และต่ำที่สุดเป็นด้านการส่งเสริมการตลาดอยู่ในระดับมาก (ร้อยละคะแนนความพึงพอใจท็อปทูบ็อก 75.85) ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงระดับความพึงพอใจในส่วนประสมทางการตลาดของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัย

รายละเอียด	ความพึงพอใจ		
	$\bar{X}$	S.D.	สัดส่วน (%) Top 2 Boxes
1) ผลิตภัณฑ์และบริการ (Product & Service)	4.09	0.52	82.68
2) ราคา (Price)	4.34	0.66	92.10
3) ช่องทางการจัดจำหน่าย (Place)	4.02	0.74	80.40
4) การส่งเสริมการตลาด (Promotion)	3.88	0.65	75.85
5) บุคคลหรือพนักงานในองค์กร (People)	3.94	0.64	78.60
6) สิ่งแวดล้อมทางกายภาพ(Physical Environment)	3.97	0.57	80.63
7) กระบวนการ (Process)	3.91	0.65	78.90
รวม	4.02	0.45	81.01



รูปที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยและคะแนนท็อปทูบ็อกระดับความพึงพอใจส่วนประสมทางการตลาดของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัย

5.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์พบว่าค่าเฉลี่ยเลขคณิตกับคะแนนท็อปทูบ็อกความพึงพอใจส่วนประสมทางการตลาดของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัยมีความสัมพันธ์ระดับสูงมากในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ (Pearson Correlation) เท่ากับ 0.984 และ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบสเปียร์แมน (Spearman's rho) เท่ากับ 0.929 ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกับคะแนนท็อปทูบ็อกความพึงพอใจส่วนประสมทางการตลาด 7Ps ของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัย

รายละเอียด	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
Pearson Correlation	0.984**
Spearman's rho	0.929**

* มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ** มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

5.3 ผลการศึกษาค่าเฉลี่ยเลขคณิตความพึงพอใจส่วนประสมทางการตลาดของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัยจำแนกตามตัวชี้วัด 17 ตัวชี้วัดพบว่า ลูกค้าให้ความพึงพอใจสูงที่สุดในเรื่องโครงการอยู่ใกล้ที่ทำงาน เดินทางสะดวก ใกล้แหล่งชุมชนอยู่ในระดับมากที่สุด (มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 4.45) รองลงมาเป็นเรื่อง ราคาบ้าน/ค่าเช่า ยอมรับได้อยู่ในระดับมากที่สุด (มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 4.34) ถัดมาเป็นเรื่องคุณภาพวัสดุก่อสร้าง/บ้าน ได้มาตรฐานระดับมากที่สุด (มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 4.34) เรื่องผังโครงการ จัดวางดี เป็นส่วนตัว พื้นที่ใช้สอยในบ้านกว้างขวางระดับมาก (มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 4.09) เรื่องพื้นที่ส่วนกลางใช้ประโยชน์ได้มากระดับมาก (มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.08) มีสำนักงาน ขาย ณ ที่ตั้งโครงการและมีเพื่อนบ้านและสังคมที่ดีระดับมาก (มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตเท่ากับ 4.02) ส่วนร้อยละคะแนนท็อปทูบ็อกลูกค้าให้ความพึงพอใจสูงที่สุดในเรื่องโครงการอยู่ใกล้ที่ทำงาน เดินทางสะดวก ใกล้แหล่งชุมชน (ร้อยละ 95.70) รองลงมาเป็นเรื่องราคาบ้าน/ค่าเช่า ยอมรับได้ (ร้อยละ 92.10) เรื่องผังโครงการ จัดวางดี เป็นส่วนตัว พื้นที่ใช้สอยในบ้านกว้างขวาง พื้นที่ส่วนกลางใช้ประโยชน์ได้มาก

(ร้อยละ 83.40) เรื่อง มีการบริหาร/พัฒนาชุมชนให้น่าอยู่ มีการบริหาร/พัฒนาชุมชน ให้บ้านมีมูลค่าเพิ่ม(ร้อยละ 82.40) มีเพื่อนบ้าน และสังคมที่ดี(ร้อยละ 81.30) ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงระดับส่วนประสมทางการตลาดของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัย

รายละเอียด	ความพึงพอใจ		
	$\bar{X}$	S.D.	สัดส่วน (%) Top 2 Boxes
1. โครงการอยู่ใกล้ที่ทำงาน เดินทางสะดวก ใกล้แหล่ง	4.45	0.63	95.70
2. คุณภาพวัสดุก่อสร้างได้มาตรฐาน	4.09	0.80	79.90
3. ผังโครงการ จัดวางดี พื้นที่ใช้สอยในบ้านกว้างขวาง	4.08	0.77	83.40
4. แบบบ้านสวยงาม ทันสมัย ตอบโจทย์การใช้ชีวิต	3.94	0.78	77.60
5. มีบริการสินเชื่อบ้าน/เช่าซื้อ	3.98	0.79	79.70
6. มีบริการหลังการขายที่ดี	3.99	0.79	79.80
7. ราคาบ้าน ยอมรับได้	4.34	0.66	92.10
8. มีสำนักงาน ขาย ณ ที่ตั้งโครงการ	4.02	0.74	80.40
9. มีโปรโมชั่น ดึงดูดใจ	3.93	0.77	77.80
10. มีศูนย์ดูแลสุขภาพ ศูนย์ฝึกอาชีพในโครงการ	3.82	0.81	73.90
11. การให้บริการของตัวแทนขาย	3.94	0.76	78.00
12. ความรู้ความสามารถของตัวแทนขาย	3.94	0.76	79.20
13. มีพื้นที่สีเขียว เป็นธรรมชาติ สภาพแวดล้อมดี น่าอยู่	3.97	0.78	80.40
14. มีสิ่งอำนวยความสะดวก เช่น สวนสาธารณะ เป็นต้น	3.91	0.79	80.20
15. มีเพื่อนบ้าน และสังคมที่ดี	4.02	0.78	81.30
16. มีระบบรักษาความปลอดภัยที่ดี	3.84	0.81	75.40
17. มีการบริหาร/พัฒนาชุมชนให้น่าอยู่	3.98	0.72	82.40

5.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์พบว่าค่าเฉลี่ยเลขคณิตกับคะแนนท็อปทูบ็อกความพึงพอใจส่วนประสมทางการตลาดของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัยจำแนกตามตัวชี้วัด 17 ตัวชี้วัดมีความสัมพันธ์สูงมากในทิศทางเดียวกันโดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน เท่ากับ 0.967 และ Spearman's rho เท่ากับ 0.822 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกับคะแนนท็อปทูบ็อกของความพึงพอใจส่วนประสมทางการตลาดของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัยจำแนกตามตัวชี้วัด

รายละเอียด	Correlations
Pearson Correlation	0.967**
Spearman's rho	0.822**

* มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ** มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

6. สรุป

ผลจากการศึกษาพบว่า ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดทั้ง 7 ด้าน ได้แก่ ด้านผลิตภัณฑ์และบริการ ด้านราคาด้านช่องทางการจัดจำหน่าย การส่งเสริมการตลาด บุคคลหรือพนักงานในองค์กร สิ่งแวดล้อมทางกายภาพ และ กระบวนการ มีค่าเฉลี่ยเลขคณิตอยู่ในระดับมากถึงมากที่สุด จึงกล่าวได้ว่าส่วนประสมทางการตลาดทั้ง 7 มีความสำคัญต่อกลยุทธ์ทางการตลาดของธุรกิจบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัยสอดคล้องกับทฤษฎีส่วนประสมทางการตลาดของ Kotler (Kotler, P. 1997.) โดยปัจจัยด้านที่มีความสำคัญสูงที่สุดในงานวิจัยนี้ได้แก่ ด้านราคา รองลงมาเป็น ด้าน ผลิตภัณฑ์และบริการ ซึ่งถือกลยุทธ์ที่หลายกลุ่มพัฒนาอสังหาริมทรัพย์ใช้กันอยู่ รูปแบบที่ตอบโจทย์ในราคาที่ จับต้องได้และบริการที่ดี สอดคล้องกับการศึกษาของ อำนาจ วังจีน และคณะ (2563.) ได้ศึกษาเรื่องความสอดคล้องระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตรวมกับคะแนนองค์ประกอบของความพึงพอใจในส่วนประสมทางการตลาด 7Ps ของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัย พบว่าส่วนประสมทางการตลาดที่มีสำคัญที่สุดคือด้านผลิตภัณฑ์และบริการ ด้านสิ่งแวดล้อมทางกายภาพ และด้านราคา[8] สอดคล้องกับการศึกษาของ รุ่งกานต์ ภู่หอมเจริญ และ พัศพันธน์ ชาญวสุนันท์ (2564) ศึกษาเรื่อง ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อคอนโดมิเนียมประเภทเช่าระยะยาว: กรณีศึกษา โครงการทริปเปิ้ล วาย เรสซิเดนซ์ ผลของงานวิจัยพบว่าส่วนประสมทางการตลาดด้านราคา มีผลต่อการตัดสินใจซื้อคอนโดมิเนียม[5] สอดคล้องกับการศึกษาของ กิตติคม พจนี (2566) ศึกษาเรื่อง 10 ปัจจัยที่คนส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับการเลือกที่อยู่อาศัยในปัจจุบัน พบว่า ใน 10 ปัจจัยสำคัญที่ได้จากการศึกษาไม่แตกต่างจากส่วนประสมทงการตลาด ได้แก่ 1) ทำเล 2) ศักยภาพทำเลในอนาคต 3) ความปลอดภัยบนพื้นที่ 4) ราคา 5) การเข้าถึงระบบขนส่งสาธารณะ 6) ดีไซน์ที่อยู่อาศัย 7) พื้นที่ใช้สอยของที่อยู่อาศัย 8) ความสามารถทางการเงินในการเลือกซื้อที่อยู่อาศัย 9) สิ่งอำนวยความสะดวกในโครงการและ 10) ใกล้ชิดรถไฟฟ้า[1] สอดคล้องกับการศึกษาของ อดุลย์ อุฬุมปา นนท์ (2563) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้อบ้านเดี่ยวสำเร็จรูปใน เขตกรุงเทพมหานคร ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยส่วนประสมทางการตลาด (7Ps) ที่ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้อบ้านเดี่ยวได้แก่ปัจจัยด้านผลิตภัณฑ์ ด้านการส่งเสริมการตลาด ด้านกระบวนการและด้านลักษณะทางกายภาพ[7] สอดคล้องกับการศึกษาของ ภัทระ ลิ่มกาญจนา (2566) ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกซื้อบ้านจัดสรร ของบุคลากรทางการแพทย์ ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดยะลา ผลการศึกษาพบว่าปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกซื้อบ้านจัดสรร จำนวน 3 ด้าน ได้แก่ ด้านราคา ด้านช่องทางการจัดจำหน่าย และด้านบุคลากร[4] สอดคล้องกับการศึกษาของจิราวรรณ ศรีเปรม และ บุฏกา ปัณฑุรอัมพร (2564) ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อที่อยู่อาศัย ของประชากร ในเขตกรุงเทพมหานคร ภายหลังการเกิดสถานการณ์ Covid-19[3] ผลการศึกษาสรุปได้ว่าปัจจัย ด้านราคา ด้านผลิตภัณฑ์ และด้านทำเลที่ตั้ง มีผลต่อการตัดสินใจซื้อที่อยู่อาศัยของประชากร ใน เขตกรุงเทพมหานครแตกต่างจากการศึกษาของ หนึ่งฤทัย ทาเอื้อ (2563) ศึกษาเรื่องปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อที่อยู่อาศัยประเภทคอนโดมิเนียมของกลุ่มลูกค้า GEN Y ประเภทเพื่ออยู่อาศัย (Real Demand) ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อที่อยู่อาศัยประเภทคอนโดมิเนียมของกลุ่มลูกค้า GEN Y ประเภทเพื่ออยู่เพื่ออยู่อาศัยคือ ด้านการส่งเสริมการตลาด ซึ่งอาจจะเป็นเพราะเป็นการศึกษาเฉพาะกลุ่ม ที่อยู่อาศัยประเภทคอนโดมิเนียม และกลุ่มลูกค้า GEN Y เท่านั้น[6]

ผลจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตกับคะแนนท็อปทูบ็อกความพึงพอใจส่วนประสมทางการตลาดของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัยมีความสัมพันธ์ระดับสูงมากในทิศทางเดียวกันทั้งสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบ และ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบสเปียร์แมน จึงอาจสรุปได้ว่าการพิจารณาลำดับความสำคัญในการศึกษาปัจจัยส่วนประสมทางการตลาดทั้ง 7 ด้าน ของธุรกิจบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัยสามารถใช้ได้ทั้งค่าเฉลี่ยเลขคณิตและคะแนนท็อปทูบ็อก จึงอาจจะกล่าวได้ว่าสถิติในการศึกษาลำดับความสำคัญของส่วนประสมทางการตลาดมีมากกว่าหนึ่งวิธีและให้ผลที่สอดคล้องกัน สอดคล้องกับการศึกษาของ อำนาจ วังจีน. (2563). "ความสอดคล้องระหว่างค่าเฉลี่ยเลขคณิตรวมกับคะแนนองค์ประกอบของความพึงพอใจในส่วนประสมทางการตลาด 7Ps ของลูกค้าบ้านจัดสรรและ

อาคารชุดที่พักอาศัย ซึ่งพบว่า ค่าเฉลี่ยเลขคณิตรวมและคะแนนองค์ประกอบของความพึงพอใจในส่วนประสมทางการตลาดทั้ง 7Ps มีความสัมพันธ์กันสูงมาก [8] การวิจัยครั้งนี้จึงได้เสนอวิธีการทางสถิติอีกวิธีหนึ่งสำหรับการวิจัยต่อไป

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 การนำผลการวิจัยนี้ไปใช้ในการวามแผนเชิงกลยุทธ์ในการบริหารจัดการธุรกิจบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัย คะแนนท็อปทูบ็อกเป็นวิธีทางสถิติอีกหนึ่งวิธีที่นำไปใช้ในงานวิจัยทางธุรกิจได้

7.2 ควรมีการศึกษาปรียบเทียบความแตกต่างความพึงพอใจในส่วนประสมทางการตลาดคะแนนท็อปทูบ็อกและค่าเฉลี่ยเลขคณิตระหว่างลักษณะทางประชากรประชากรศาสตร์ของกลุ่มลูกค้า

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานการเคหะแห่งชาติ ศูนย์วิทยบริการ และสำนักวิชาศึกษาทั่วไป มหาวิทยาลัยศรีปทุม ในการให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและประเมินเครื่องมือในการวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

9. เอกสารอ้างอิง

[1] กิตติคม พจนี. (2561). 10 ปัจจัยที่คนส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับการเลือกที่อยู่อาศัยในปัจจุบัน. สืบค้น 10 มกราคม 2566, จาก https://www.ddproperty.com.

[2] กรุงเทพธุรกิจ. (2566). อสังหาฯ ปี 66 เคลื่อนทัพฝ่าปัจจัยลบ แนะรัฐหนุนมาตรการเร่งฟื้นตลาด. กรุงเทพฯ: กรุงเทพธุรกิจ.

[3] จิราวรรณ ศรีเปรม และ บุฏกา ปัณฑุรอัมพร. (2564). ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อที่อยู่อาศัยของประชากรในเขตกรุงเทพมหานคร. (บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยรามคำแหง. กรุงเทพฯ).

[4] ภัทระ ลิ่มกาญจนา. (2566). ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกซื้อบ้านจัดสรร ของบุคลากรทางการแพทย์ ในเขตอำเภอเมืองจังหวัดยะลา. (บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา).

[5] รุ่งกานต์ ภู่หอมเจริญและ พัศพันธน์ ชาญวสุนันท์. (2564). ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อคอนโดมิเนียมประเภทเช่าระยะยาว: กรณีศึกษา โครงการทริปเปิ้ล วาย เรสซิเดนซ์. *สาระศาสตร์*. คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ฉบับที่ 1/2564: 139-149.

[6] หนึ่งฤทัย ทาเอื้อ. (2563). ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อที่อยู่อาศัยประเภทคอนโดมิเนียมของกลุ่มลูกค้า GEN Y ประเภทเพื่ออยู่อาศัย ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร. (การจัดการมหาบัณฑิต วิทยาลัยการจัดการ มหาวิทยาลัยมหิดล).

[7] อดุลย์ อุทุมปานนท์. (2563). ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้อบ้านเดี่ยวสำเร็จรูปในเขตกรุงเทพ. สืบค้น 10 มกราคม 2566 จาก https://mmm.ru.ac.th/MMM/IS/ml10/6114962075.pdf

[8] อำนาจ วังจีน. (2563). ความสอดคล้องระหว่างค่าเฉลี่ยรวมกับคะแนนองค์ประกอบของความพึงพอใจในส่วนประสมทางการตลาด 7Ps ของลูกค้าบ้านจัดสรรและอาคารชุดที่พักอาศัย. การวิจัยและนวัตกรรมสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน, 18 ธันวาคม 2563. ครั้งที่ 15 มหาวิทยาลัยศรีปทุม. กรุงเทพฯ:มหาวิทยาลัยศรีปทุม. 808 - 818.

[9] Kotler, Philip. (1997). Marketing Management: Analysis, Planning, Implement, and Control. 9th ed., Prentice-Hall, Inc.

[10] Kotler, Philip. (2003). Marketing Management. 10th ed. Upper saddle river, NJ:Prenticehall, 2561 .

A Hybrid Model for Path Loss Estimation in Avenue Environment

[1*]**Narathep Phruksahiran**

Department of Electrical Engineering, Chulachomklao Royal Military Academy, Nakhon Nayok, Thailand

[*]narathepp@gmail.com

Received: February 16, 2024

Revised: August 15, 2024

Accepted: August 26, 2024

Abstract

Diverse propagation mechanisms complicate propagation analysis and modeling for a foliage condition. Therefore, a simpler optimized hybrid propagation model, which maintains or improves accuracy but preserves a cooperative relationship with physics, would be insightful. We evaluate an approach for developing a radio-wave propagation prediction model in an avenue area by combining the path loss in free space and environment parameters. It is demonstrated that this two-mechanism hybrid model can provide an accurate fit to the profile of through forest propagation over a long distance, which is impossible with the definitive radiative energy transfer model. The predicted model results were validated using radio-wave propagation in the FM band measurement data. The results obtained from the developed Free-Med model will differ slightly from the measurements under the avenue environment compared to the free space path loss model, Okumura-Hata path loss model, and the Perez-Vega path loss model, as can be seen from the values of the variables MAE and RMSE, which are 1.4966 [dB] and 1.8288 [dB], respectively.

Keywords: Path loss estimation, Avenue environment, Radio wave propagation

1. Introduction

The propagation of radio waves in very high frequency (VHF) bands is always the cornerstone and recreate a significant part of general communications. VHF is the radio frequency scope from 30-300 MHz, which covers television and frequency modulation (FM) radio broadcasts at 80-108 MHz [1] and can provide audio and information services using the existing FM bands and channel spacing [2]. In recent years, the radio system's quality and coverage have been significant issues for conception and development. In supplement to communication, the FM technique can furthermore be applied in diverse applications such as sending photo information on the FM radio broadcasting infrastructure [3], sharing time data through another FM broadcasting channel [4], FM radio source localization application [5], and passive radar system based on FM radio system [6].

However, the system's quality and efficiency depend on the signal parameter, signal intensity level, signal-to-noise ratio, and coverage of the area used. Therefore, it is essential to consider a system's propagation features through a medium for the estimation of the signal parameters accurately [7] and to understand how signals are attenuated over distance in a realistic environment [8]. In addition, network engineers require techniques for accurately mapping the coverage area of

existing and planned networks. The radio propagation models can be used to represent the radio wave's behavior when transmitted from transmitter to receiver and indicate the association of the space between transmitter and receiver and path loss, which are connected closely to specific propagation conditions [9].

Developing and improving mathematical models to describe radio propagation properties are based on signal magnitude measurements under diverse conditions. Over the years, researchers have performed experimentations to estimate radio propagation underneath distinct requirements and environmental aspects, such as The outdoor measurement campaigns for 5G system at 32 GHz [10], the measurement of path loss on the ground-to-air path using a drone-based measurement system [11], the vegetation loss measurement at D-band frequencies [12], the signal propagation at ground level [13], open-space static measurements in a stadium [14], the empirical neat ground path loss modeling in a forest at VHF bands [15], the radio propagation dynamics in the forest [16], the network deployment in snowy environments [17] and the device-to-device communication in forest terrain [18]. Distinct environments will instantly impact the propagation of radio waves. Therefore, tests were carried out in each country to acquire knowledge and aspects that are appropriate and consistent with the validity in each area, such as the path loss measurement in a Brazilian Atlantic rainforest urban site [19], in New York City [20] and in Amazonian border region [21].

Because the individual model has distinct features and implementation, numerous investigators have resembled model performance based on measures in further environmental requirements, such as the comparison of path loss models for UHF/VHF bands [22], the measurements and models for signal attenuation in vegetated areas [23] and the efficacy of some unpopular path loss propagation models [24]. However, the values obtained from measurements often need to be more precise from the model, which has a continuous curve. Therefore, analyzing the measured values using graphing processes is essential to construct a mathematical model appropriate for actual usage, as shown by [25] and [26]. Furthermore, the radiation model must provide accurate loss prediction, even for specific conditions. Therefore, there is an attraction to a more accessible propagation model that can be empirical and should yield better results [27]. Some path loss effect technique employs a free-space path loss (FSPL) and a practical path loss model [28] or a simplified model for path loss computation [29]. From the research mentioned above, the authors have yet to find any specific research on tree-covered landscapes on the sides of roads, which will directly affect the radio reception performance of the equipment in the vehicle. This research is, therefore, comparable to pilot research for an in-depth study of the issue.

This article proposes the development of a simple and accurate model established on the combination of an empirical path loss model and a free-space path loss model to enhance the overall prediction accuracy in an avenue environment. The novelty and the key contributions of our work are listed as follows:

1. We have developed a path loss prediction model for analyzing radio wave propagation through an avenue environment. The paths electromagnetic waves travel through free space and trails through trees are interpreted according to the terrain in an avenue area.

2. We have adjusted the attenuation prediction parameters to suit the experimental terrain as a standard for further model development.

The rest of this paper is organized as follows: the propagation loss and empirical formula are presented in Section 2. The propagation measurements are proposed in Section 3. The results and discussions are presented in Section 4. Finally, conclusions are drawn in Section 5.

2. Propagation Loss and Empirical Formula

The radio propagation models represent the manners of the radio waves when they are transmitted from transmitter to receiver and demonstrate the relationship between the space between transmitter and receiver and path loss, which are correlated closely to the specific propagation environment.

2.1 Free Space Path Loss

The considerably uncomplicated wave propagation matter is direct wave propagation in free space. In this particular case of line-of-sight propagation, there are no obstacles due to the earth's character or other barriers. Next, we suppose radiation from an isotropic antenna. This sort of antenna is thoroughly omnidirectional, radiating uniformly in all directions. While there is no such thing as a purely isotropic antenna in practice, it is a functional, theoretical concept. The received power P_r at the receiving antenna (mobile station), located at a distance d from the transmitter (base station) is given for free space propagation as [30]:

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_t G_r \tag{1}$$

If other losses (not related to propagation) are also present, we can rewrite Equation (1) as:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \frac{G_t G_r}{L_o} = \frac{G_t G_r}{L_{p,\text{fspl}} L_o} \tag{2}$$

where P_r, P_t, λ, G_t, G_r, d, L_o and $L_{p,\text{fspl}}$ are received power, transmitted power, wave length, gain of the transmitting (base station) antenna, gain of the receiving (mobile) antenna, antenna separation distance between transmitter and receiver, other losses expressed as a relative attenuation factor and free space path loss, respectively. The free space path loss is often expressed as an attenuation in decibels [dB] as follows:

$$L_{p,\text{fspl}}(\text{dB}) = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) = 32.44 + 20\log_{10} f + 20\log_{10} d \tag{3}$$

where f is the carrier frequency in [MHz] and d is the separation distance in [km]. The free space path loss is fundamental to consider the effects and losses caused by wave propagation through space. But in more complicated environments, it is essential to consider other impact factors to make the computation and analysis of results additionally accurate.

2.2 Okumura-Hata Path Loss

One of the well-known empirical models for propagation loss is Okumura-Hata model, which is based on experimental data. What is taken into account besides the general equation is the correction factor a. The standard formula for propagation loss for urban area L_{urban} is obtained by [31] and [32] as follows:

$$L_{p,\text{urban}}(\text{dB}) = 69.55 + 26.16\log_{10} f - 13.82\log_{10} h_b - a(h_m) + (44.9 - 6.55\log_{10} h_b)\log_{10} d \tag{4}$$

where $a(h_m)$ in [dB] is the correction factor for the mobile station antenna height h_m in [m]. The parameters f, h_b and d are the frequency in [MHz], the base station antenna height in [m] and the distance in [km], respectively. The correction factor for vehicular station antenna height in the case of a medium-small city can be determined as follows:

$$a(h_m) = (1.1\log_{10} f - 0.7)h_m - (1.56\log_{10} f - 0.8) \tag{5}$$

Due to the distinct environments between urban and rural areas, an open area correction factor for adjusting accuracy has been added to the equation to simulate the propagation loss in open spaces. So that we get the propagation loss as follows:

$$L_{p,\text{hata}}(\text{dB}) = L_{p,\text{urban}} - 4.78(\log_{10} f)^2 + 18.33 \log_{10} f - 40.94 \quad (6)$$

In this model, the height of both the receiving and transmitting antennas has been increased. as well as coefficients for adjusting the accuracy of the model to be more in line with the actual usage environment.

2.3 Perez-Vega Path Loss

A computational path loss model developed by Perez-Vega and Zamanillo is one of a simple propagation model for VHF and UHF bands. It allows the estimation of median path loss, received power, or electrical field strength which usually is sufficient in many practical applications. The model is independent of frequency and is applicable to outdoor environments. Path loss in dB can be calculated as [33] and [34]:

$$L_{p,\text{perez}}(\text{dB}) = 10\, n \log_{10}(d) + L_{p,\text{fspl}} \quad (7)$$

The value of n intrinsically embeds the effects of all propagation mechanisms: attenuation, diffraction, reflection, etc. The best fit was obtained with a polynomial model of fourth degree with the form:

$$n = \sum_{i=0}^{4} \sum_{j=0}^{4} a_{ij}\, h^i d^j \quad (8)$$

where h is the height of transmitting antenna in [m] a d is the distance in [km]. The coefficients a_{ij} are given by [33]. The value of the variable was obtained by adjusting the accuracy of the curve using a processing program, which will be more complex in actual use.

2.4 Proposed Free-Med Model

Each model has limitations that depend on the propagation environment and experimental setup, which cannot model the path loss. They are mainly based on the distance between the transmitter and receiver. Then, modifying the accuracy with specific properties for each environment and terrain condition is essential. For example, in this research, we desire to construct a characteristic of a road-like area with trees on the sides. This environment is typical in the region and directly affects communication by propagating radio waves to conventional cars. Therefore, we proposed a so-called Free-Med model, a path loss model combining the FSPL model using the distance of a free space area and an empirical path loss model for an avenue area.

Due to their high efficiency in losing estimation and low mathematical complexity, empirical models are highly appreciated in radio-wave propagation dimensioning. Among them is the Modified Exponential Decay model (MED), one of the considerably widely employed due to the high levels of precision when determining canopy losses, as shown by [35] and [36]. Propagation models that calculate path loss or characterize attenuation in radio wave propagation play an essential role in the deployment of broadcasting signals in diverse large-scale contexts. The MED model can be calculated as follows:

$$L_{\text{med}} = \alpha f^{\beta} d^{\gamma} \quad (9)$$

where L_{med} is the excess path loss in [dB], the parameter α, β, and γ are fitted values f is the frequency in [MHz], and d is the distance in [km].

The parameters were developed employing the geographic coordinates of the transmitter (Tx) and receiver (Rx) antenna locations, as depicted in Fig. 1, we define the total attenuation of Free-Med model $L_{\text{free-med}}$ in terms of:

$$L_{\text{free-med}} = L_{d,\text{fspl}} + L_{d,\text{tree}} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d_{\text{fspl}}}{\lambda}\right) + \alpha f^{\beta} d_{\text{tree}}^{\gamma} \tag{10}$$

where d is expressed in [km] and f is the frequency expressed in [MHz]. The height of the transmitting antenna is represented by h_a in [m], where variable h_t in [m] represents the height of the surrounding trees, with $\theta = \arctan(h_a/d)$, $d_{\text{fspl}} = (h_a - h_t)/\sin\theta$, and $d_{\text{tree}} = h_t/\sin\theta$.

The highlight of this model is the inclusion of the efficiency of the wave propagation equation through free space and taking into account the changes in electromagnetic waves as they journey through a forest medium, which will change with the frequency, and the space traveled through the trees. In addition, all variables will vary depending on the distance between the wave source and the receiver's position.

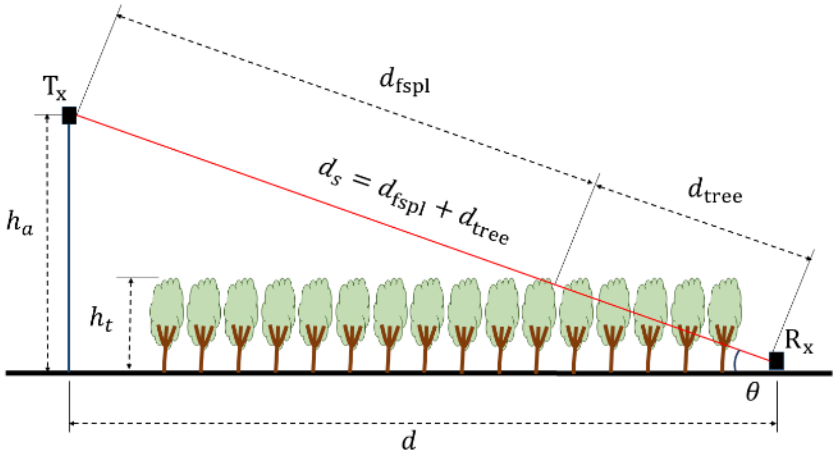


Fig. 1 Developed Model Geometry

3. Propagation Measurements

The research focuses on radio wave propagation affected by the typical road environment in the region. Avenues are streets or paths bordered on both sides by uniform rows of trees or separated by a row of trees in the middle. The trees on both sides of the track are planned to be planted at equal intervals and the same age with approximately the same planting quality. Trees of one tree species are usually used.

3.1 Measurement Scenario

The propagation measurement campaign was accomplished in an avenue environment in Nakhon Nayok, Thailand, as presented in Fig. 2. The dominant tree species were the Thai Pterocarpus macrocarpas and Thai Samanea. The measurements were performed along a straight route, as illustrated with the yellow line in Fig. 2(a). This experiment will use accurate radio signals from an FM radio station adjacent to the road where the measurement begins at the coordinates (14.279301, 101.162881), as demonstrated in Fig. 2(b). Along the route from the starting point to the endpoint at coordinate (14.221812, 101.151023), which has a total distance of 6.5 [km], the signal strength at the receiver will be estimated every 100 [m]. At all measurement locations, the moderate heights of trees h_t varied from 7 to 10 [m]. Therefore, the distance

between the trees is approximately the same size at about 5 [m], as displayed in Fig. 2(b). Measurement data were acquired during the season, when the trees had leaves in damp weather conditions.

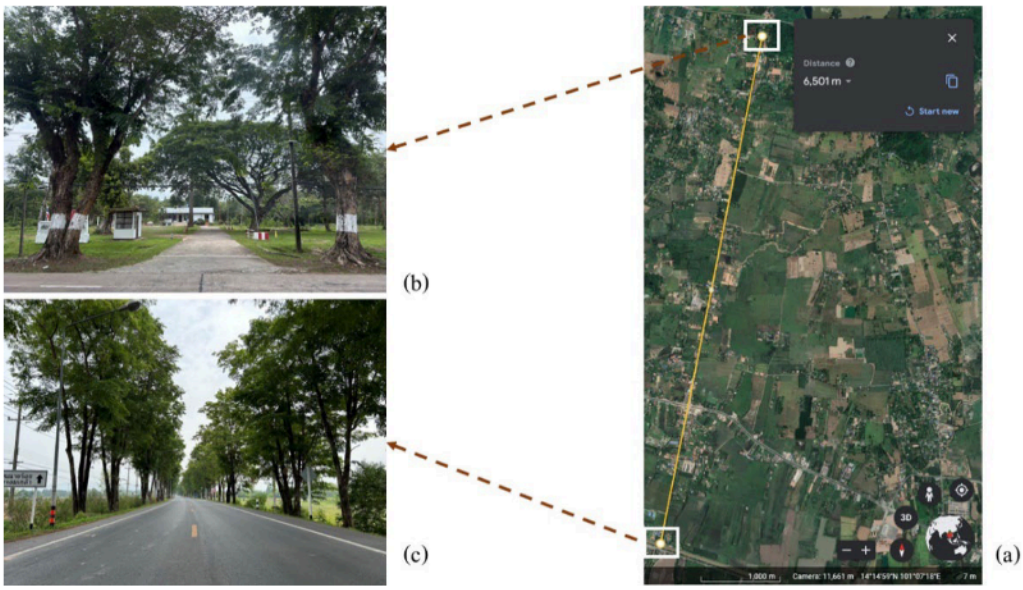


Fig. 2 The measurement site: (a) Measurement path form www.google.com, (b) Starting point and (c) Endpoint

3.2 Measurement System Description

The FM radio station generates a broadcasting signal in transmission using the carrier frequency of 89.75 MHz that is amplified and transmitted by an antenna located on a mast at the height of 20 [m], as depicted in Fig. 3(a) and Table 1. The measurement system employed is based on the Keysight FieldFox Handheld Analyzers N9913A (30 kHz to 4 GHz) utilized as the receiver (Rx), as depicted in Fig. 3(b). The receiving system is climbed on an automobile with a receiving antenna height 1 [m] and located at a distance from the line of trees along the road of 2 [m]. The experimental movement will stop at each measurement point to ensure signal stability. Besides that, this process can reproduce the signal received by the car's audio system.

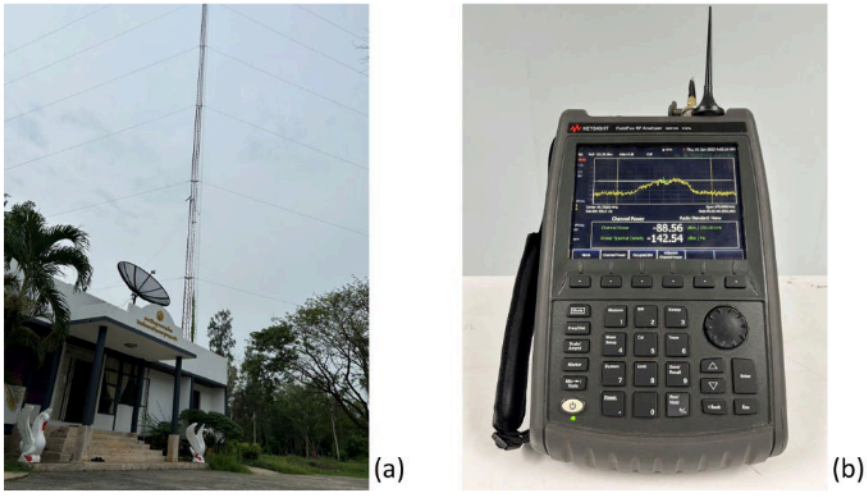


Fig. 3 System Description: (a) Transmitter antenna and (b) Keysight FieldFox Handheld Analyzers N9913A

Table. 1 Experimental setup

Description	Value
Tx Hight (above ground)	20 [m]
Rx Hight (above ground)	1 [m]
Frequency	89.75 [MHz]
Ground distance	0 – 6.5 [km]

3.3 Prediction Model Accuracy

The prediction errors between the measurements and the models were quantified with the mean absolute error (MEA) and the root-mean-squared error (RMSE).

$$\text{MAE} = \frac{i}{N}\sum_{i=1}^{N}|x_i - m_i| \tag{11}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - m_i)^2} \tag{12}$$

where N is the total number of measurement points, m_i and x_i are measurement and predicted values at the i^{th} measurement point in [dB], respectively [37].

4. Results and Discussions

This study's results can be divided into two parts: The first part is the results obtained from simulation by computer programs according to various models presented above. The second part is the outcomes received from the measurement experiment in the natural environment and then applied as a model to simulate the consequences of the typical avenue's environment in the region.

Fig. 4 illustrates the values obtained from the simulation using the free space path loss model $L_{p,\text{fspl}}$, the Okumura-Hata path loss model $L_{p,\text{hata}}$ and the Perez-Vega path loss model $L_{p,\text{perez}}$ compared to measurements. The x-axis represents the ground distance between the antenna mass and the position of the received antenna mounted on the vehicle. The y-axis displays the path loss in dB. The circle shows the data obtained from each measurement. The measurement locations are 100 meters apart, totaling 65 measurement points. The dotted line represents the simulation results using the free space path loss model according to Equation (3). The dashed line represents the simulation results based on the Perez-Vega path loss model according to Equation (7). The curves indicate that the actual measurement values are distinct from those acquired from both models, as expected. The graphs and the measured values demonstrate that the loss trend in radio wave propagation over different distances is in the same approach. But there are differences in the range from about 1 [km] up. To improve this accuracy, the researchers present a model for calculating the effects of wave propagation in free space and the attenuation effects of trees and environments in the experimental area according to Equation (10). The dash-dot graph in Fig. 4 displays the free space part of the variable $L_{d,\text{fspl}}$. It can be seen that this value is less than the value obtained from the free space path loss model $L_{p,\text{fspl}}$ because the propagation distances in the air defined in each model are dissimilar.

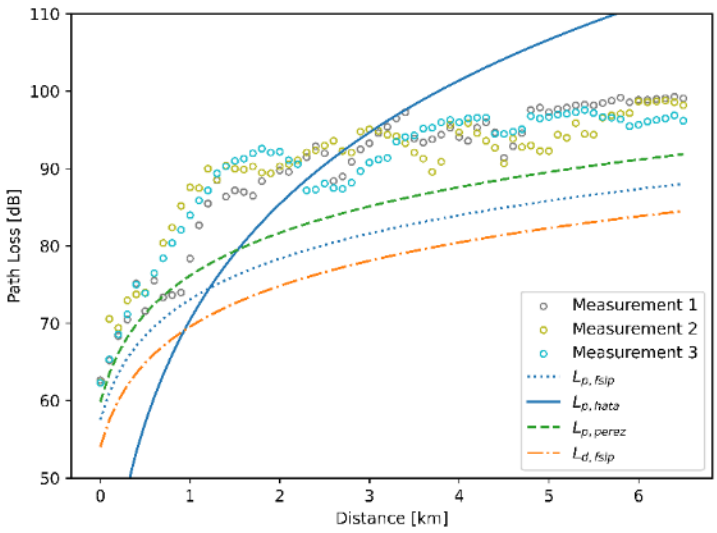


Fig. 4 Comparison between path loss models and measurements

The difference between the experimentally measured value and the variable $L_{d,\text{fspl}}$ in the proposed model can be used to estimate the correct variable value $L_{d,\text{tree}}$, as shown in Fig. 5. As for the variables $L_{d,\text{fspl}}$, only the distance d_{fspl} traveled by electromagnetic waves through unobstructed space is considered, and separating the part that spreads electromagnetic waves through the tree is represented using variable $L_{d,\text{tree}}$. Fig. 5 depicts the distinction ΔL_d between the values acquired from each measurement and the variables $L_{d,\text{fspl}}$ in the developed model. In the next step, these values are used to discover relevant function variables $\alpha f^{\beta} d_{\text{tree}}^{\gamma}$. In this research, we have applied a curve-fitting technique to discover the most correlated curve optimization that finds an optimal set of parameters for a specified function that agreeably suits a given set of observations. The dash-dot line in Fig. 5 displays the outcomes acquired when the variable set is provided the following values $\alpha = 0.1431$, $\beta = 1.0151$ and $\gamma = 0.0826$.

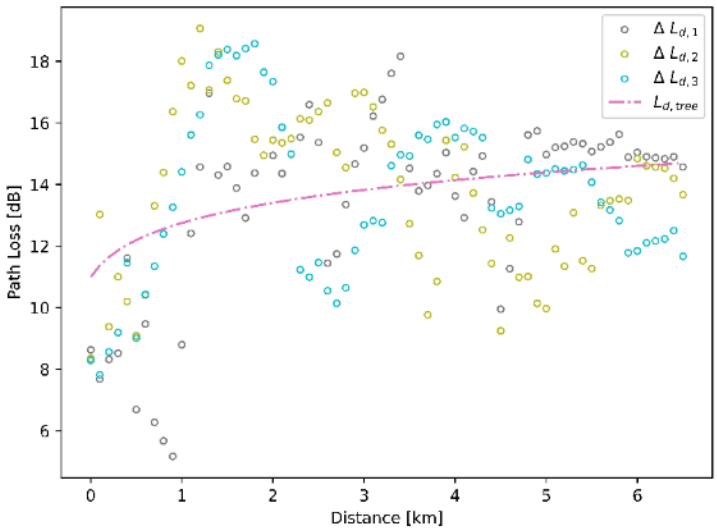


Fig. 5 The distinction ΔL_d and curve optimization with $\alpha = 0.1431$, $\beta = 1.0151$ and $\gamma = 0.0826$

Fig. 6 compares the experimentally average measured values, the free space path loss model $L_{p,\text{fspl}}$, the Okumura-Hata path loss model $L_{p,\text{hata}}$, the Perez-Vega path loss model $L_{p,\text{perez}}$, and the developed Free-Med path loss model $L_{\text{free-med}}$. It can be seen that the dotted line is comparable to the series obtained from the other two models. The improvement in accuracy is evident from the tolerance values shown in Table 2. When using the free space path loss model, the MAE and RMSE values are 10.1407 [dB] and 10.3463 [dB], respectively. These are lower than the results from the Okumura-Hata model, which have MAE and RMSE values of 59.0248 [dB] and 60.2650 [dB], respectively. In the case of the Perez-Vega model, the MAE and RMSE values based on measurement results are 6.7061 [dB] and 6.9729 [dB], respectively. The results from the developed Free-Med model show a slight difference from the measurements, as indicated by the MAE and RMSE values of 1.4966 [dB] and 1.8288 [dB], respectively.

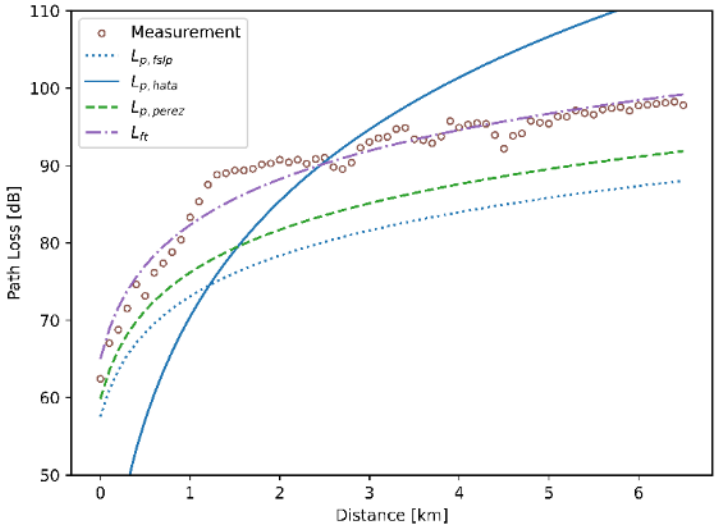


Fig. 6 Comparison between the others path loss models, developed path loss model and measurements

Tab. 2 Model performance

Model	MAE [dB]	RMSE [dB]
Free Space	10.1407	10.3463
Hata	59.0248	60.2650
Perez	6.7061	6.9729
Free-Med	1.4966	1.8288

5. Conclusion

In this paper, a novel prediction model for path-loss estimation in avenue environments has been proposed. A measurement campaign has been carried out at a frequency of 89.75 [MHz]. The experiment utilizes the signal from the radio station and employs the receiver antenna at the vehicle's height. So, the position of the transmitter antenna exceeds the size of the trees, and the receiver antenna is below the peak of the trees. In contrast with most well-known empirical models, the proposed model determines the transformations in propagating waves as they travel through a free space and forest medium, varying with the frequency and distance traveled through both mediums. Furthermore, the experimental

results demonstrate that the values obtained using our developed model are more accurate than other general models. Therefore, creating a model suitable for operating conditions by analyzing the propagation of waves in free space and areas with characteristic obstructions permits modeling to be precise and provide results roughly the value obtained from the measurement.

6. References

[1] Andrusenko, J. et al. (2008). VHF General Urban Path Loss Model for Short Range Ground to Ground Communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 56(10): 3302-3310.

[2] Almeida, M.P.C. et al. (2015). Measurements of Field Strength and HD Radio Reception Quality at VHF. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 14: 201-204.

[3] Bozomitu, R.G., Hutu, F.D., & De Pinho Ferreira, N. (2021). Drivers' Warning Application Through Image Notifications on the FM Radio Broadcasting Infrastructure. *IEEE Access*. 9: 13553-13572.

[4] Hu, Z., Li, S., & Xiang, Y. (2021). Time Information Transmission Based on FM Broadcast Signal. *IEEE Access*. 9: 16360-16364.

[5] Phruksahiran, N., & Michanan, J. (2021). Iteration Improvement of Taylor-Series Estimation Using Hyperbolic Systems for FM-Radio Source Localization in Bangkok. *Signal Image and Video Processing*. 15: 247–254.

[6] Ma, J., Li, H. & Gan, L. (2023). Order-Statistic Based Target Detection with Compressive Measurements in Single-Frequency Multistatic Passive Radar. *Signal Processing*. 203: 108785.

[7] Sarkar, T.K. et al. (2003). A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 45(3): 51-82.

[8] Phillips, C., Sicker, D., & Grunwald, D. (2013). A Survey of Wireless Path Loss Prediction and Coverage Mapping Methods. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 15(1): 255-270.

[9] Li, H., He, X., & He, W. (2018). Review of Wireless Personal Communications Radio Propagation Models in High Altitude Mountainous Areas at 2.6 GHz. *Wireless Personal Communications*. 101: 735–753.

[10] Al-Samman, A.M., Hindia, M.N., & Rahman, T.A. (2016). Path Loss Model in Outdoor Environment at 32 GHz for 5G System. *In Proceedings of IEEE 3rd International Symposium on Telecommunication Technologies* (9-13).

[11] Hampton, J.R. et al. (2019). Drone-Based Forest Propagation Measurements for Ground-to-Air EMI Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 18(12): 2627-2631.

[12] De Beelde, B. et al. (2022). Vegetation Loss at D-Band Frequencies and New Vegetation-Dependent Exponential Decay Model. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 70(12): 12092-12103.

[13] Burke, P.J. (2022). 4G Signal Propagation at Ground Level. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 70(4): 2891-2903.

[14] M. E. Diago-Mosquera, M.E. et al. (2022). mmWave Channel Measurements for 3-D Path Loss Analysis and Model Design in Stadiums. *IEEE Wireless Communications Letters*. 11(9): 2005-2009.

[15] Meng, Y.S., Lee, Y.H., & Ng, B.C. (2009). Empirical Near Ground Path Loss Modeling in a Forest at VHF and UHF Bands. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 57(5): 1461-1468.

[16] Palaios, A., Nilforoushan, M., & Mähönen, P. (2016). Understanding European Forest Radio Propagation Dynamics

with in and out of Forest Transmitters. *In Proceedings of IEEE Military Communications Conference*. (705-710).

[17] Cheffena, M., & Mohamed, M. (2017). Empirical Path Loss Models for Wireless Sensor Network Deployment in Snowy Environments. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 16: 2877-2880.

[18] Hejselbæk, J. et al. (2018). Empirical Study of Near Ground Propagation in Forest Terrain for Internet-of-Things Type Device-to-Device Communication. *IEEE Access*. 6: 54052-54063.

[19] Dias, M.H.C. et al. (2011). Path Loss Measurements of HF/VHF Land Links in a Brazilian Atlantic Rainforest Urban Site. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 10: 1063-1067.

[20] MacCartney, G.R., Samimi, M.K., & Rappaport, T.S. (2014). Omnidirectional Path Loss Models in New York City at 28 GHz and 73 GHz. *In Proceedings of IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication* (227-231).

[21] Castellanos, G.D., & Teuta, G. (2017). Urban-Vegetation Ratio Evaluation for Path Loss Model in Amazonian Region for Television Bands. *In Proceedings of 47th European Microwave Conference*. (699-702).

[22] Sridhar, B., & Ali Khan, M.Z. (2014). RMSE Comparison of Path Loss Models for UHF/VHF Bands in India. *In Proceedings of IEEE Region 10 Symposium*. (330-335).

[23] Ko, J. et al. (2017). 28 GHz Millimeter-Wave Measurements and Models for Signal Attenuation in Vegetated Areas. In Proceedings of *11th European Conference on Antennas and Propagation*. (1808-1812).

[24] Olajuwon, K.H. et al. (2022). Efficacy of some Unpopular Path Loss Propagation Models in the VHF and UHF Bands. In Proceedings of *IEEE Nigeria 4th International Conference on Disruptive Technologies for Sustainable Development*. (1-5).

[25] Azevedo, J.A.R., & Santos, F.E.S. (2011). An Empirical Propagation Model for Forest Environments at Tree Trunk Level. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 59(6): 2357-2367.

[26] Zhang, P. et al. (2020). Measurement-Based 5G Millimeter-Wave Propagation Characterization in Vegetated Suburban Macrocell Environments. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 68(7): 5556-5567.

[27] Zabihi, R., & Vaughan, R.G. (2020). Simplifying Through-Forest Propagation Modelling. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*. 1: 104-112.

[28] Myagmardulam, B. et al. (2021). Path Loss Prediction Model Development in a Mountainous Forest Environment. *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2: 2494-2501.

[29] Juan-Llácer, L. et al. (2022). A Simplified Model for Path Loss Estimation in Citrus Plantations at 3.5 GHz. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 21(6): 1183-1187.

[30] T.T. Oladimeji, T.T., Kumar, P., & Oyie, N.O. (2022). Propagation Path Loss Prediction Modelling in Enclosed Environments for 5G Networks: A Review. *Heliyon*. 8(11): e11581.

[31] Hata, M. (1980). Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 29(3): 317-325.

[32] Ayad, M. et al. (2022). Evaluation of Radio Communication Links of 4G Systems. *Sensors*. 22(10): 3923.

[33] Perez-Vega, C., & Zamanillo, J.M. (2002). Path-Loss Model for Broadcasting Applications and Outdoor Communication Systems in the VHF and UHF Bands. *IEEE Transactions on Broadcasting*. 48(2): 91-96.

[34] Prasad, M.V.S.N. (2006). Path Loss Exponents Deduced from VHF & UHF Measurements Over Indian Subcontinent

and Model Comparison. *IEEE Transactions on Broadcasting*. 52(3): 290-298.

[35] Ndzi, D.L. et al. (2014). Wireless Sensor Network Coverage Measurement and Planning in Mixed Crop Farming. *Computers and Electronics in Agriculture*. 105: 83-94.

[36] Barrios-Ulloa, A. et al. (2022). Modeling Radio Wave Propagation for Wireless Sensor Networks in Vegetated Environments: A Systematic Literature Review. *Sensors*. 22(14): 5285.

[37] Ko, J. et al. (2020). Measurements and Analysis of Radio Propagation at 28 GHz in Vegetated Areas of Typical Residential Environments. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 68(5): 4149-4154.

การวิเคราะห์และการประเมินแบบจำลองการทำนายอากาศยานบนพื้นฐานข้อมูลของเป้าหมายไม่ทราบฝ่ายอัตโนมัติ

Analyzing and Evaluating Aircraft Prediction Models based on Automatic Targets with Unidentified Orientation Data

[1*]วีรยุทธ เพชรมาก และ [2#]ปธิกร อันชื่น

[1,2]สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

[1*]Weerayut Petchmak, and [2#]Patikorn Anchuen

[1,2] Office of Graduate Studies, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

[*]weerayut_pe@rtaf.mi.th, [#]patikorn_an@rtaf.mi.th

Received: April 4, 2024

Revised: August 19, 2024

Accepted: August 26, 2024

บทคัดย่อ

แบบจำลองการทำนายอากาศยานถูกพัฒนาขึ้นเพื่อระบุประเภทและแบบของอากาศยานจากข้อมูลเป้าหมายไม่ทราบฝ่ายซึ่งเป็นปัจจัยในการตัดสินใจกลยุทธ์ทางทหารเพื่อให้เกิดความได้เปรียบทางยุทธวิธี อากาศยานที่สำคัญประกอบด้วย อากาศยานขับไล่โจมตี อากาศยานลำเลียง เฮลิคอปเตอร์ และอากาศยานที่ใช้สำหรับการฝึก อากาศยานเหล่านี้ล้วนมีความสามารถสร้างความเสียหายและเป็นภัยต่อความมั่นคงของชาติหากถูกระบุว่าเป็นเป้าหมายไม่ทราบฝ่ายบนจอเรดาร์ของระบบเรดาร์ป้องกันภัยทางอากาศในกองทัพอากาศ อากาศยานแต่ละประเภทมีแบบของอากาศยานที่หลากหลาย ซึ่งแต่ละแบบมีความสามารถในการทำภาระกิจที่แตกต่างกัน เช่น บินในระยะไกล การบรรทุก ทิ้งระเบิดและโจมตี และสอดแนม ด้วยเหตุนี้การป้องกันภัยทางอากาศจำเป็นที่จะต้องระบุประเภทและแบบของอากาศยานได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อสามารถตัดสินใจในกลยุทธ์การตอบโต้ที่เหมาะสม แม้ว่าจะมีการศึกษาการสร้างแบบจำลองการทำนายอากาศยานจากงานวิจัยในอดีต พบว่าเป็นเพียงการทำนายเพื่อระบุประเภทหรือทำนายแบบอากาศยานเพียงเท่านั้นซึ่งมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน ดังนั้นแบบจำลองการทำนายอากาศยานมีความจำเป็นที่จะต้องถูกนำมาพิจารณาจากวิธีการที่เหมาะสมกับความต้องการในการระบุประเภทและแบบอากาศยาน งานวิจัยนี้ดำเนินการวิเคราะห์และประเมินแบบจำลองการทำนายอากาศยานที่ใช้เทคนิคการจำแนกประเภทข้อมูลที่ทันสมัย ได้แก่ Neural Network, Decision Tree, Random Forest, K-Nearest Neighbors, Support Vector Machine, Naïve Bayes, Adaptive Boosting, Gradient Boosting และ Stochastic Gradient Descent การประเมินแบบจำลองดำเนินการผ่านค่าทางสถิติที่เกี่ยวข้องกับการจำแนกข้อมูล เช่น Area under ROC, Classification Accuracy, Precision, Recall และ Matthews Correlation Coefficient ผลการวิจัยพบว่า แบบจำลองที่มีความเหมาะสมและประสิทธิภาพสูงสุดในการนำไปใช้ ได้แก่ แบบจำลองที่พัฒนาจากเทคนิค Neural Network และ Random Forest ตามลำดับ

คำสำคัญ: ขั้นตอนวิธีทันสมัย, เหมืองข้อมูล, ระบบอาวุธที่ชาญฉลาด, ระบบเรดาร์, เป้าหมายไม่ทราบฝ่าย

Abstract

The aircraft prediction model has been developed to identify the type and model of aircraft based on unknown target data. This serves as a crucial factor in military strategic decision-making to gain a tactical advantage. The essential aircraft types encompass fighters, transporters, helicopters, and training aircraft. These aircraft types have the capability to cause harm and pose a threat to national security when identified as unidentified targets on radar screens of air defense radar systems within the Air Force. Each type of aircraft encompasses various models, each with distinct capabilities tailored for different mission profiles, such as long-range flight, cargo transport, bombing, attack, and reconnaissance. For this reason, effective air defense necessitates the accurate identification of aircraft types and models, enabling strategic decision-making for appropriate response strategies. Although there have been studies on constructing aircraft prediction models from past research, it was found that they primarily focused on predicting types or specific models of aircraft, revealing limitations in their practical application. Therefore, the aircraft prediction model is imperative to be considered based on methods that align with the requirements for identifying the type and model of aircraft. This research analyzes and evaluates aircraft prediction models using modern classification techniques, including Neural Network, Decision Tree, Random Forest, K-Nearest Neighbors, Support Vector Machine, Naïve Bayes, Adaptive Boosting, Gradient Boosting, and Stochastic Gradient Descent. The model evaluation is conducted through statistical metrics relevant to classification, such as Area under the ROC Curve, Classification Accuracy, Precision, Recall, and Matthews Correlation Coefficient. The findings indicate that the most suitable and effective models for practical application are those developed using Neural Network and Random Forest techniques, respectively.

Keywords: State-of-the-Art Algorithm, Data Mining, Smart Weapon Systems, Radar System, Unknown Target

1. บทนำ

อากาศยานแต่ละประเภทมีความสามารถและการใช้งานแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ ที่มักพบเห็นกันโดยทั่วไปก็คือ เครื่องบินพาณิชย์ มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับขนส่งผู้โดยสารและสัมภาระ ทั้งภายในประเทศและระหว่างประเทศ หรืออาจมีการดัดแปลงเพื่อใช้ในการขนส่งสินค้าขนาดใหญ่ที่ต้องการขนส่งทางอากาศ [1] อากาศยานประเภทดังกล่าวนั้นมีแผนการบิน (Flight Plan) ที่ส่งให้หน่วยควบคุมการจราจรทางอากาศเพื่อขอรับการอนุญาตทำการบินได้อย่างปลอดภัย [2] อากาศยานทางการทหารมีวัตถุประสงค์ทางการทหารซึ่งมีทั้งอากาศยานปีกนิ่งและปีกหมุน โดยแบ่งเป็นหน้าที่ออกเป็นอากาศยานต่อสู้ซึ่งจะมีการติดตั้งอาวุธที่มีไว้สำหรับภาระกิจโจมตีฝ่ายศัตรู และอากาศยานที่ไม่ทำหน้าที่ต่อสู้ซึ่งมีไว้สำหรับทำภาระกิจสนับสนุน เช่น ฝึก ขนส่ง เติมเชื้อเพลิง และตรวจการ เป็นต้น [3] อากาศยานทางการทหารเหล่านี้มักจะถูกแยกประเภทให้เป็น อากาศยานประเภทขับไล่โจมตี (fighter) อากาศยานประเภทลำเลียง (transporter) เฮลิคอปเตอร์ (helicopter) อากาศยานใช้สำหรับการฝึก (training) [4] นอกจากนี้อากาศยานแต่ละประเภทก็มีจะแบบอากาศยานที่แตกต่างกันออกไป เช่น อากาศยานประเภทขับไล่โจมตี (fighter) ประกอบด้วยหลายแบบอากาศยานที่มีการพัฒนาและมีความสามารถในการโจมตีหลากหลายรูปแบบ [5] อากาศยานประเภทและแบบเหล่านี้ล้วนเป็นภัยต่อความมั่นคงเมื่อไม่สามารถตรวจและพิสูจน์

ฝ่ายอากาศยานนั้นจากภาคพื้นได้ หรืออาจมีเหตุที่อากาศยานนั้นฝ่าฝืนไม่ปฏิบัติตามกฎหมายว่าด้วยการเดินอากาศ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการสกัดกั้นอากาศยานเพื่อไม่ให้เกิดการกระทำอันอาจเป็นภัยต่อความมั่นคงแห่งราชอาณาจักร [6]

การป้องกันภัยทางอากาศเป็นภารกิจที่สำคัญในการปกป้องอธิปไตยของชาติ เพื่อลบล้างหรือลดประสิทธิภาพของอากาศยานหรืออาวุธของข้าศึกภายหลังที่ขึ้นสู่อากาศ [7] โดยจะมีขั้นตอนในการค้นหา การพิสูจน์ฝ่าย การสกัดกั้น และการทำลาย [8] โดยขั้นตอนแรกที่มีความสำคัญคือการค้นหาวัตถุที่มีความเร็วบนท้องฟ้า เมื่อมีการตรวจพบอากาศยานที่ไม่มีข้อมูลอยู่ในแผนการบินโดยสิ่งที่ตรวจพบนี้จะถูกเรียกว่า เป้าหมายไม่ทราบฝ่าย การพิสูจน์ฝ่ายจากระบบเรดาร์เป็นกระบวนการที่สำคัญซึ่งจะต้องดำเนินการอย่างรวดเร็วเพื่อให้ทราบถึงประเภทและแบบอากาศยานสำหรับเป็นข้อมูลในการตัดสินใจกลยุทธ์ทางทหารสำหรับการจัดการของกองทัพอากาศ ในการจัดอากาศยานรบสมรรถนะสูงขึ้นบินสกัดกั้น และแจ้งหน่วยต่อสู้อากาศยานให้พร้อมป้องกันฐานบิน เป็นต้น การใช้ระบบเรดาร์เพื่อเก็บข้อมูลและค่าปัจจัยที่สำคัญของระบบจำเป็นที่จำต้องมีการทดสอบอยู่เป็นประจำเพื่อให้ระบบมีความเชื่อถือได้ (reliability) ของข้อมูลที่ได้รับจากระบบเรดาร์ [9] นอกจากนี้ แบบจำลองเพื่อใช้ในการระบุประเภทและแบบอากาศยานจะต้องมีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลในการการพิสูจน์ฝ่าย

จากงานวิจัยที่ผ่านมามีการศึกษาการสร้างแบบจำลองการทำนายอากาศยานจากงานวิจัยในอดีต ซึ่งพบว่าการสร้างแบบจำลองเพื่อจำแนกประเภทอากาศยานอย่างอัตโนมัติระบุได้เพียงประเภทของอากาศยานเท่านั้น ซึ่งยังมีข้อจำกัดในการพิจารณาแบบอากาศยาน [4] ต่อมาได้มีการพัฒนาการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการระบุประเภทอากาศยานขับไล่โจมตีซึ่งมีอยู่หลายแบบซึ่งจำเป็นต้องอาศัยขั้นตอนวิธี (algorithm) ที่สามารถนำมาใช้จำแนกข้อมูลที่มีความซับซ้อนได้ [5] อย่างไรก็ตามแบบงานวิจัยเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้งานที่ไม่ครอบคลุม ดังนั้นแบบจำลองการทำนายอากาศยานจึงมีความจำเป็นที่จะต้องถูกนำมาพิจารณาจากวิธีการที่เหมาะสมกับความต้องการในการระบุประเภทและแบบอากาศยาน

งานวิจัยนี้ดำเนินการวิเคราะห์และการประเมินแบบจำลองการทำนายอากาศยานที่ถูกสร้างโดยใช้วิธีการที่ทันสมัยจากขั้นตอนวิธีที่หลากหลายทั้ง 9 ขั้นตอนวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อจำแนกข้อมูลสำหรับประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองในงานวิจัยนี้เพื่อระบุประเภทและแบบของอากาศยานเพื่อชี้ให้ชี้นำขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างครอบคลุม

2. ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประเมินและวิเคราะห์แบบจำลองการทำนายอากาศยาน เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองของแต่ละขั้นตอนวิธีที อีกทั้งยังมีการวิเคราะห์ตัวแปรทำนายที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองในแต่ละขั้นตอนวิธีโดยใช้เฉพาะชุดข้อมูลที่ตรวจจับได้จากระบบเรดาร์ และใช้ปัจจัย (parameter) ในการวิเคราะห์แบบจำลองเพียง 11 ปัจจัยเท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยชุดข้อมูล 30,000 ชุด มีประเภทอากาศยาน 4 ประเภท ได้แก่ อากาศยานประเภทขับไล่โจมตี อากาศยานประเภทลำเลียง เฮลิคอปเตอร์ และอากาศยานใช้สำหรับการฝึก และมีแบบอากาศยานที่แตกต่างกัน 72 ลักษณะ

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การสร้างแบบจำลองการทำนายอากาศยานบนพื้นฐานข้อมูลของเป้าหมายไม่ทราบฝ่ายเพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์และการประเมินแบบจำลอง ในการสร้างแบบจำลองสิ่งสำคัญที่ให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นคือการวิเคราะห์ปัจจัยที่ใช้ในการทำนายโดยจะต้องมีการคัดเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความถูกต้องของแบบจำลอง และนอกจากนี้การประเมินแบบประสิทธิภาพแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นจากหลายขั้นตอนวิธีที่ทันสมัยจะทำให้ช่วยระบุได้ว่าขั้นตอนวิธีใดที่เหมาะสมกับชุดข้อมูลที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยการคัดเลือกปัจจัยและขั้นตอนวิธีที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองจะถูกอธิบายดังต่อไปนี้

3.1 การเลือกปัจจัย

การคัดเลือกปัจจัยในการใช้สร้างแบบจำลองและทำนายมีส่วนสำคัญในการทำให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น การพิจารณาปัจจัยเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองทีละปัจจัยจำเป็นต้องมีการกำหนดค่าขีดแบ่งที่เหมาะสมเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่ผ่านเกณฑ์สำหรับนำไปใช้งานเป็นตัวทำนายเพื่อทำให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพมากขึ้น [10] ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่าความถูกต้อง (accuracy) ที่สร้างแบบจำลองจากปัจจัยเดียวต้องมีค่ามากกว่า 0.8 โดยตีความว่าปัจจัยที่ผ่านการพิจารณาคือปัจจัยที่มีระดับอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลองสูงมาก [11] ซึ่งแต่ละปัจจัยที่ผ่านการคัดเลือกจะถูกนำไปใช้สร้างแบบจำลองด้วยขั้นตอนวิธีที่ทันสมัยเพื่อพิจารณาขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

3.2 การสร้างแบบจำลอง

การวิเคราะห์แบบจำลองจำเป็นต้องพิจารณาจากขั้นตอนวิธีที่ทันสมัยและมีความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ปัจจุบันขั้นตอนวิธีที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายได้รับการศึกษาและพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านการประมวลผลข้อมูลเพื่อสร้างฟังก์ชันในการทำนายและจำแนกโดยการได้มาซึ่งแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพนั้นขึ้นอยู่กับคุณลักษณ์ของชุดข้อมูลที่นำไปใช้สร้างโมเดลและขั้นตอนวิธีที่เหมาะสม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีการนำทั้ง 9 ขั้นตอนวิธีที่ทันสมัยและเป็นที่นิยมมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ซึ่งมีดังนี้

3.1.1. Neural Network คือ โมเดลคณิตศาสตร์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อจำลองการทำงานของระบบประสาทในสมองของมนุษย์ โดยมีโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ที่ประกอบด้วยชั้นนำเข้าข้อมูล (input layer) ชั้นซ่อน (hidden layer) ชั้นส่งออก (output layer) โดยมีการเชื่อมต่อกันแต่ละโหนดมีการรับข้อมูลเข้า (input) และส่งข้อมูลออก (output) โดยส่งผ่านการประมวลผลที่ต่างกันตามฟังก์ชันการกระตุ้น (activation function) ที่กำหนดไว้ การปรับค่าพารามิเตอร์ภายในโครงข่ายเพื่อให้สามารถทำนายผลลัพธ์ของข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อน เพื่อให้โมเดลสามารถจำแนกและวิเคราะห์ข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ การกำหนดฟังก์ชันการกระตุ้น การเลือกและปรับค่าพารามิเตอร์ และการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลโดยการทดสอบกับชุดข้อมูลทดสอบ [12]

3.1.2. Decision Tree เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้สำหรับงานการตัดสินใจและจำแนกประเภทโดยโครงสร้างของต้นไม้ที่ประกอบด้วยการตัดสินใจต่อเนื่องโดยพิจารณาข้อมูลตัวอย่างและคุณลักษณะ (features) ของข้อมูล โดยแต่ละโหนดในต้นไม้จะแทนคำตอบหรือคำสำคัญในการตัดสินใจ เช่น การจำแนกประเภทของวัตถุ การตัดสินใจเพื่อวินิจฉัยโรค หรือการตัดสินใจในการลงทุน [13]

3.1.3. Random Forest เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการจำแนกและพยากรณ์ โดยพัฒนามาจากการรวมกันของหลายๆ decision Tree เข้าด้วยกัน โดยเรียกว่าป่าไม้ (forest) ในแต่ละ decision Tree จะถูกสร้างขึ้นโดยการสุ่มเลือกข้อมูลจากชุดข้อมูลสำหรับการฝึกและเลือกคุณลักษณะ (features) ในการแบ่งแยกระหว่างกลุ่มข้อมูล โดยขั้นตอนวิธีนี้มีความสามารถในการลดปัญหาการเรียนรู้เกินขอบเขต (overfitting) ที่อาจเกิดขึ้นกับวิธีการ ต้นไม้การตัดสินใจ โดยมีหลักการเลือกผลลัพธ์ที่ได้ด้วยการโหลดเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น [14]

3.1.4. K-Nearest Neighbors (K-NN) เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการจำแนกคุณลักษณะ (features) ที่มีการพิจารณาของข้อมูลในชุดข้อมูล และการจำแนกประเภทของข้อมูลโดยการดูถึงค่าความคล้ายคลึงกับข้อมูลที่อยู่ใกล้เคียงกันที่สุดจัดให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน การทำงานของขั้นตอนวิธีนี้เมื่อมีข้อมูลใหม่เข้ามา อัลกอริทึมจะหาข้อมูลที่ใกล้เคียงกันที่สุดจากชุดข้อมูลที่มีอยู่ โดยการคำนวณระยะห่าง (distance) ระหว่างข้อมูลใหม่กับข้อมูลในชุดข้อมูล จากนั้นจะเลือกข้อมูลที่ใกล้เคียงกันที่สุด K ตัวอย่าง โดยทั่วไปแล้ว K จะเป็นจำนวนเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดที่จะถูกเลือกได้ [15]

3.1.5. Support Vector Machine (SVM)เป็นอีกหนึ่งขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการจำแนกคุณลักษณะ (features) โดยมีการแบ่งกลุ่มข้อมูลจากการสร้างเส้นแบ่ง hyperplane เพื่อทำให้ข้อมูลในแต่ละกลุ่มอยู่ใกล้กับ margin โดยจะมองตัวอย่างข้อมูลที่อยู่บริเวณขอบของ margin นั้นเป็น support vectors ซึ่งมีความสำคัญในการกำหนดเส้นแบ่ง ขั้นตอนวิธีนี้มีความยืน

หยุ่นในการใช้งานเนื่องจากสามารถใช้ kernel functions เพื่อปรับการแบ่งกลุ่มข้อมูลในพื้นที่ที่ไม่เป็นเส้นตรงได้ เช่น linear polynomial และ radial basis function เป็นต้น SVM มักถูกใช้ในการจำแนกประเภทของข้อมูลที่มีลักษณะมากมาย เช่น การจำแนกประเภทของภาพ การตรวจจับวัตถุ การจำแนกประเภทของข้อความ หรือการจำแนกประเภทของข้อมูลที่มีคุณลักษณะที่ซับซ้อน [16]

3.1.6. Naïve Bayes เป็นวิธีการจำแนกประเภท (classification) ที่ใช้วิธีการทางสถิติและประยุกต์ใช้กับงานที่เกี่ยวข้องกับการจำแนกประเภทของข้อมูล โดยมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีบทของ Bayes ซึ่งเป็นหลักการทางสถิติที่ใช้ในการคำนวณความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ต่าง ๆ จากพิจารณาเงื่อนไขหรือข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์นั้น ๆ ในรูปแบบของความน่าจะเป็นจะมีการสมมติเงื่อนไขที่เป็นอิสระต่อกัน (independent) โดย Naïve Bayes มักนิยมใช้ในงานที่เกี่ยวกับการจำแนกประเภทของข้อมูลเชิงข้อความ (text classification) เช่น การกรองอีเมลสแปม, การจำแนกประเภทข่าว, หรือการจำแนกประเภทของเอกสารต่าง ๆ อื่น ๆ และเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพและง่ายต่อการประยุกต์ใช้งานในกรณีที่มีจำนวนตัวอย่างข้อมูลที่มากพอสมควร [17]

3.1.7. Adaptive Boosting (AdaBoost) เป็นวิธีการเรียนรู้แบบจำลองเชิงเส้น (ensemble learning) ที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลที่มีการเรียนรู้แบบจำลองหลายตัวเพื่อสร้างโมเดลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยในแต่ละรอบของการเรียนรู้ AdaBoost จะเรียนรู้จากข้อมูลเพื่อสร้างโมเดลตัวใหม่ โดยเป็นวิธีการที่เป็นที่นิยมในการจำแนกประเภทของข้อมูล เช่น การจำแนกประเภทของภาพ, การจำแนกประเภทของข้อความ, หรือการจำแนกประเภทของลูกค้าในธุรกิจล่วงหน้า โดยมีความสามารถในการปรับและประมวลผลข้อมูลที่ซับซ้อนอย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำได้ดีในรูปแบบของโมเดลที่เป็นจำลองหลายตัวในการจำแนกประเภทข้อมูลให้ถูกต้อง [18]

3.1.8. Gradient Boosting มักจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในข้อมูลที่มีความซับซ้อน โดยขั้นตอนวิธีนี้มีความสามารถในการเรียนรู้และปรับปรุงโมเดลโดยใช้การปรับพารามิเตอร์และกระบวนการทางคณิตศาสตร์อย่างเฉพาะเจาะจงในการลดความคลาดเคลื่อนของโมเดลในแต่ละรอบการปรับปรุงโดยทำให้ได้โมเดลที่มีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูงขึ้นตามการเรียนรู้และการปรับปรุงในแต่ละรอบไปเรื่อย ๆ จนกว่าค่าคลาดเคลื่อนจะเล็กมากๆ หรือถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า ทำให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานกับข้อมูลที่มีลักษณะซับซ้อนและข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ [19]

3.1.9. Stochastic Gradient Descent (SGD) เป็นเทคนิคหนึ่งในการอัพเดทพารามิเตอร์ของแบบจำลองโดยใช้การคำนวณ gradient ของฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนบนชุดข้อมูลเพียงบางส่วน (mini batch) ที่สุ่มมาจากชุดข้อมูลเต็ม เพื่อลดการคำนวณที่ใช้เวลานานและให้การอัปเดตพารามิเตอร์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [20]

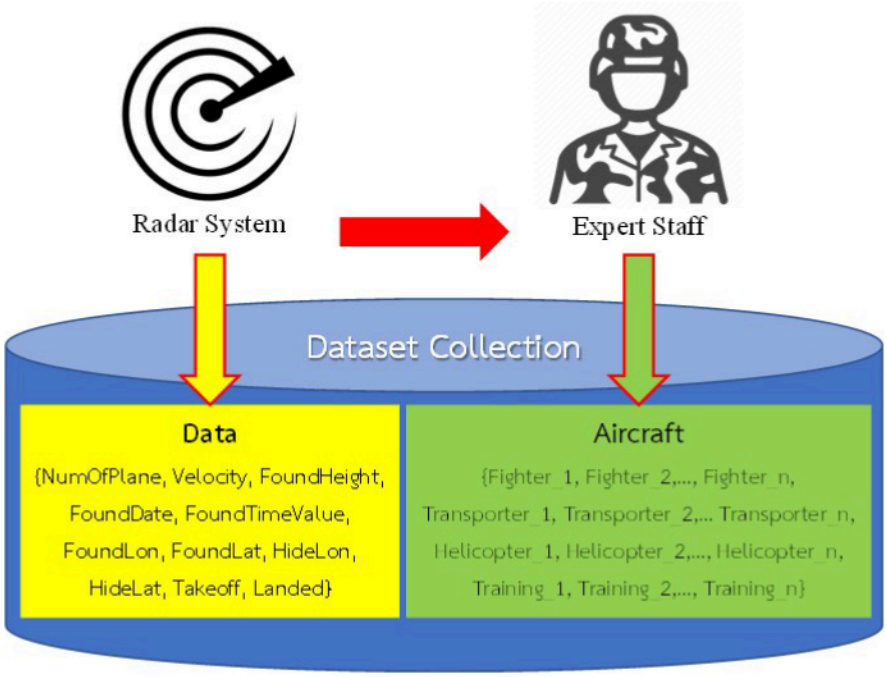
4. การดำเนินการวิจัย

การสร้างแบบจำลองการทำนายอากาศยานบนพื้นฐานข้อมูลของเป้าหมายไม่ทราบฝ่ายอัตโนมัติจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลที่ถูกรวบรวมจากระบบวิเคราะห์ความเคลื่อนไหวกำลังทางอากาศของกองทัพอากาศ ผ่านกระบวนการวิเคราะห์เป้าหมายและตรวจสอบความถูกต้องจากเจ้าหน้าที่ผู้เชี่ยวชาญ จากนั้นข้อมูลเหล่านี้จะถูกคัดเลือกเพื่อใช้ดำเนินการในการสร้างแบบจำลองจาก 9 ขั้นตอนวิธีที่ได้รับความนิยมแล้วถูกนำไปวิเคราะห์และประเมินผลซึ่งการดำเนินการวิจัยจะถูกอธิบายได้ดังต่อไปนี้

4.1 ข้อมูล และเครื่องมือ

ข้อมูลที่ได้จากระบบเรดาร์จะถูกเก็บรวบรวมเป็นค่าปัจจัยต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 1 ประกอบด้วย NumOfPlane Velocity FoundHeight FoundDate FoundTimeValue FoundLon FoundLat HideLon HideLat Takeoff และ Landed [5] โดยที่ข้อมูลของอากาศยานจะถูกวิเคราะห์จากผู้เชี่ยวชาญ (expert staff) เพื่อประเมินประเภทและแบบอากาศยาน ผลลัพธ์ที่ได้จะได้มาซึ่งชุดข้อมูลที่ประกอบด้วยค่าปัจจัยและผลการประเมิน และจะถูกเก็บรวบรวมไว้ในฐานข้อมูลเป็นจำนวนมาก โดยชุดข้อมูลในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยชุดข้อมูล 30,000 ชุด โดยมีประเภทและแบบอากาศยานที่แตกต่างกัน 72 ลักษณะ

โดยชุดข้อมูลจากระบบเรดาร์และข้อมูลอากาศยานที่ถูกประเมินจากผู้เชียวชาญที่ถูกเก็บรวบรวมไว้ในฐานข้อมูลถูกแสดงดังรูปที่ 1 และเนื่องจากจำนวนข้อมูลของอากาศยานในแต่ละประเภทมีจำนวนที่แตกต่างกันจึงเกิดความไม่สมดุลของข้อมูล (Imbalance) ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำนายผลของแบบจำลอง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการแก้ไขโดยใช้วิธี Under Sampling เพื่อลดจำนวนข้อมูลของแต่ละคลาสคำตอบให้มีจำนวนที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด จึงจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์และการประเมินแบบจำลองการทำนายอากาศยาน [4]

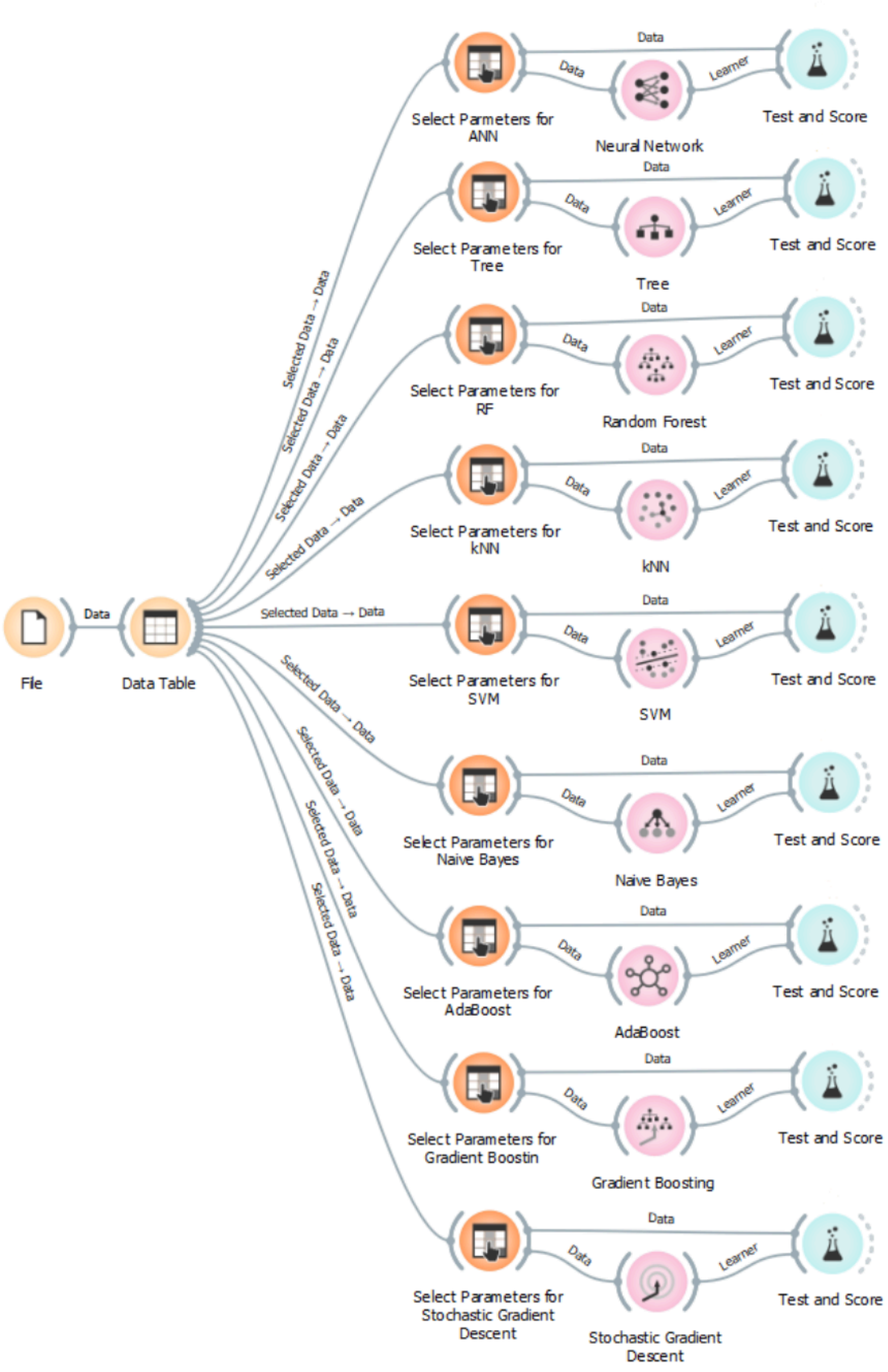


รูปที่ 1 ชุดข้อมูลจากระบบเรดาร์และข้อมูลอากาศยานที่ถูกประเมินจากผู้เชียวชาญ

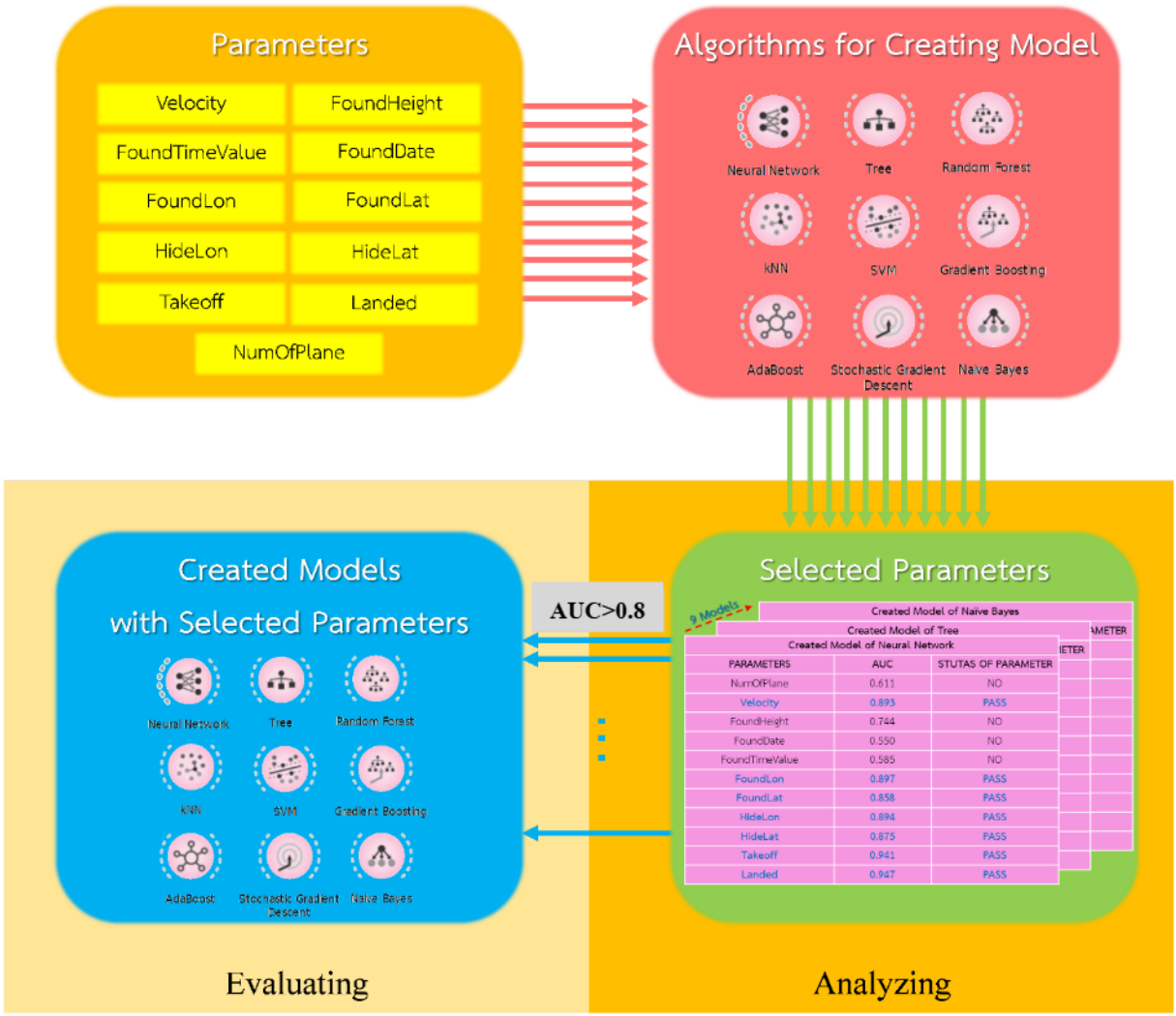
ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ถูกคัดเลือกจากระบบเรดาร์ [5]

ปัจจัย (parameter)	ความหมาย	ช่วงของข้อมูล
NumOfPlane	หมายเลขอากาศยาน	[1-150]
Velocity	ความเร็วของอากาศยาน	[0-33,000] กิโลเมตรต่อชั่วโมง
FoundHeight	ความสูงที่ถูกตรวจพบ	[0-160,000] ฟุต
FoundDate	วันที่ถูกตรวจพบ	[Mon, Tue, Wed, Thu, Fri, Sat, Sun]
FoundTimeValue	ช่วงเวลาที่ถูกตรวจพบ	[0-23]
FoundLon	ลองจิจูดที่ถูกตรวจพบ	[92-108]
FoundLat	ละติจูดที่ถูกตรวจพบ	[1-29]
HideLon	ลองจิจูดที่หายจากระบบเรดาร์	[92-108]
HideLat	ละติจูดที่หายจากระบบเรดาร์	[1-29]
Takeoff	รหัสสนามบินที่เครื่อง Take Off	[1-32]
Landed	รหัสสนามบินที่เครื่อง Landing	[1-35]

ชุดข้อมูลทั้งมีจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์และการประเมินแบบจำลองด้วยเครื่องมือที่เป็นที่นิยมและใช้งานอย่างแพร่หลายด้วยโปรแกรม Open-Source ของ Orange Data Mining Toolbox in Python [21] ดังที่แสดงในรูปที่ 2 โดยมีการนำชุดข้อมูลที่ถูกเก็บรวบรวมในฐานข้อมูลมาใช้งาน และมีการนำขั้นตอนวิธีทั้ง 9 ที่ได้ระบุไว้ในหัวข้อที่ 3.2 มาใช้ในการสร้างแบบจำลองซึ่งในกระบวนดำเนินการวิจัยจะถูกอธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2 สถาปัตยกรรมในการสร้างแบบจำลองด้วย Orange Data Mining Toolbox in Python



รูปที่ 3 ขั้นตอนในการดำเนินการวิเคราะห์และการประเมินแบบจำลอง

4.2 ขั้นตอนดำเนินการ

การวิเคราะห์และการประเมินแบบจำลองการทำนายอากาศยานจะถูกดำเนินการด้วยการดังรูปที่ 3 โดยขั้นแรกข้อมูล parameters จะถูกแยกเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยการสร้างแบบจำลองจะใช้ที่ละ parameter เพื่อดำเนินการหาค่า Area under ROC (AUC) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่า AUC ของ parameter แต่ละตัวต้องมากกว่า 0.8 โดยค่าขีดแบ่งนี้ (threshold) ได้ถูกกำหนดไว้จากการทดลองด้วยวิธี trial and error เมื่อพบว่า parameter ตัวที่มีค่า AUC มากกว่าค่า threshold จึงจะถูกนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองด้วยตัวทำนายหลายปัจจัยซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของแบบจำลองเพิ่มขึ้น ดังนั้นขั้นนี้จะเป็นการวิเคราะห์ parameter โดยแบบจำลองที่ถูกสร้างจากขั้นตอนวิธีที่แตกต่างกันอาจจะใช้ parameter เป็นตัวทำนายที่แตกต่างกัน

เมื่อทำการคัดเลือก parameter เพื่อใช้สร้างแบบจำลองในแต่ละขั้นตอนวิธี แบบจำลองที่ถูกสร้างจะถูกนำไปประเมินประสิทธิภาพด้วยเครื่องมือในการวิเคราะห์และประเมินผลซึ่งจะถูกอธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป

4.3 เครื่องมือในการวิเคราะห์และประเมิน

การประเมินผลลัพธ์ของ 9 ขั้นตอนวิธีจะถูกพิจารณาจากวิธีการที่หลากหลายจากค่าทางสถิติที่ถูกนำมาใช้ในงานที่เป็นลักษณะจำแนกข้อมูล (classification) โดยมีรายละเอียดดังนี้ [21]

Area under ROC (AUC) คือ พื้นที่ใต้เส้นโค้งซึ่งเป็นการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองการในการจำแนกเพื่อใช้วัดประสิทธิภาพ โดยกรณีที่ AUC ของแบบจำลองที่มีความแม่นยำสูงจะมีค่าเข้าใกล้ 1 ในขณะที่ค่าที่ต่ำลงจะแสดงถึงความไม่แม่นยำของแบบจำลองการจำแนก

Classification Accuracy (AC) คือ อัตราส่วนของจำนวนของตัวอย่างที่ถูกจำแนกถูกต้องต่อต่อจำนวนทั้งหมดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ค่า CA อาจไม่เหมาะสมในบางงานที่มีข้อมูลไม่สมดุล (imbalanced data) หรือมีความสำคัญของการทำนายที่แตกต่างกัน (class imbalance) ซึ่งจะทำให้การประเมินความสามารถของแบบจำลองเกิดความเบี่ยงเบนได้

Precision (PREC) คือ อัตราส่วนของตัวอย่างที่ทำนายถูกต้องเป็น True Positives (TP) เมื่อเทียบกับจำนวนทั้งหมดของตัวอย่างที่ทำนายว่าเป็น positive class หรือ TP และ False Positives (FP) โดย PREC มักถูกใช้เมื่อความสำคัญของการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการจำนวน FP สูง

Recall (RECAL) คือ อัตราส่วนของตัวอย่างตัวอย่างที่ทำนายถูกต้องเป็น TP เมื่อเทียบกับจำนวนของตัวอย่างที่ทำนายถูกต้องว่าเป็น TP รวมกับ จำนวนของตัวอย่างที่ทำนายว่าไม่ใช่ False negatives (FN) โดย มักถูกใช้เมื่อความสำคัญของการระบุ positive class ที่เป็นจริงมีความสำคัญมากกว่าความสำคัญของการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการระบุ FN

Matthews Correlation Coefficient (MMC) คือ ตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่ใช้ในการประเมินความแม่นยำของแบบจำลองการจำแนกข้อมูล โดยที่ค่าบวกที่ใกล้เคียง 1 จะแสดงถึงความแม่นยำในการจำแนกข้อมูล MMC ถูกใช้เป็นที่นิยมในงานที่มีความสำคัญที่สูงในการจำแนกคลาสที่มีจำนวนตัวอย่างไม่สมดุลกัน อย่างเช่น กรณีที่คลาสที่ต้องการจำแนกมีจำนวนตัวอย่างที่น้อยเมื่อเปรียบกับคลาสอื่น หรือกรณีที่คลาสที่ต้องการจำแนกมีน้ำหนักที่สำคัญมากกว่าคลาสอื่น

5. ผลการวิจัย

จากผลการทดลองในส่วนของการวิเคราะห์ค่าปัจจัยทั้ง 11 ปัจจัย จะถูกนำไปใช้สร้างแบบจำลองแบบปัจจัยเดียว โดยมีการพิจารณาจาก AUC ของแบบจำลองที่ได้ถูกสร้างในแต่ละปัจจัยเมื่อมีค่ามากกว่า 0.8 ปัจจัยนั้นจะถูกเลือกเพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองแบบหลายปัจจัย ทั้ง 9 ขั้นตอนวิธีนั้น พบว่ามีปัจจัยที่ถูกเลือกแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2 ในแบบจำลองที่ถูกสร้างด้วยขั้นตอนวิธี Neural Network จะใช้ Velocity FoundLon FoundLat HideLon HideLat Takeoff และ Landed เพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองหลายปัจจัยที่มีประสิทธิภาพ สำหรับขั้นตอนวิธี Random Forest มีการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการทำนาย เช่นเดียวกับ Neural Network นอกจากนี้การวิเคราะห์สร้างแบบจำลองด้วยขั้นตอนวิธี SVM จะใช้เพียง FoundLon Takeoff และ Landed เพียงเท่านั้น สำหรับการวิเคราะห์การสร้างแบบจำลองด้วยขั้นตอนวิธี Decision Tree พบว่ามีค่าปัจจัย Takeoff และ Landed ไม่เหมาะสม Not Applicable (N/A) กับการนำมาใช้สร้างแบบจำลองกับวิธีดังกล่าว ในขณะที่การวิเคราะห์การสร้างแบบจำลองด้วยขั้นตอนวิธี Stochastic Gradient Descent กับพบว่าไม่มีค่าปัจจัยที่ผ่านเงื่อนไข ดังนั้น Stochastic Gradient Descent จึงไม่ถูกพิจารณาเพื่อสร้างแบบจำลองเนื่องจากคุณลักษณะของขั้นตอนวิธีดังกล่าวอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ไม่ดีโดยการวิเคราะห์จากขั้นตอนการคัดเลือกปัจจัย

ตารางที่ 2 AUC ของแต่ละปัจจัยจาก 9 ขั้นตอนวิธี

PARAMETERS	AUC								
	Neural Network	Decision Tree	Random Forest	K-NN	SVM	Naïve Bayes	AdaBoost	Gradient Boosting	Stochastic Gradient Descent
NumOfPlane	0.611	0.609	0.611	0.566	0.573	0.608	0.552	0.609	0.549
Velocity	**0.893**	**0.902**	**0.903**	0.771	0.799	**0.844**	0.762	**0.897**	0.619
FoundHeight	0.744	0.762	0.762	0.605	0.623	0.705	0.579	0.764	0.517
FoundDate	0.550	0.649	0.728	0.693	0.500	0.708	0.503	0.559	0.500
FoundTimeValue	0.585	0.617	0.616	0.544	0.512	0.565	0.576	0.573	0.504
FoundLon	**0.897**	**0.910**	**0.913**	**0.807**	**0.832**	**0.819**	**0.846**	**0.905**	0.573
FoundLat	**0.858**	**0.896**	**0.912**	**0.800**	0.763	**0.810**	**0.833**	0.686	0.585
HideLon	**0.894**	**0.912**	**0.915**	**0.814**	0.797	**0.819**	**0.845**	**0.849**	0.552
HideLat	**0.875**	**0.907**	**0.912**	**0.811**	0.785	**0.816**	**0.848**	0.713	0.594
Takeoff	**0.941**	N/A	**0.939**	**0.819**	**0.909**	**0.938**	**0.873**	**0.899**	0.733
Landed	**0.947**	N/A	**0.945**	**0.816**	**0.890**	**0.944**	**0.876**	**0.913**	0.745
Number of Selected Parameters	**7**	**5**	**7**	**6**	**3**	**7**	**6**	**5**	**0**

*ปัจจัยที่มีค่า AUC มากกว่า 0.800 จะถูกเลือกเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ในส่วนของการประเมินแบบจำลองจะถูกนำไปประเมินประสิทธิภาพด้วยเครื่องมือในการประเมินผลทางสถิติ ได้แก่ AUC CA PREC RECALL และ MMC ซึ่งอธิบายในหัวข้อที่ 4.3 ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าเมื่อพิจารณาจากพื้นที่ใต้เส้นโค้ง AUC ที่แสดงถึงความแม่นยำในการทำนายพบว่าแบบจำลองที่ถูกสร้างด้วยขั้นตอนวิธี Neural Network มีค่า AUC เท่ากับ 0.990 ซึ่งมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับขั้นตอนวิธีที่เหลือ ในขณะที่ Gradient Boosting มีค่า AUC เท่ากับ 0.782 ซึ่งมีความแม่นยำอน้อยที่สุด ในการพิจารณาความแม่นยำในการจำแนกคุณลักษณะนั้นพบว่าการสร้างแบบจำลองด้วยขั้นตอนวิธี Random Forest มีค่า CA เท่ากับ 0.847 ในขณะที่ Neural Network มีค่าห่างกันเพียงเล็กน้อย โดยมี CA เท่ากับ 0.832 ในทางตรงข้ามขั้นตอนวิธี SVM จะมีค่า CA น้อยที่สุดเท่ากับ 0.460 ในการประเมินผลของ PREC และ RECAL ขั้นตอนวิธี K-NN จะให้ผลลัพธ์ที่ต่ำที่สุด และในส่วนของ MMC พบว่ามีเพียง 2 ขั้นตอนวิธีที่มีค่ามากกว่า 0.8 ซึ่งได้แก่ Neural Network และ Random Forest

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์ของ 9 ขั้นตอนวิธีที่ถูกสร้างแบบจำลองจากปัจจัยที่ถูกเลือก

Algorithm	Neural Network	Decision Tree	Random Forest	K-NN	SVM	Naïve Bayes	AdaBoost	Gradient Boosting	Stochastic Gradient Descent
AUC	0.990	0.925	0.981	0.917	0.935	0.983	0.941	0.782	N/A
CA	0.832	0.808	0.847	0.710	0.460	0.736	0.712	0.663	N/A
PREC	0.808	0.804	0.834	0.687	0.474	0.778	0.700	0.788	N/A
RECALL	0.832	0.808	0.847	0.710	0.460	0.736	0.712	0.663	N/A
MMC	0.813	0.788	0.830	0.677	0.412	0.711	0.680	0.637	N/A

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์และการประเมินแบบจำลองการทำนายอากาศยานในการระบุประเภทและแบบอากาศยานนั้น พบว่า ชุดข้อมูลที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์และประเมินแบบจำลองซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 30,000 ชุด และมีคุณลักษณะในการจำแนกที่แตกต่างกัน 72 คุณลักษณะ พบว่า ในส่วนของการวิเคราะห์ค่าปัจจัยที่โดยใช้ทีละปัจจัยในการสร้างแบบจำลองเพื่อพิจารณา AUC ที่ต้องมีค่ามากกว่า 0.8 ซึ่งในแต่ละขั้นตอนวิธีมีค่าปัจจัยที่ถูกเลือกมีความแตกต่างกันทั้งนี้เป็นผลมาจากลักษณะของข้อมูลตัวแปรต้นที่มีรูปแบบที่เหมาะสมกับแต่ละขั้นตอนวิธีแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่า Neural Network Decision Tree และ Naïve Bayes มีปัจจัยที่ผ่านการคัดเลือกเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองถึง 7 ปัจจัยจาก 11 ปัจจัย ในขณะที่ Stochastic Gradient Descent ไม่มีปัจจัยใดที่ผ่านการคัดเลือก ในส่วนของการประเมินแบบจำลองพบว่าแบบจำลองที่ถูกสร้างจากขั้นตอนวิธีที่มีการคัดเลือกจำนวนปัจจัยที่มากกว่าย่อมส่งผลต่อค่า AUC และ CA ที่สูงกว่าแบบจำลองที่ถูกสร้างจากขั้นตอนวิธีที่มีการคัดเลือกจำนวนปัจจัยที่น้อยกว่า อย่างไรก็ตามจากผลลัพธ์ที่ได้มีการพิจารณา AUC CA PREC RECALL และ MMC นั้น จะพบว่าแบบจำลองที่ถูกสร้างด้วยขั้นตอนวิธี Neural Network และ Random Forest จะให้ประสิทธิภาพที่เหนือกว่าขั้นตอนวิธีอื่น

6. สรุป

อากาศยานแต่ละประเภทมีความสามารถและการใช้งานแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน ในขณะที่อากาศยานทางการทหารมีวัตถุประสงค์ที่ถูกสร้างสำหรับการปฏิบัติการทางทหารซึ่งล้วนเป็นภัยต่อความมั่นคงเมื่อไม่สามารถตรวจและพิสูจน์ฝ่ายอากาศยานนั้นจากภาคพื้นได้การพิสูจน์ฝ่ายจากระบบเรดาร์เป็นกระบวนการที่สำคัญซึ่งจะต้องดำเนินการอย่างรวดเร็วเพื่อให้ทราบถึงประเภทและแบบอากาศยานสำหรับเป็นข้อมูลในการตัดสินใจกลยุทธ์ทางทหารสำหรับการจัดการของกองทัพอากาศ ในการจัดอากาศยานรบสมรรถนะสูงขึ้นบินสกัดกั้น และแจ้งหน่วยต่อสู้อากาศยานให้พร้อมป้องกันฐานบิน โดยการวิเคราะห์และการประเมินแบบจำลองการทำนายอากาศยานซึ่งพบว่าขั้นตอนวิธีที่มีประสิทธิภาพในการสร้างแบบจำลองนั้นได้แก่ Neural Network และ Random Forest ตามลำดับ ในขณะที่ตัวแปรที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อระบุประเภทและแบบอากาศยานได้แก่ Velocity FoundLon FoundLat HideLon HideLat Takeoff และ Landed ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำนายโดยรวมมีความแม่นยำยิ่งขึ้น

7. ข้อเสนอแนะ

ประสิทธิภาพของแบบจำลองนอกจากจะขึ้นอยู่กับการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมและการเลือกขั้นตอนวิธีที่มีประสิทธิภาพแล้วยังขึ้นอยู่กับคุณภาพของชุดข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง การรวบรวมชุดข้อมูลที่เป็นตัวแทน (representative) เมื่อมีการพิจารณาให้ครอบคลุมประเภทและแบบอากาศยาน เมื่อนำไปใช้งานจริงจำเป็นที่จะต้องมีการสกัดข้อมูล (data extraction) ด้วยวิธีที่มีประสิทธิภาพจะช่วยให้การดำเนินการเป็นไปอย่างอัตโนมัติ

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนข้อมูลจาก ระบบวิเคราะห์ความเคลื่อนไหวกำลังทางอากาศประเทศเพื่อนบ้าน จากกรมข่าวทหารอากาศเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และการประเมินแบบจำลองในการระบุประเภทและแบบอากาศยาน และขอขอบพระคุณ นาวาอากาศเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง ที่คอยให้คำแนะนำตลอดทั้งช่วย ชี้แนะแนวทางในการพัฒนางานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วง

9. เอกสารอ้างอิง

[1] Cai, Y., Rajaram, D., & Mavris, DN. (2019). Multi-mission multi-objective optimization in commercial aircraft conceptual design. *AIAA Aviation 2019 Forum*.

[2] กองการบิน. (2019). **คู่มือการบินติดตามการเปลี่ยนแปลงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม**. สำนักงานปลัดกระทรวงทรัพยาการธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

[3] Mancini, A., Zamboni, J., & Moerland, E. (2021). A knowledge-based methodology for the initiation of military aircraft configurations. *AIAA Aviation 2021 Forum*.

[4] Daungklang, P., & Kruakao. R. (2019). Models for automatic aircraft type prediction. *NKRAFA Journal of Science and Technology*. 15:1–8.

[5] Anchuen, P., & Phisutthangkoon, N. (2022). A Model of Fighter Aircraft Classification Based on Information of Unknown Target Using Artificial Neural Networks. *Journal of Applied Research on Science and Technology*. 21(2):89–103.

[6] พระราชบัญญัติว่าด้วยการปฏิบัติต่ออากาศยานที่กระทำผิดกฎหมาย (ฉบับ ๓) พ.ศ. ๒๕๕๓. (๒๕๕๓, ๒๒ พฤศจิกายน).

[7] Mekruksavanich, S. (2020). ระบบฐานข้อมูลเทคโนโลยีป้องกันประเทศ. *Defence Technology Academic Journal*. 2(5):4–15.

[8] Khera, KK. (2020). **Air Defence Command-A Bold Test Case**. Institute for Defense Studies & Analyses (IDSA).

[9] Petchmak, W., Daungklang, P., & Anchuen, P. (2023). Comparing Coverage Models of Radar: Evaluating Viewshed Against Ground Truth Detection. 2023 8th International STEM Education Conference (iSTEM-Ed). Ayutthaya, Thailand: IEEE. p. 1-4. doi: 10.1109/iSTEM-Ed59413.2023.10305727.

[10] Uthansakul, P., Anchuen, P., Uthansakul, M., & Ahmad, K. A. (2020). Estimating and Synthesizing QoE Based on QoS Measurement for Improving Multimedia Services on Cellular Networks Using ANN Method. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 17(1):389–402. doi: 10.1109/TNSM.2019.2946091.

[11] James, DE. (1996). **Straightforward statistics for the behavioral sciences.** Thomson Brooks/Cole Publishing Co.

[12] Li, Z., Liu, F., Yang, W., Peng, S., & Zhou, J. (2021). A survey of convolutional neural networks: analysis, applications, and prospects. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*.

[13] Costa, V.G., & Pedreira, C.E. (2023). Recent advances in decision trees: An updated survey. *Artificial Intelligence Review*. 56(5):4765–800.

[14] Hu, J., & Szymczak, S. (2023). A review on longitudinal data analysis with random forest. *Brief Bioinform*. 24(2).

[15] Bansal, M., Goyal, A., & Choudhary, A. (2022). A comparative analysis of K-nearest neighbor, genetic, support vector machine, decision tree, and long short term memory algorithms in machine learning. *Decision Analytics Journal*. 3:100071.

[16] Cervantes, J., García-Lamont, F., Rodríguez-Mazahua, L., & López, A. (2020). A comprehensive survey on support vector machine classification: *Applications, challenges and trends. Neurocomputing*. 408:189–215.

[17] Chen, S., Liu, Y., Yin, Y., Pan, Q., & Guo, Y. (2020). A novel selective naïve Bayes algorithm. *Knowledge-Based Systems*. 192:105361.

[18] Bahad, P., & Saxena, P. (2020). Study of adaboost and gradient boosting algorithms for predictive analytics. In: International Conference on Intelligent Computing and Smart Communication 2019: Proceedings of ICSC 2019. Singapore: Springer.

[19] Velthoen, J., Moerland, E., Jansen, B., & Heskes, T. (2023). Gradient boosting for extreme quantile regression. *Extremes*. 26(4):639–67.

[20] Liu, Y., Gao, Y., & Yin, W. (2020). An improved analysis of stochastic gradient descent with momentum. Advances in Neural Information Processing Systems. 33:18261–71.

[21] Demsar, J., Curk, T., Erjavec, A., Gorup, C., Hocevar, T., & Milutinovic, M. (2013). data mining toolbox in Python. *the Journal of machine Learning research*. 14:2349-2353.

การหาปริมาณปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมดในน้ำทะเล ด้วยวิธีสเปกโตรฟลูออโรเมทรีแบบลดสเกล

A reduced scale spectrofluorometric method for determination of total petroleum hydrocarbon in seawater

[1*]นภา ตั้งเตรียมจิตมั่น และ [2#]รัชชานนท์ วงษ์พันธ์

[1,2]ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

[1*]Napa Tangtreamjitmun and [2#]Ruchanon Wongpun

[1,2]Department of Chemistry, Faculty of Science, Burapha University

[*]napa@go.buu.ac.th, [#]jameandjaja_@hotmail.com

Received: June 7,2024

Revised: July 10,2024

Accepted: October 10,2024

บทคัดย่อ

วิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (TPH) ในน้ำทะเลซึ่งจัดทำโดยคณะกรรมาธิการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยสมุทรศาสตร์ได้ถูกนำมาปรับปรุงให้สอดคล้องกับแนวคิดเคมีวิเคราะห์สีเขียว โดยทำการลดปริมาตรของตัวอย่างน้ำทะเลและตัวทำละลายอินทรีย์ที่ใช้ในการสกัด จากการลดปริมาตรนี้ทำให้แฟกเตอร์เพิ่มความเข้มข้นลดจาก 800 เป็น 20 ซึ่งเหมาะสมกับสภาพไวในการวิเคราะห์ของเครื่องสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ที่มีขายในปัจจุบัน กราฟมาตรฐานของไครซีน (ที่ไม่ได้ผ่านการสกัด) มีความเป็นเส้นตรงระหว่าง 10-200 ไมโครกรัมต่อลิตร มีสมการเส้นตรง y=1.567x+2.524 และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) 0.9992 ค่าขีดจำกัดการตรวจวัด (3sd/m, n=10) และค่าขีดจำกัดการวิเคราะห์ปริมาณ (10sd/m, n=10) มีค่าเท่ากับ 0.065 และ 0.22 ไมโครกรัมต่อลิตร ตามลำดับ วิธีที่นำเสนอนี้ได้นำไปวิเคราะห์ปริมาณ TPH ในน้ำทะเลชายหาดบางแสน จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย วิธีที่นำเสนอนี้ควรได้รับการทดสอบการหาความเที่ยงของวิธีระหว่างห้องปฏิบัติการจากหน่วยงานประกันคุณภาพของวิธีวิเคราะห์เพื่อการยอมรับให้เป็นวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์ TPH ในน้ำทะเล

คำสำคัญ : เคมีวิเคราะห์สีเขียว, น้ำทะเล, สเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์, ปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด

Abstract

The standard guide for determining total petroleum hydrocarbon (TPH) in seawater, established by the Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), has been adapted to align with principles of green analytical chemistry. This adaptation involves reducing both the sample volume and the amount of extraction solvent used. These modifications have reduced the pre-concentration factor from 800 to 20, making it compatible with the high-sensitivity spectrofluorometers currently available in the market. A calibration curve of chrysene without extraction was linear over a concentration range of 10-200 μg/L. The regression equation was y=1.567x+2.524 with the

coefficient of determination (R^2) 0.9992. Limit of detection (3sd/m, n=10) and limit of quantitation (10sd/m, n=10) were 0.065 and 0.22 μg/L, respectively. The method was employed to assess TPH levels in seawater along Bangsean beach in Chonburi province, Thailand. To establish it as a standard method, collaborative trials of this approach should be conducted for validation and acceptance.

Keywords: green analytical chemistry, seawater, spectrofluorometer, total petroleum hydrocarbon

1. Introduction

Marine pollution resulting from petroleum hydrocarbons is a significant concern, given their toxicity to both human and marine ecosystems. Certain Total petroleum hydrocarbons (TPH) compounds can impact the human nervous system, leading to symptoms such as headaches and dizziness. Consequently, it is imperative to take measures to address and mitigate the impact of these pollutants on both our environment and overall health. In recognition of this, the Intergovernmental Oceanographic Commission took a significant step by establishing the standard method for monitoring seawater quality with respect to total petroleum hydrocarbon (TPH) levels back in 1984 [1]. The analysis of TPH is considered semi-quantitative due to the diverse range of hydrocarbons that can contaminate seawater samples. Thus, TPH determination in seawater is quantified in units of "chrysene equivalent" a metric defined by the IOC to account for this variability. Chrysene is a polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) with the molecular formula $C_{18}H_{12}$. There are four fused benzene rings in chrysene structure that benefit for spectrofluorometric determination as depicted in Figure 1. The method was published as a standard guide called "Manual for monitoring oil and dissolved/dispersed petroleum hydrocarbons in marine water and on beach"[1].

This IOC guide suggested extraction procedure, which uses 100 mL of hexane to extract TPH from 3-4 L of the seawater sample using a separatory funnel. The large volumes of sample and hexane used in this extraction process have created operational challenges, making the procedure cumbersome. Furthermore, it generates a substantial amount of waste solution, which is not environmentally friendly. The standard guide employs spectrofluorometric analysis as its technique. A spectrofluorometer features a single light source, two monochromators, and two detectors. One detector measures the initial intensity of the light from the source, while the other detector measures the emitted light from a substance in solution. Despite these challenges, this standard guide remains in use within numerous national and international monitoring programs for TPH determination in seawater [2]. In recent years, technological advancements have accelerated, particularly in scientific instrument technology, resulting in notable enhancements in spectrofluorometer performance, especially regarding sensitivity. With the availability of highly sensitive instruments, smaller sample quantities are now sufficient for precise determination, enabling more efficient and environmentally conscious analytical processes.

To address these concerns, we engaged in the task of aligning the IOC standard guide for TPH determination with the principles of green analytical chemistry. Our approach involved scaling down the analysis process by reducing both the volume of seawater sample and the amount of extracted solvent specified in the IOC standard guide. In accordance with the guide, we utilized hexane and a separatory funnel for extraction. Subsequently, the resulting extracted solution was subjected to measurement using a spectrofluorometer. This transformation aligns with environmentally friendly practices while maintaining the integrity of the analytical process. The modified method was used for determination of TPH in seawater

samples in a unit of chrysene equivalent. The analytical figures of chrysene determination using spectrofluorometric technique was evaluated to demonstrate the current performance of spectrofluorometer in use today.

2. Materials and methods

2.1 Apparatus and reagents

A spectrofluorometer model Cary Eclipse (Agilent, USA) was used for the analysis in this work. Deionized water (DW) was obtained from E-Pure Barnstead 3 column model D4632 (Thermo fisher scientific, USA). Chrysene ($C_{18}H_{12}$, analytical standard grade) was purchased from Supelco (USA). Hexane (C_6H_{14}, AR Grade) was purchased from RCI Labscan (Thailand). Sodium sulphate anhydrous, (Na_2SO_4, AR/ACS Grade) was purchased from Loba Chemie (India).

2.2 Procedures

A 100 mL of seawater sample was accurately pipetted into the 125 mL separatory funnel using a volumetric pipet, followed by the addition of 5 mL of hexane using volumetric pipet. After securely sealing the separatory funnel, vigorous shaking for 5 minutes ensued, allowing for proper mixing. Subsequently, the mixture was left undisturbed for phase separation, with the upper organic phase being carefully transferred into a covered beaker. The water phase underwent a second extraction with an additional 5 mL of hexane, and the second organic phase was combined with the first. Anhydrous sodium sulfate was introduced to absorb any remaining water content, and the saturated sodium sulfate was then filtered out using No.1 Whatman filter paper. The extracted solvent was left to evaporate in a fume hood. These residues were dissolved with hexane and transferred into a 5 mL volumetric flask. Finally, the solution was measured using a spectrofluorometer for TPH analysis.

The spectrofluorometer conditions were optimized as following; an excitation wavelength (λ_{ex}) 310 nm and an emission wavelength (λ_{em}) 361 nm, both utilizing a slit width of 10 nm. The average reading time was set at 0.1 s, and a photomultiplier tube (PMT) voltage of 600 volts was applied for precise and sensitive measurements. These settings ensured the accuracy and reliability of the spectrofluorometric analysis.

2.3 Sampling

Seawater samples were collected from a depth of 1 meter below the surface at three distinct locations along the Chonburi coastal region in Thailand as shown in Figure 1. These specific sampling sites were identified as follows: Wonnapa beach (S1 - 13°16'16.3"N 100°55'19.2"E), Bangsaen beach (S2 - 13°17'08.5"N 100°54'44.4"E), and Laemtan beach (S3 - 13°18'11.4"N 100°53'49.3"E). To preserve the samples' integrity, one-liter amber glass bottles were employed for collection, and the bottle caps were sealed with aluminum foil to prevent any external contamination. Subsequently, the samples were stored in a dark and cool environment and analyzed within 3-4 hours after the initial sampling, in strict accordance with the guidelines specified in the IOC standard guide.

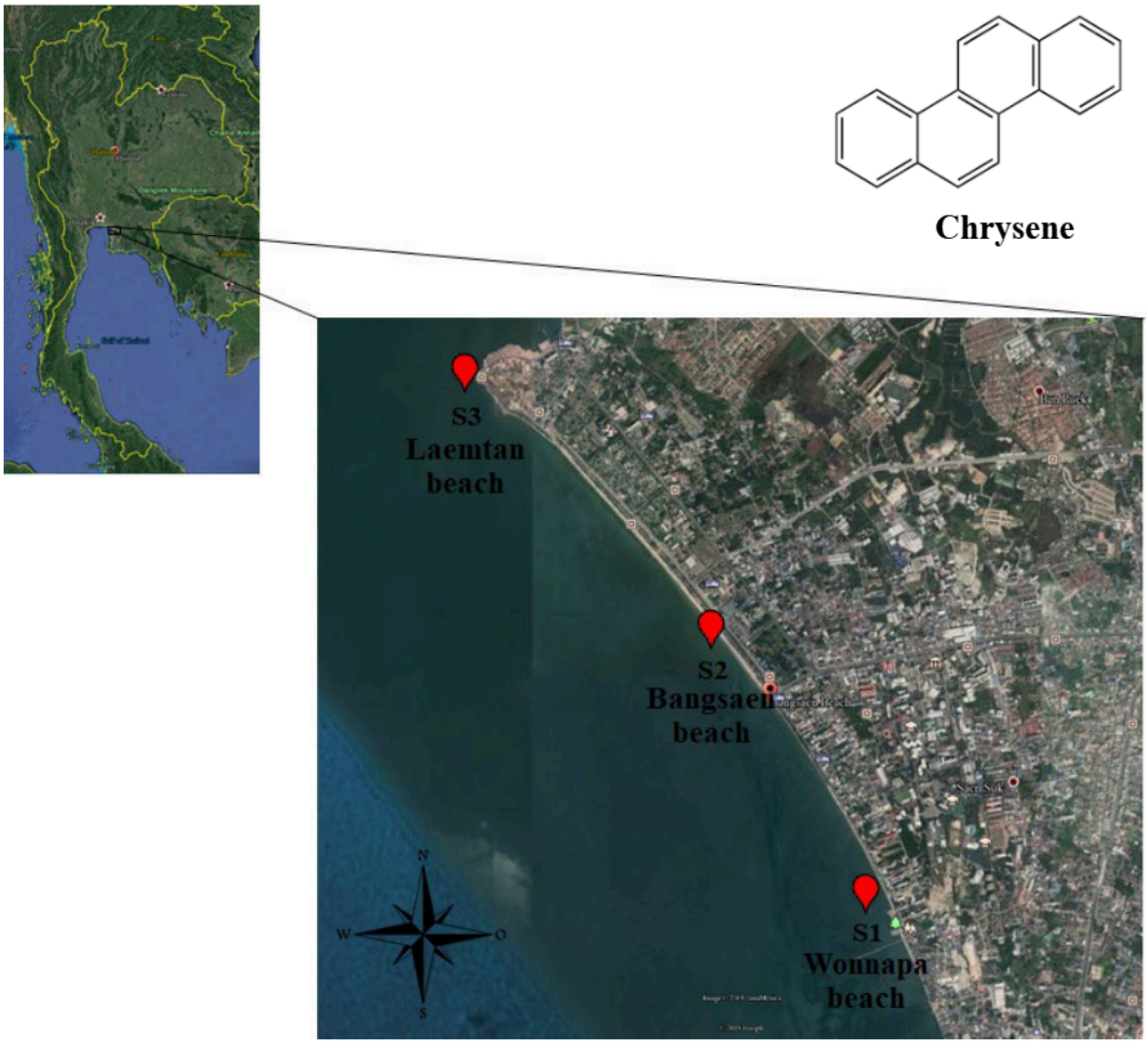


Figure 1. Chrysene standard structure and location of sample site; S1, S2 and S3 along Chonburi coastal in Thailand.

3. Results and discussion

Chrysene was used as a standard for TPH analysis according to IOC standard guide. The analytical figures of merits for chrysene determination by spectrofluorometer were presented as following.

3.1 Calibration curve

The standard solutions of chrysene were prepared in hexane and measured by spectrofluorometer. The calibration curve was linear over a concentration range of 10-200 µg/L as Figure 2. The regression equation was y=1.567x+2.524 with the coefficient of determination (R^2) 0.9992.

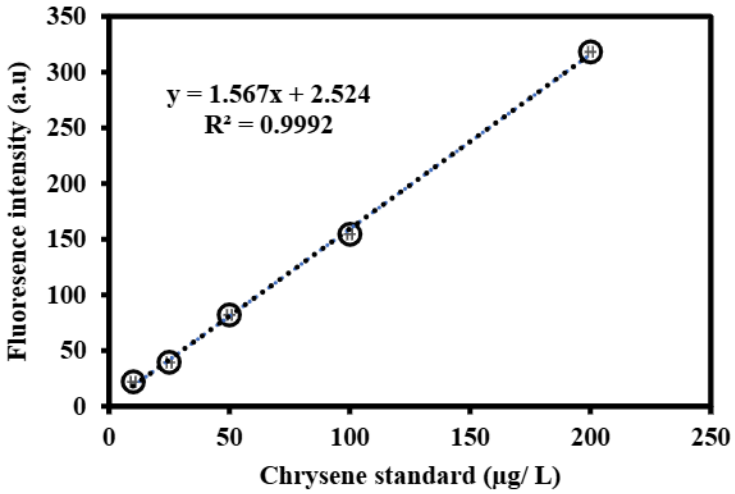


Figure 2. The calibration curve of chrysene standard (n=3).

In Figure 2, the observed chrysene concentration range was notably lower, approximately 10-15 times less, than the recommended calibration curve range stipulated in the IOC standard guide, which was 0.1-3 µg/mL or 100-3000 µg/L [1]. This observation underscores the fact that modern chrysene analysis can be effectively conducted at significantly lower concentration ranges than previously prescribed in the IOC standard guide.

3.2 Limit of detection (LOD) and limit of quantitation (LOQ)

The blank solution, which consisted of deionized water, underwent spectrofluorometric measurement following the procedure outlined in section 2.2. To establish the limit of detection and limit of quantitation, the standard deviations were calculated based on ten replicated measurements of the blank signal. The limit of detection was determined as 0.065 µg/L while the limit of quantitation was found to be 0.22 µg/L, each derived from three and ten times the standard deviation, respectively.

3.3 Precision

Some low molecular weight TPH in seawater samples can be easily lost by volatilization. In order to avoid any lost that would occur during three days storage of samples, the freshly prepared chrysene standard solution was used to study the precision of the proposed method. A 100 mL of 5 µg/L chrysene standard solution was daily prepared and measured through the procedure in section 2.2 for extraction and spectrofluorometric detection. The analysis was performed in duplicate for three consecutive days. The results were shown in Table 1.

Table 1 Chrysene determination using the proposed method over three consecutive days.

Day	Chrysene (µg/L)	
	Duplicate 1	Duplicate 2
1	3.52	3.65
2	3.21	3.36
3	3.79	3.69

One-way ANOVA statistic function was used to determine the mean square between days (MSB) and the mean square within days (MSW) as given in Table 2. The obtained *p*-values 0.0333 is smaller than 0.05, therefore the between day variation is larger than within day variation. Within day variation represents repeatability and between day variation represents the intermediate precision in terms of the within-laboratory reproducibility of the proposed method [3-4].

Table 2 Statistical results of single ANOVA for precision analysis from Excel program.

Source of Variation	SS[a]	df[b]	MS[c]	*F*	*p*-value	*F* crit
Between Groups	0.2140	2	0.1070	13.0	0.0333	9.6
Within Groups	0.0247	3	0.0082			
Total	0.2387	5				

[a] sum square, [b] degree of freedom, [c] mean square

The standard deviations for repeatability (s_r) and within-laboratory reproducibility (s_R) were calculated from the MS using the following equation 1 and 2 [5].

For repeatability,

$$S_r = \sqrt{MSW} = \sqrt{0.0082} = 0.091 \ \mu g/L \quad (1)$$

For within-laboratory reproducibility,

$$s_R = \sqrt{MSW + \frac{(MSB - MSW)}{n}} = \sqrt{0.0082 + \left(\frac{0.1070 - 0.0082}{2}\right)} = 0.24 \ \mu g/L \quad (2)$$

The repeatability and within laboratory reproducibility in term of relative standard deviations (RSD) would be 2.57% and 6.79%, respectively. Both RSD values fall within the acceptable range as per the guidelines established by the Association of Official Analytical Chemists [6].

The determined analytical figures indicated high sensitivity of spectrofluorometer commonly used in general laboratory. As a consequence, the high sensitivity enables a reduction in the volume of seawater sample required for extraction. In IOC standard guide, 3-4 L of seawater sample was extracted twice using 50 mL of hexane each time. The combined 100 mL of extracted hexane was then concentrated down to 5 mL using a rotary evaporator, resulting in a preconcentration factor of 600-800, necessitated by the wide concentration range of the calibration curve (100-3000 µg/L) mentioned earlier. However, recent research and publications on TPH analysis in seawater using a modified IOC standard guide indicate a trend towards utilizing lower preconcentration factors, as summarized in Table 3.

Table 3 Preconcentration factors for TPH analysis using the modified IOC standard guide in published research.

Seawater (mL)	Hexane volume used in extraction (mL)	Preconcentration factor	References
4000	5	800	[7]
4000	10	400	[8]
2000	5	400	[9]
4000	10	400	[10]
2800	10	280	[11]
1000	5	200	[12]
1000	10	100	[13]
100	5	20	This work

In this study, a sample volume of 100 mL was extracted twice using 5 mL of hexane each time. The resulting 10 mL of combined hexane extract was then reduced to 5 mL before spectrofluorometric analysis. Consequently, the preconcentration factor for this extraction method was 20. The method's quantitation limit was calculated as 0.22/20 = 0.011 μg/L, which is well below 0.07 μg/L detection limit reported by Bicego and colleagues [7] using a preconcentration factor of 800. This indicates that a significantly large preconcentration factor is not essential for TPH analysis.

3.4 Sample analysis

The samples collected from locations S1, S2, and S3 were extracted with hexane and analyzed using a spectrofluorometer, following the procedure described in section 2.2. To determine the TPH concentration in these samples, the calibration curve was employed, with the TPH concentration reported in μg/L being equivalent to that of chrysene, as detailed in Table 4.

Table 4 TPH in seawater samples collected from Chonburi coastal in Thailand (n=3).

Sample site	TPH (μg/L)
Wonnapa beach (S1)	1.05 ± 0.02
Bangsaen beach (S2)	0.90 ± 0.09
Laemtan beach (S3)	0.70 ± 0.08

The TPH limit for seawater in Thailand was classified by Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment into three levels with three standards of seawater quality: 0.5 μg/L for natural resource conservation and aquatic animal breeding, 1.0 μg/L for tourist attraction areas, and 5.0 μg/L for industrial, harbor, and community seawater. The seawater quality from the three consecutive sample sites (S1, S2, and S3) falls into these three distinct groups. S1,

located near a small fisherman village with frequent fishing boat discharges, exhibited the highest TPH concentration. S2, a tourist attraction beach with lesser discharges from recreational motor boats, had a lower TPH concentration. S3, a beach with minimal human activity and predominantly oyster farming, showed the least TPH concentration. Notably, the TPH concentration in S3 exceeded the limit for aquatic animal breeding, while the other two sample sites, remained within their respective quality standard limits.

4. Conclusions

This study presents a spectrofluorometric approach for determining TPH levels in seawater. The method involves a modification of the liquid-liquid extraction procedure outlined in the IOC standard method, achieved by reducing the volume of both seawater sample and the solvent used for extraction. This reduction not only lowers the analysis costs due to reduced solvent usage but also minimizes waste production. Moreover, working with smaller seawater sample volumes for extraction and collection proves to be less cumbersome. This reduced scale method is environmentally friendly to conform to green analytical chemistry [14]. Further work on a Collaborative Trials (CT) of this proposed method should be performed involving an accredited quality assurance organization to validate this proposed method and potentially establish it as an accepted standard [5], [15].

5. Acknowledgements

This work was partially supported by Science Innovation Facility, Faculty of Science, Burapha University (SIF-IN-51300014).

6. References

[1] IOC/UNESCO (1984). Manual for monitoring oil and dissolved/dispersed petroleum hydrocarbons in marine waters and on beaches. France. Retrived on March 31, 2024: from https://www.jodc.go.jp/info/ioc_doc/Manual/060618eb.pdf

[2] Wattayakorn, G. (2012). Petroleum pollution in the gulf of Thailand: A historical review. *Coastal Marine Science,*. 35(1): 234-245.

[3] ISO5725-3:1994. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results –Part 3: Intermediate measures of the precision of a standard measurement method. Geneva, International Organization for Standardization.

[4] ISO3534-2:2006. Statistics – Vocabulary and symbols – Part 2: Applied statistics. Geneva, International Organization for Standardization.

[5] Thompson, M. & Lowthian, P.J. (2011). **Notes on statistics and data quality for analytical chemists**. London: Imperial College Press.

[6] AOAC (2016) Guidelines for standard method performance requirements: Appendix F. (Association of Official Analytical Chemists) Rockville, MD, USA. Retrived on March 31, 2024: from: http://www.eoma.aoac.org/app_f.pdf

[7] Bícego, M.C., Zanardi-Lamardo, E. & Weber, R.R. (2003). Four-year survey of dissolved/dispersed petroleum hydrocarbons on surface waters of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Revista Brasileira de Oceanografia.* 51: 33-38.

[8] Wattayakorn, G. & Rungsupa, S. (2012). Petroleum hydrocarbon residues in the marine environment of Koh Sichang-Sriracha, Thailand. *Coastal Marine Science.* 35(1): 122-128.

[9] González, J.J., Viñas, L., Franco, M.A., Fumega, J., Soriano, J.A., Grueiro, G., Muniategui, S., López-Mahía, P., Prada, D., Bayona, J.M., Alzaga, R. & Albaigés, J. (2006). Spatial and temporal distribution of dissolved/dispersed aromatic hydrocarbons in seawater in the area affected by the Prestige oil spill. *Marine Pollution Bulletin.* 53(5): 250-259.

[10] Shriadah, M.M.A. (2000). Levels and distribution of petroleum hydrocarbons in the coastal waters and sediments of the United Arab Emirates in the Arabian Gulf and the Gulf of Oman. *Water, Air, and Soil Pollution.* 119(1): 247-256.

[11] Chouksey, M.K., Kadam, A.N. & Zingde, M.D. (2004). Petroleum hydrocarbon residues in the marine environment of Bassein–Mumbai. *Marine Pollution Bulletin*. 49(7): 637-647.

[12] Nageswar, R.M., Ram, A., Rokade, M.A., Raja, P., Rakesh, P.S., Chemburkar, P. & Gajbhiye, S.N. (2016). Preliminary estimate of total petroleum hydrocarbons in water and some commercially important fish species in the Amba estuary, west coast of India. *Bulletin Environmental Contamination Toxicology,* 97(1), 56-62.

[13] Pikkarainen, A.L. & Lemponen, P. (2005). Petroleum hydrocarbon concentration in Baltic sea surface water. *Boreal Environment Research.* 10: 125-134.

[14] Guardia, M. & Garrigues, S. (2012). **Handbook of green analytical chemistry.** UK: John Wiley & Sons, Ltd.

[15] Miller, J.M. & Miller, J.C. (2010). **Statistics and chemometrics for analytical chemistry**. 6th ed, Gosport: Ashford Colour Press Ltd.

การวัดค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นด้วยลูกตุ้มแท่งกลมที่มีคาบน้อยที่สุด

Local gravity measurement by using the minimized period of rod pendulums

[1*]สายชล สิทธิพงศ์ และ [2#]บัญชา ค้งตระกูล

[1*] สาขาวิชาเทคโนโลยียานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่

[2#] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่

[1*] Saichon Sithipong and [2#]Bacha Koontragool

[1*] Department of Automotive Technology, Faculty of Engineering and Technology, North-Chiang Mai University

[2#] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, North-Chiang Mai University

[*]saichon@northcm.ac.th, [#]bancha@northcm.ac.th

Received: January 8, 2024

Revised: July 15, 2024

Accepted: October 10, 2024

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ได้นำเสนอผลลัพธ์ของการหาค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นโดยใช้ลูกตุ้มแท่งกลมที่มีคาบน้อยที่สุดเป็นมาตรความโน้มถ่วง โดยการศึกษาใช้ลูกตุ้มแท่งกลมที่มีความยาวแตกต่างกันจำนวน 5 แท่ง ทดลอง ณ ตำแหน่งตั้งที่เส้นรุ้ง 18°39’43’’ N และอยู่ที่ระดับความสูง 300 m AMSL ผลลัพธ์จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าโดยใช้การจับเวลาในการแกว่งของลูกตุ้มจำนวน 100 รอบ โดยใช้มุมเริ่มต้นไม่เกิน 2° จำนวน 12 ซ้ำ จะได้ค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นจากการทดลองด้วยลูกตุ้มแบบแท่งกลมที่มีคาบน้อยที่สุดเป็น 9.800 ± 0.008 m/s^2 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับค่าคำนวณ 9.7847 m/s^2 ประมาณ 0.2 %

คำสำคัญ: การวัดความโน้มถ่วง, มาตรความโน้มถ่วง, ลูกตุ้มแบบแท่งกลมที่มีคาบน้อยที่สุด

Abstract

In this paper, the results of determination of the local gravity by using the minimized period rod pendulums as the gravimeter have been presented. The studying used five rod pendulums of different lengths and test at a location that has the latitude of 18°39’43’’ N and elevation of 300 meters above MSL. Results from this study indicated that, by 12 trials of timing of 100 oscillation cycles of the rod pendulums with the initial angular amplitude less than 2°, the experimental local gravity obtained from the minimized period rod pendulum was 9.800 ± 0.008 m/s^2. Compared with the calculated local gravity, 9.7847 m/s^2, the error was 0.2 %, approximately.

Keywords: Gravity measurement, Gravimeter, Minimized period of rod pendulum

1. บทนำ

งานทางด้านการทดลองทางวิศวกรรมที่ละเอียดอ่อนต้องการค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่น (Local gravity) ที่แท้จริง ไม่สามารถใช้ค่ามาตรฐานเท่ากับ 9.81 m/s^2 เพราะจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนออกไปจากความเป็นจริง เช่นในการทดลองต่างๆ เกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย (Simple harmonic motion) และการสั่นสะเทือนอย่างอิสระไม่มีการหน่วง การทดลองเกี่ยวกับลูกตุ้ม (Pendulum) ประเภทต่างๆ การคำนวณจะต้องใช้ค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นเสมอจึงจะได้ผลลัพธ์ที่เที่ยงตรง [1]

ค่าความโน้มถ่วงในแต่ละบริเวณจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง ตำแหน่งละติจูด ลักษณะทางธรณีวิทยา เป็นต้น สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติได้วัดค่าแรงโน้มถ่วงจำนวน 7 จุด ครอบคุมทุกภาคของประเทศไทย พบว่า บริเวณจังหวัดเชียงใหม่มีค่าแรงโน้มถ่วงประมาณ $9.784261950 \pm 0.39\times10^{-7}$ m/s^2 [2]

การหาค่าแรงโน้มถ่วงเคยมีการนำเสนอมาแล้วหลายวิธี การทดลองโดยใช้ลูกตุ้มอย่างง่าย (Simple pendulum) เพื่อเวลาเฉลี่ยของคาบการแกว่งที่สัมพันธ์กับความยาวของลูกตุ้มแล้วนำมาคำนวณหาค่าแรงโน้มถ่วง ยังมีปัจจัยที่ทำให้ผลลัพธ์เกิดคาดเคลื่อนได้ เช่น การหาจุดศูนย์ถ่วงอย่างละเอียดของลูกตุ้มนั้นทำได้ยาก มวลและความยืดหยุ่นของเส้นลวดก็มีผลต่อความยาวที่ใช้คำนวณ เป็นต้น [3] การทดลองโดยใช้ลูกตุ้มประกอบ (Compound pendulum) หรือ (Physical pendulum) เป็นการทดลองที่ทำได้ง่าย สามารถลดข้อจำกัดหลายอย่างของลูกตุ้มอย่างง่ายและผลลัพธ์การหาค่าแรงโน้มถ่วงมีความน่าเชื่อถือได้ [4] การจับเวลาในการหาคาบ (Oscillation period) ของการแกว่งลูกตุ้มก็เพียง 10 รอบ และทำซ้ำ 5 ครั้ง การทดลองจำนวนซ้ำจำนวนน้อยนั้นจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าคาดเคลื่อนสูง [5] และในการหาค่าความคลาดเคลื่อน (Error) เป็นร้อยละก็ต้องเปรียบเทียบกับค่าความโน้มถ่วงมาตรฐาน g_0 แทนที่จะเป็นค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่น ณ สถานที่ทดลอง

ในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการหาค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นที่เที่ยงตรง มีวิธีการทดลองที่สามารถทำได้ง่าย ใช้เครื่องทดลองที่ไม่ซับซ้อน ราคาถูกและสร้างได้เองโดยใช้ลูกตุ้มประกอบแบบแท่งกลม (Rod pendulum) เป็นมาตรความโน้มถ่วง (Gravimeter) ซึ่งมีการกระจายมวลอย่างสม่ำเสมอและขนาดความยาวลดหลั่นกัน 5 แท่งทำการทดลองครั้งนี้

วัตถุประสงค์ของบทความนี้ต้องการนำเสนอวิธีการทดลองหาค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นและเปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณ ด้วยวิธีการกำหนดตำแหน่งของจุดรองรับให้เป็นลูกตุ้มแท่งกลมที่มีคาบน้อยที่สุด (Minimized period) และผลลัพธ์การทดลองต้องมีค่าคลาดเคลื่อน (Error) จากค่าคำนวณไม่เกิน 0.5 %

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 ทำการทดลองหาค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นด้วยลูกตุ้มแท่งกลมที่มีคาบน้อยที่สุด โดยใช้ลูกตุ้ม 5 แท่งความยาว 1299.20 mm, 1350.50 mm, 1399.50 mm, 1450.36 mmและ 1500.00 mm

2.2 เปรียบเทียบค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นจากการทดลองกับการค่าจากการคำนวณต้องมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.5 %

2.3 การทดลอง ณ มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่ อ.หางดง จ.เชียงใหม่ มีพิกัดอยู่ที่เส้นรุ้ง 18°39’34’’N และมีระดับความสูง 300 m AMSL

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ลูกตุ้มประกอบแบบทั่วไป

พิจารณาจุดศูนย์กลางการแกว่งของลูกตุ้มประกอบรูปที่ 1 ซึ่งแกว่งบนระนาบ X-Y ที่จุด O จุด G คือตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของลูกตุ้มประกอบ ให้ I_o เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยของมวลรอบจุด O ใช้การสมดุลทางพลศาสตร์จะได้:

$$\sum M = I_o\ddot{\theta} = -\ mgx\sin\theta$$

$$I_o\ddot{\theta} + mgx\sin\theta = 0$$

สำหรับการเปลี่ยนตำแหน่งเชิงมุมน้อยๆ $\sin\theta \cong \theta$ (มีหน่วยเป็น rad) ดังนั้น:

$$\ddot{\theta} + \frac{mgx}{I_o}\theta = 0$$

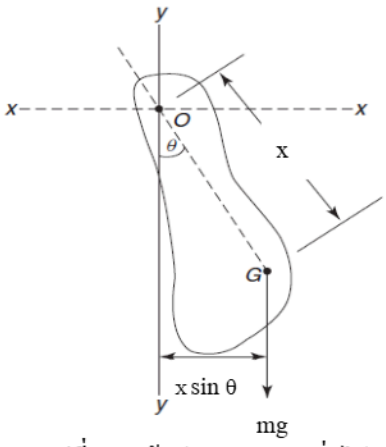
เมื่อเทียบสัมประสิทธิ์กับรูปแบบของสมการการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกเชิงเดียว, $\ddot{\theta} + \omega^2\theta = 0$, จะได้:

$$\omega = \sqrt{\frac{mgx}{I_O}} \tag{1}$$

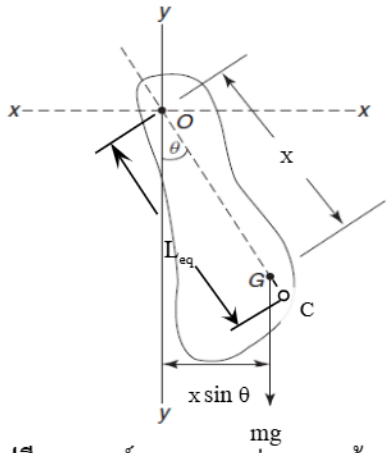
และมีคาบของการแกว่งเป็น [6]:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I_O}{mgx}} \tag{2}$$

เมื่อ T คือคาบเวลาการแกว่งของลูกตุ้ม, I_o คือโมเมนต์ความเฉื่อยของมวลบนระนาบ X-Y ที่จุด O และ x คือระยะทางจากจุดหมุนถึงจุดศูนย์กลางมวล



รูปที่ 1 ลูกตุ้มประกอบแบบทั่วไป



รูปที่ 2 จุดศูนย์กลางการแกว่งของลูกตุ้มประกอบ

จากทฤษฎีแกนขนาน จะได้:

$$I_O = I_G + mx^2 = mk_G^2 + mx^2$$

เมื่อ I_G คือโมเมนต์ความเฉื่อยของมวลบนระนาบ X-Y ที่จุด G และ k_G^2 คือรัศมีไจเรชัน (Radius of gyration) บนระนาบ X-Y ที่จุด G สมการ (2) จึงกลายเป็น:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{(k_G^2/x + x)}{g}} \tag{3}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับลูกตุ้มอย่างง่ายที่ยาว L_{eq} ซึ่งมีคาบ T เท่ากันกับลูกตุ้มประกอบ จะได้ [7], [8]:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L_{eq}}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{(k_G^2/x + x)}{g}} \tag{4}$$

โดย L_{eq} เป็นความยาวที่สมมูลกับลูกตุ้มอย่างง่ายและมวลทั้งหมดถือว่ามารวมกันเป็นจุดอยู่ที่จุด C ซึ่งเรียกว่าเป็นจุดศูนย์กลางการแกว่ง (Center of oscillation) รอบจุด O (ดูรูปที่ 2) โดย:

$$OC = L_{eq} = k_G^2/x + x \tag{5}$$

และเมื่อสลับให้จุด C เป็นจุดที่แขวนลูกตุ้มแทนจุด O, จุด O ก็จะกลายเป็นจุดศูนย์กลางการแกว่งรอบจุด C จัดรูปสมการ (5) ใหม่เป็น:

$$x^2 - L_{eq}x + k_G^2 = 0 \tag{6}$$

ซึ่งได้เป็นรูปแบบของสมการกำลังสองที่มีรากอยู่สองค่าคือ x_1 และ x_2 ในลักษณะที่:

$$x_1 + x_2 = L_{eq} \quad (7)$$

และ $$x_1 \cdot x_2 = k_G^2 \quad (8)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างคาบ T กับระยะห่าง x จากจุดศูนย์ถ่วงได้แสดงอยู่ในรูปที่ 3 เมื่อใช้จุด O เป็นจุดแขวนจะมีความยาวสองค่าที่มีคาบเท่ากัน คือ $GO_1 = x_1$ และ $GO_2 = x_2$ และเมื่อสลับจุดแขวนเป็นจุด C ก็จะมีอีกสองความยาวสองค่าที่มีคาบเท่ากัน คือ $GC_1 = x_1$ และ $GC_2 = x_2$

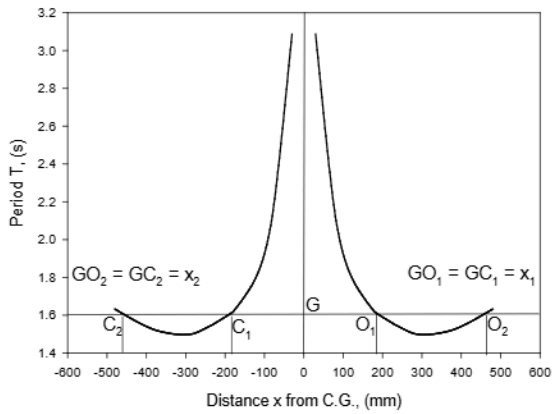
ระยะห่างที่จะทำให้มีคาบน้อยที่สุดจะหาได้จาก:

$$\frac{d}{dx}L = \frac{d}{x}(k_G^2 / x + x) = -k_G^2 / x^2 + 1 = 0$$

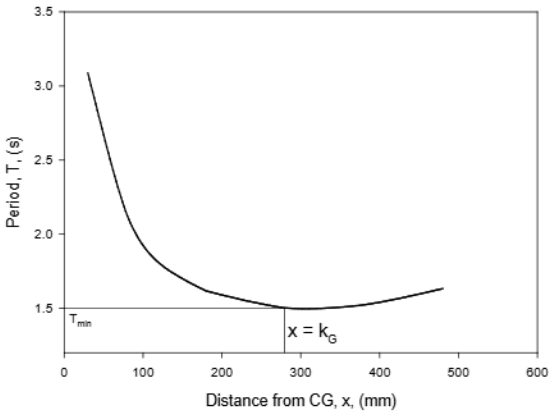
นั่นคือ $$x = k_G = x_{T_{min}} \quad (9)$$

และ $$T_{min} = 2\pi\sqrt{\frac{2k_G}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{2x_{T_{min}}}{g}} \quad (10)$$

โดย $k_G^2 = I_G/m$ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 คาบ T กับระยะห่าง x จากจุดศูนย์ถ่วง



รูปที่ 4 คาบ T_{min} กับระยะห่าง $x = k_G = x_{T_{min}}$ จากจุดศูนย์ถ่วง

3.2 ลูกตุ้มแบบแท่งแบบทั่วไป

พิจารณาลูกตุ้มประกอบแบบที่ง่ายที่สุดคือลูกตุ้มแบบแท่ง (Rod หรือ stick หรือ bar pendulum ตามหน้าตัด) ซึ่งแขวนในตำแหน่งที่จุดศูนย์ถ่วงอยู่ห่างจากจุดรองรับเป็นระยะทาง x ใดๆ (รูปที่ 5)

แทนค่า $I_O = mL^2/12 + mx^2$ ลงในสมการ (2) ได้:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{mL^2/12 + mx^2}{mgx}} = 2\pi\sqrt{\frac{L^2/12 + x^2}{gx}} \quad (11)$$

รูปที่ 5 ลูกตุ้มแบบแท่ง

จะเห็นได้ว่าในกรณีของลูกตุ้มประกอบรูปแบบที่ง่ายที่สุด คือเป็นแท่งความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังสองของคาบ (T^2) ไม่ได้เป็นปฏิภาคกับความยาว L เหมือนกับกรณีของลูกตุ้มอย่างง่าย แต่จะขึ้นอยู่กับระยะห่าง x ระหว่างจุดศูนย์ถ่วงกับจุดรองรับแทน ซึ่งทำให้การนำลูกตุ้มประกอบมาใช้เป็นมาตรความโน้มถ่วงมีความซับซ้อนมากกว่าลูกตุ้มอย่างง่าย

ยกกำลังสองสมการ (11) แล้วจัดรูปสมการเพื่อหาค่า x ได้:

$$x^2 - g\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 x + \frac{L^2}{12} = 0 \qquad (12)$$

ซึ่งเป็นสมการกำลังสองที่มีรูปแบบมาตรฐานเป็น:

$$ax^2 + bx + c = 0$$

และจะหารากได้จาก:

$$x = \frac{-b^2 \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

ในกรณีนี้ $a = 1, b = -g[T/(2\pi)]^2, c = L^2/12$, ดังนั้น:

$$x = \frac{g[T/(2\pi)]^2 \pm \sqrt{(g[T/(2\pi)]^2)^2 - 4(L^2/12)}}{2} \qquad (13)$$

การแก้สมการ (13) จำเป็นต้องใช้ค่าของ g , L และ T ซึ่งมีวิธีการทางคณิตศาสตร์ในการแก้สมการนี้ได้หลายวิธี

การใช้ลูกตุ้มแท่งเป็นมาตรความโน้มถ่วงสามารถจำแนกได้เป็นสองวิธี คือ*วิธีดั้งเดิม (Classical method)* กับ*วิธีใหม่ (Novel method)*

วิธีดั้งเดิม ไม่ใช้การแก้สมการ (13) แต่ทดลองโดยกำหนดค่า x แล้วหาค่าของ d จากความยาวของลูกตุ้มแท่งซึ่งมีค่าคงที่

วิธีใหม่ ใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้สมการ (13) เพื่อนำไปสู่การหาค่าความโน้มถ่วงในขั้นต่อไป

ในบทความนี้จะนำเสนอวิธีใหม่ด้วยการกำหนดระยะ $x = x_{T_{min}}$ ซึ่งเป็นระยะที่จะทำให้มีคาบน้อยที่สุด (Minimized period) เพียงวิธีเดียวเท่านั้น

พิจารณาในกรณีเฉพาะที่ x เป็นระยะซึ่งจะทำให้มีคาบน้อยที่สุด ซึ่งจะหาได้จาก:

$$\frac{d}{dx}\left[\frac{L^2/12 + x^2}{gx}\right] = \frac{d}{dx}\left[\frac{L^2 + 12x^2}{12gx}\right] = 0$$

จะได้:

$$x_{T_{min}} = L/\sqrt{12} = L/(2\sqrt{3}) \qquad (14)$$

ซึ่งได้ผลลัพธ์เหมือนกับสมการ (9)เพื่อใช้ลูกตุ้มแท่งเป็นมาตรความโน้มถ่วง ปรับสมการ (10) เป็น:

$$g = 4\pi^2\left(\frac{2x_{T_{min}}}{T_{min}^2}\right)$$

เมื่อแทนค่าค่า $2x_{T_{min}} = L/\sqrt{3}$, จะได้:

$$g = \frac{4\pi^2}{\sqrt{3}}\left(\frac{L}{T_{min}^2}\right) \qquad (15)$$

ลูกตุ้มแท่งในวิธีนี้เรียกได้ว่าเป็น *ลูกตุ้มแท่งที่มีคาบน้อยที่สุด*

จากการวิเคราะห์ข้างต้นทำให้เกิดแนวคิดในการหาค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่น g ด้วยลูกตุ้มแท่งที่มีคาบน้อยที่สุดได้ 3 วิธี คือ:

1. เนื่องจากอัตราส่วน L กับ T_{min}^2 มีค่าคงที่ การคำนวณสามารถทำได้โดยนำลูกตุ้มแท่งที่มีคาบน้อยที่สุดหนึ่งแท่ง ความยาวเดียวมาแกว่ง แล้วจับเวลาหาคาบในการแกว่งก็จะสามารถหาค่า g ได้จากสมการ (15) คือ:

$$g = \frac{4\pi^2}{\sqrt{3}}\frac{L}{T_{min}^2}$$

แม้ว่าทางทฤษฎีจะได้ค่า g ที่เที่ยงตรงจากวิธีการนี้ แต่ในทางปฏิบัตินั้นแทบจะเป็นไปไม่ได้ วิธีที่เป็นไปได้คือควรจะต้องทำหลายซ้ำ

2. นำลูกตุ้มแท่งที่มีคาบน้อยที่สุดหลายแท่งและความยาวลดหลั่นกัน มาแกว่งทีละแท่งแล้วจับเวลาเพื่อหาคาบในการแกว่งเช่นเดียวกับวิธีที่ 1 แล้วคำนวณหาค่า g จากค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน L/T^2_{min} คือ:

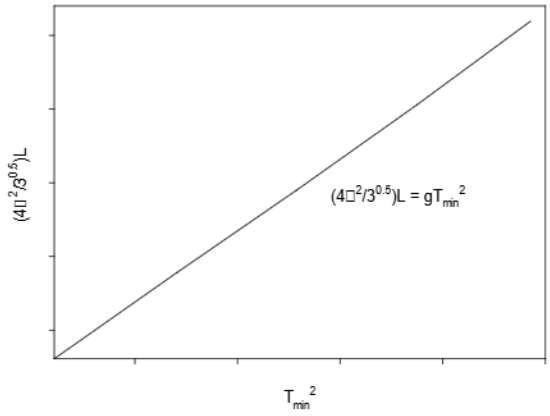
$$g = \frac{4\pi^2}{\sqrt{3}}\left(\frac{L}{T^2_{min}}\right)_{Av} \qquad (15a)$$

วิธีการนี้ก็คือการทำตามวิธีที่ 1 ซ้ำหลายครั้งโดยแปรเปลี่ยนค่าความยาวของลูกตุ้มแบบแท่งจึงจะได้ค่า g จากวิธีที่ 2 ก็คือค่าเฉลี่ยของการทดลองหลายครั้ง

3. นำค่าของ $(4\pi^2/\sqrt{3})L$ และ T^2_{min} จากการทดลองของวิธีที่ 2 มาทำเป็นกราฟดังรูปที่ 6 ค่า g หาได้จากค่าความชันของเส้นกราฟโดยตรง เพราะว่า:

$$g = \frac{4\pi^2}{\sqrt{3}}\frac{\Delta L}{\Delta T^2_{min}} \qquad (15b)$$

วิธีที่ 3 ควรได้ผลลัพธ์เท่ากับวิธีที่ 2 เพราะเป็นการหาจากค่าเฉลี่ยเหมือนกันแต่เป็นวิธีทางกราฟ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(4\pi^2/\sqrt{3})L$ กับ T^2_{min} ของลูกตุ้มแท่งที่มีคาบน้อยที่สุด

จะสังเกตจากสมการ (15), (15a) และ (15b) ได้ว่าการหาค่าความโน้มถ่วงวิธีนี้ สิ่งที่ต้องวัดมีเพียงระยะ d จากปลายของลูกตุ้มแท่งถึงจุดรองรับ (รูปที่ 7) และคาบในการแกว่งของลูกตุ้มแท่งแต่ละความยาวเท่านั้น

ในบทความนี้จะให้ความสำคัญกับวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 เนื่องจากวิธีที่ 1 เป็นส่วนหนึ่งของวิธีที่ 2 อยู่แล้ว เนื่องจากต้องใช้ค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นทางทฤษฎีเพื่อการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง ค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นทางทฤษฎีจะคำนวณหาได้จากสมการ International Gravity Formula 1967 ที่ยอมรับมานานและให้ผลลัทธ์แม่นยำ [9], [10]:

$$g(\phi, h) = 9.780\ 318\ 4\ (1+5.3024\times 10^{-3}\sin^2\phi\ -\ 5.9\times 10^{-6}\sin^2 2\phi\ ) - 3.086\times 10^{-6}\,h \qquad (16)$$

เมื่อ ϕ คือ องศาเส้นละติจูดทางภูมิศาสตร์ และ h คือ ระดับความสูงเหนือน้ำทะเลปานกลาง, มีหน่วยเป็น m AMSL

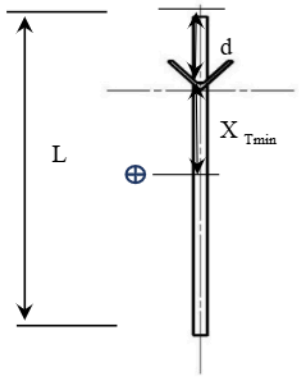
4. การดำเนินการวิจัย

สถานที่ทำการทดลอง ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่ อ.หางดง จ.เชียงใหม่ มีพิกัดอยู่ที่เส้นรุ้ง $18^{O}39'34''N$ และมีระดับความสูง 300 m AMSL เมื่อแทนค่า ϕ และ h ของสถานที่ทดลองลงในสมการ (16) ก็จะได้ค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นซึ่งจากการคำนวณและใช้เป็นความโน้มถ่วงอ้างอิง [10]:

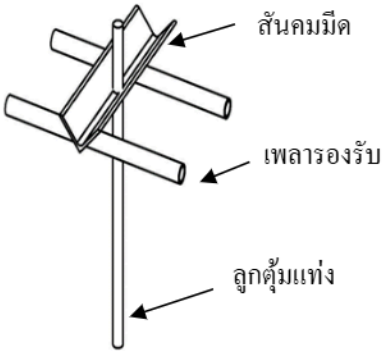
$$g\ (18.66^{\circ}, 300\ m) = 9.784\ 681\ 227\ m/s^2 \cong 9.7847\ m/s^2 = g_{Cal}$$

4.1 อุปกรณ์ทดลอง

เครื่องทดลองมาตรความโน้มถ่วงใช้หลักการของลูกตุ้มแท่งกลมและอุปกรณ์ แสดงดังรูปที่ 7-8:



รูปที่ 7 ระยะห่างจากปลายถึงจุดหมุนของลูกตุ้ม



รูปที่ 8 โครงสร้างชุดทดลองลูกตุ้มแบบแท่ง

1. ลูกตุ้มแบบแท่งสร้างจากเหล็กแท่งเกลียวเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm มีความยาวแตกต่างกัน 5 แท่ง ใช้ทดลองเป็นลูกตุ้มแท่งที่มีคาบน้อยที่สุด กำหนดระยะห่างจากปลายถึงจุดรองรับ ดังรูปที่ 7 และแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งคำนวณจาก $d = L/2 - x_{T_{min}}$ โดย $x_{T_{min}} = L/(2\sqrt{3})$ การวัดความยาวของแท่งเกลียวใช้บรรทัดโลหะที่มีค่าละเอียดที่สุด (Least count) 1 mm ร่วมกับเวอร์เนียคาลิปเปอร์ที่มีค่าละเอียดที่สุด 0.02 mm
2. สันคมมีด (Knife-edge support) ทำจากเหล็กฉากขนาด 25.4 × 25.4 mm หนา 1.5 mm มีความยาว 80 mm มีแป้นเกลียวเชื่อมติดกับสันเหล็กฉากที่ถูกเจาะทะลุ เพื่อให้เมื่อสวมกับแท่งเกลียวแล้วปลายแท่งเกลียวสามารถสอดผ่านเหล็กฉากขึ้นไปได้ ดังรูปที่ 8 ระยะ d วัดจากปลายบนของลูกตุ้มแท่งถึงสันเหล็กฉาก (ซึ่งเป็นจุดรองรับ) สันคมมีดจะถูกรองรับด้วยเพลาเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm สองท่อนซึ่งยึดอยู่กับโครงรองรับ
3. นาฬิกาจับเวลาที่มีค่าละเอียดที่สุด 0.01 วินาที

ตารางที่ 1 ระยะห่างจากปลายถึงจุดหมุนของลูกตุ้มแท่งที่มีคาบน้อยที่สุด (หน่วยเป็น mm)

L	1299.20	1350.50	1399.50	1450.36	1500.00
$x_{T_{min}}$	375.05	389.86	404.00	418.68	433.01
d	274.55	285.39	295.75	306.50	316.99

4.2 วิธีทดลอง

1. นำลูกตุ้มแท่งแรกที่ยาว 1299.20 mm มาใส่สันคมมีดให้อยู่ห่างจากปลายเป็นระยะ 274.55 mm แล้วนำลูกตุ้มแท่งที่ใส่สันคมมีดแล้วไปวางบนเพลารองรับ (Support shaft)
2. จับลูกตุ้มแท่งให้เบนออกจากตำแหน่งสมดุลสถิต (Static equilibrium) เป็นมุมไม่เกิน 2 องศาจากแนวดิ่ง เพื่อให้การทดลองเป็น Small oscillation เพื่อลดการสั่น การหน่วง หรือแรงต้านอื่นๆ ที่มาจากปัจจัยภายนอก จากนั้นจึงปล่อยลูกตุ้มแท่งให้แกว่งได้อย่างอิสระ ควบคุมการแกว่งของลูกตุ้มให้อยู่ในบนระนาบในแนวดิ่ง จับเวลาการแกว่งจำ 100 รอบ แล้วจดบันทึกเวลา โดยทำซ้ำทั้งหมด 12 ครั้ง
3. เปลี่ยนเป็นลูกตุ้มแท่งที่ยาว 1350.50 mm และตั้งระยะห่างระหว่างปลายกับสันคมมีดเป็น 285.39 mm แล้วทดลองซ้ำตามขั้นตอนถัดต่อมามาจนเสร็จการทดลองครบทั้งห้าแท่ง ได้ข้อมูลทั้งหมดดังแสดงไว้ในตารางที่ 2

5. ผลการวิจัย

ผลการทดลองหาค่าเวลาการแกว่งของลูกตุ้มมีคาบน้อยที่สุด ที่มีขนาดความยาวแตกต่างกัน 5 แท่ง และจำนวนรอบการแกว่ง 100 รอบ ทดลองซ้ำ 12 ครั้ง

ตารางที่ 2 ข้อมูลของลูกตุ้มแท่งกลมที่มีคาบน้อยที่สุด

ครั้งที่	เวลาในการแกว่งครบ 100 รอบ ($100T_{min}$, s) ที่ความยาวต่างๆ				
	1299.20	1350.50	1399.50	1450.36	1500.00
1	173.91	177.28	180.50	183.75	186.72
2	173.78	177.35	180.37	183.72	186.78
3	173.85	177.13	180.31	183.66	186.69
4	173.88	177.43	180.59	183.66	186.75
5	173.84	177.25	180.59	183.78	186.68
6	173.78	177.16	180.50	183.62	186.66
7	173.81	177.13	180.47	183.81	186.62
8	173.82	177.36	180.54	183.69	186.72
9	173.84	177.31	180.44	183.69	186.63
10	173.75	177.06	180.44	183.65	186.78
11	173.80	177.16	180.50	183.78	186.69
12	173.79	177.16	180.56	183.69	186.59
เฉลี่ย	173.82	177.23	180.48	183.71	186.69

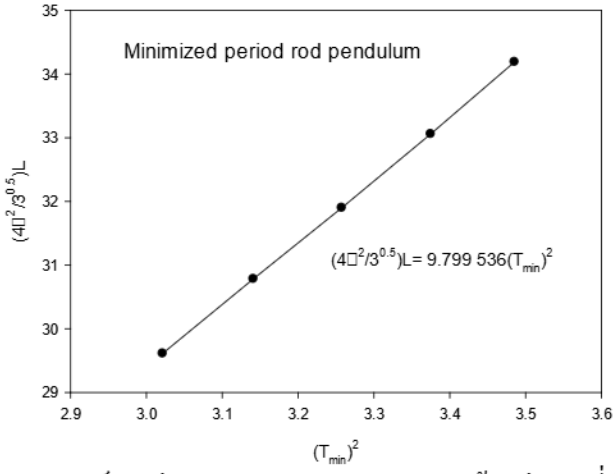
เมื่อได้ผลการทดลองจากความสัมพันธ์ของความยาวของลูกตุ้มแท่งกลมที่มีคาบน้อยที่สุดกับเวลาในการแกว่ง สามารถนำไปคำนวณหาค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นของลูกตุ้มความยาวต่างๆ ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์ของลูกตุ้มแท่งกลมที่มีคาบน้อยที่สุด

L (m)	$(4\pi^2/3^{0.5})$L (m)	T_{min}^2 (s^2)	$(4\pi^2/3^{0.5})L/T_{min}^2$ (m/s^2)
1.29920	29.6125	3.0214	9.801 024
1.35050	30.7818	3.1411	9.799 661
1.39950	31.8986	3.2575	9.792 505
1.45035	33.0576	3.3749	9.795 220
1.50000	34.1893	3.4854	9.809 269
		เฉลี่ย	9.7995

ผลลัพธ์การทดลองของลูกตุ้มแท่งกลมที่มีคาบน้อยที่สุดได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้:

นำความยาวของลูกตุ้มแท่งจากตารางที่ 2 มาใส่ในคอลัมน์แรก คูณด้วย $4\pi^2/3^{0.5}$ แล้วใส่ผลลัพธ์ไว้ในคอลัมน์ที่ 2 คำนวณหา T_{min}^2 ในคอลัมน์ที่ 3 โดยหารเวลาเฉลี่ย (แถวสุดท้ายของตารางที่ 2) ด้วย 100 แล้วยกกำลังสอง จากนั้นคำนวณหาค่าอัตราส่วน $(4\pi^2/3^{0.5})L/T_{min}^2$ ในคอลัมน์ที่ 4 โดยหารคอลัมน์ที่สองด้วยคอลัมน์ที่สาม แล้วหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วน $(4\pi^2/3^{0.5})L/T_{min}^2$ ได้ $[(4\pi^2/3^{0.5})L/T_{min}^2]_{Av} = 9.799\ 536\ m/s^2 \cong 9.7995\ m/s^2 = g_{Av}$ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(4\pi^2/3^{0.5})L$ กับ T_{min}^2 ของลูกตุ้มแท่งกลมที่มีคาบน้อยที่สุด

เมื่อนำค่าของ $(4\pi^2/3^{0.5})L$ กับ T_{min}^2 จากตารางที่ 3 ซึ่งเป็นผลการทดลองของลูกตุ้มที่ความยาวลดหลั่นกัน 5 แท่ง มาพล็อตเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(4\pi^2/3^{0.5})L$ กับ T_{min}^2 ก็จะได้กราฟเส้นตรงในรูปที่ 9 มีค่าความชันของเส้นกราฟเป็น $(4\pi^2/3^{0.5})\,\Delta L/\Delta T_{min}^2 \cong 9.7997\ m/s^2 = g_{Gr}$ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยแรงโน้มถ่วงท้องถิ่นของลูกตุ้มแท่งกลมที่มีคาบน้อยที่สุดของทุกความยาวลูกตุ้ม สามารถคำนวณจากสมการที่ 15(a) และ 15(b) และการพล็อตกราฟ โดยพบว่า มีค่าต่างจากค่าของ g_{Av} เพียง 0.002% ดังนั้นค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นที่ได้จากค่าเฉลี่ยในตารางที่ 3 กับค่าความชันในรูปที่ 9 จึงมีค่าเท่ากันโดยประมาณเป็น:

$$g_{Gr} = g_{Av} \cong 9.8\ m/s^2 = g_{Exp}$$

โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าคำนวณ,

$$g_{Cal} = 9.7847\ m/s^2$$

%Error = ABS (9.8 / 9.7847 - 1)100 = 0.1564 หรือประมาณ 0.2%

ในการทดลองนี้ความคลาดเคลื่อนที่สำคัญมีสาเหตุได้จากการวัดความยาวของลูกตุ้มแท่งและการจับเวลาในการหาคาบของการแกว่ง

การวัดความยาววัดโดยเทียบกับแท่งเกลียวที่มีความยาวเต็มจากผู้ผลิต คือยาว 1500 mm โดยนำแท่งที่ถูกตัดกับไม่ถูกตัดมาวางขนานจัดปลายที่ไม่ถูกตัดของทั้งสองแท่งเสมอกัน แล้วใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์วัดจากปลายอีกข้างหนึ่งของแท่งที่ไม่ถูกตัดถึงปลายของแท่งที่ถูกตัด โดยวัดหลายครั้งแล้วเลือกใช้ค่าความยาวที่ซ้ำกันมากที่สุด และการตั้งระยะ d ก็ใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์เช่นกัน

ในการทดลองหาค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นโดยใช้ลูกตุ้มแท่งกลมเป็นมาตรความโน้มถ่วงนั้น มีความเป็นไปได้ที่จะได้ผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงเป็นที่ยอมรับได้ โดยควรจะต้องทำการทดลองด้วยลูกตุ้มแท่งซึ่งมีการวัดความยาวที่เที่ยงตรง ใช้มุมเริ่มต้นการแกว่งน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และควรจะใช้จำนวนรอบในการจับเวลาแต่ละซ้ำมากเพียงพอ

ส่วนความคลาดเคลื่อนในการจับเวลา สิ่งที่สำคัญก็คือเวลาปฏิกิริยา (Human reaction time) ซึ่งเกิดขึ้นสองครั้งในตอนเริ่มต้นการจับเวลาและตอนหยุดการจับเวลา ในการทดลองนี้ใช้จำนวนรอบในการจับเวลาแต่ละซ้ำจำนวน 100 รอบ ซึ่งสามารถช่วยลดความคลาดเคลื่อนของเวลาได้ และได้ทำถึง 12 ซ้ำ จึงควรเป็นการดึงข้อมูลเข้าสู่ค่ากลางที่ละเอียดเพียงพอ

เมื่อพิจารณาความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของผลลัพธ์ในตารางที่ 3 จะได้ความไม่แน่นอนสัมบูรณ์ (Absolute uncertainty) มีค่าเป็น (9.809 269 - 9.792 505)/2 = $\pm$ 0.008 m/s^2 ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากลูกตุ้มแท่งกลมที่มีคาบน้อยที่สุดจึงควรเป็น $g_{Exp} = 9.800 \pm 0.008$ m/s^2

6. สรุป

ในการทดลองนี้ ได้ใช้ลูกตุ้มแท่งกลมที่มีความยาวลดหลั่นกันประมาณ 50 mm จำนวน 5 แท่ง, ใช้มุมแกว่งเริ่มต้นไม่เกิน 2 องศา, จับเวลาการแกว่ง 100 รอบ, และแต่ละแท่งจับเวลา 12 ซ้ำ

ผลลัพธ์จากการศึกษานี้ แสดงให้เห็นว่าการทดลองด้วยลูกตุ้มแท่งกลมที่มีคาบน้อยที่สุดทั้งวิธีหาจากค่าเฉลี่ยและวิธีหาจากค่าความชันของเส้นกราฟ ได้ค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่นเท่ากันมีค่าเท่ากับ 9.8 m/s^2 และเมื่อพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ ค่าความโน้มถ่วงที่ได้ควรจะเป็นเท่ากับ 9.800 ± 0.008 m/s^2 โดยมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณประมาณ 0.2% และผลลัพธ์จากการทดลองของลูกตุ้มแท่งที่มีคาบน้อยที่สุดบรรลุตามเป้าประสงค์มีค่าคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.5 % ตามที่ตั้งไว้

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 การวัดค่าความยาวของแท่งเหล็กที่นำมาเป็นลูกตุ้มในการทดลอง ควรให้เครื่องวัดที่มีความละเอียดสูงและทำการวัดความยาวตลอดแท่งให้ได้ค่าความยาวที่แท้จริง เพื่อลดค่าคาดเคลื่อนจากการคำนวณที่ต้องใช้ค่าความยาวของแท่งลูกตุ้ม

7.2 การวิจัยในอนาคตควรสร้างหรือจัดหาเครื่องมือจับเวลาพร้อมกับนับรอบการแกว่งของลูกตุ้ม เพื่อให้ได้ค่าเวลาการแกว่งที่แม่นยำและลดความคลาดเคลื่อนจากปฏิกิริยาตอบสนองของมนุษย์

8. เอกสารอ้างอิง

[1] ณภาคม ศรีคช, สายชล สิทธิพงศ์, และบัญชา ค้งตระกูล. (2564). การหาค่าความเร่งจากความโน้มถ่วงท้องถิ่นด้วยลูกตุ้มเดี่ยว. ในการประชุมวิชาการระดับชาติพะเยาวิจัย ครั้งที่ 13. (2593-2604). 25-28 ธันวาคม 2564. พะเยา: มหาวิทยาลัยพะเยา.

[2] ทัศนีย์ ไพรรื่นรมย์ และณัฐนันท์ วรเดช. (2023). การวัดความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกในประเทศไทย และความสำคัญ. สืบค้น 17 ธันวาคม 2566, จาก: https://www.nimt.or.th/main/?p=21307.

[3] Nelson, R.A., Olsson, M.G,. (1986). The pendulum-Rich physics from a simple system. *American Journal of Physics*. 54(2): 112-121.

[4] Yuningsih, N., Sardjito, S., & Dewi, Y. C. (2020). Determination of earth's gravitational acceleration and moment of inertia of rigid body using physical pendulum experiments. Retrieved on December 17, 2023. from: doi:10.1088/1757-899X/830/2/022001

[5] Suwanpayak, N., Sutthiyan, S., Kulsirirat, K., Srisongkram, P., Teeka, C., & Buranasiri, P. (2018). A comparison of gravitational acceleration measurement methods for undergraduate experiment. Retrieved on December 17, 2023. from: doi:10.1088/1742-6596/1144/1/012001.

[6] Beer, F.P, Johnston, E.R, & Conwell, P.J. (2010). **Vector Mechanics for Engineers: Dynamics**. 9th ed. London: McGraw-Hill

[7] Serway, R.A., & Jewett, J.W. (2012). **Physics for scientists and engineers with modern Physics**. 9th ed. Boston: Brooks/Cole.

[8] Young, H., & Freeman, R. (2004). **University physics with Modern Physics**. 11th ed. Boston: Addison Wesley.

[9] Encyclopedia. (2022). Normal Gravity Formula. Retrieved on January 8, 2024. from: https://encyclopedia.pub/entry/33797

[10] บัญชา ค้งตระกูล และสายชล สิทธิพงศ์. (2566). การสืบค้นหาสูตรการคำนวณค่าความโน้มถ่วงท้องถิ่น. *วารสารวิชาการโรงเรียนนายเรือด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 6(1): 161-173.

การออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุฉนวนสุญญากาศ พิกัดการวัดสูงสุด 200 กิโลโวลต์

Design and Creation of a Voltage Divider with a Vacuum-Insulated Capacitor Type for Maximum Peak Measurement of 200 Kilovolts.

[1*]ไตรรัตน์ ปะทิ

[1]สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

[1*]**Trirath Pati**

[1]Department of Electrical Power Engineering Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna

[*]TRP_OFF@RMUTL.ac.th

Received: September 22, 2023

Revised: September 16, 2024

Accepted: October 14, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุขนาดพิกัด 200 กิโลโวลต์ ฉนวนแบบสุญญากาศ มีอัตราส่วนในการลดทอนแรงดันคือ 1000:1 ใช้ตัวเก็บประจุย่อยชนิดโพลีพรอพีลีนฟิล์มที่สามารถทนแรงดันและอุณหภูมิได้สูง ภาคแรงดันสูงใช้ตัวเก็บประจุย่อยขนาด 47 นาโนฟารัด นำมาต่อกันเพื่อให้มีค่าความจุไฟฟ้ารวม 97.91 พิโกฟารัด บรรจุภายในฉนวนทำจากวัสดุพีวีซีทรงกระบอกและฉนวนภายในด้วยการทำสุญญากาศ ภาคแรงดันต่ำใช้ตัวเก็บประจุชนิดเดียวกันมาต่อผสมกัน มีค่าความจุไฟฟ้ารวม 97.92 นาโนฟารัด ซึ่งการออกแบบและทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC60060-2 (2010)

ผลการทดลองพบว่าการจำลองการทำงานโดยโปรแกรมMatlab/Simulink ป้อนแรงดันขาเข้าที่ 200 กิโลโวลต์ แรงดันขาออกที่ 200 โวลต์ ตามที่ได้คำนวณออกแบบไว้ นำไปใช้ในการทดสอบวัดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับจริงในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ผลการทดสอบวัดเปรียบเทียบที่ระดับแรงดัน 100 kV_{rms} ได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน0.059 และค่าแรงดันที่ได้จากการวัดของระบบวัดในแต่ละครั้งมีค่าแรงดันแตกต่างจากระบบวัดอ้างอิงไม่เกิน ±1% ฉะนั้นโวลเตจดิไวเดอร์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นจัดอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

คำสำคัญ: ไฟฟ้าแรงสูง, ฉนวนสุญญากาศ, การวัดแรงดันสูง

Abstract

This research presents the design and create of a voltage divider utilizing vacuum-insulated capacitors for measuring peak voltages up to 200 kilovolts. The divider achieves a voltage reduction ratio of 1000:1 by employing polypropylene film sub-capacitors, which are capable of withstanding high voltages and temperatures. In the high-voltage section, sub-capacitors with a nominal value of 47 nanofarads are connected in series to provide a total capacitance of 97.91 picofarads. This assembly is encapsulated in a thick-walled PVC cylindrical housing

and insulated using a vacuum. The low-voltage section uses the same type of sub-capacitors connected in parallel, resulting in a total capacitance of 97.92 nanofarads. The design and testing comply with the IEC 60060-2 (2010) standard.

Experimental results demonstrated that simulations using Matlab/ Simulink software, with an input voltage of 200 kilovolts and an output voltage of 200 volts, were consistent with the designed 1000: 1 voltage reduction ratio. This configuration was then used for actual high-voltage AC measurements in a high-voltage electrical laboratory. Comparative measurements at a voltage level of 100 kVrms showed a deviation from the standard of 0.000594, with measured values differing from the reference system by no more than ±1. Consequently, the designed and constructed voltage divider meets the specified standards.

Keywords: voltage divider, capacitors, measurements, vacuum-insulated

1. บทนำ

อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูงต้องผ่านการทดสอบความทนทานต่อแรงดันตามมาตรฐานที่กำหนด เพื่อรับรองคุณภาพและความปลอดภัยในการใช้งานจริง การทดสอบอุปกรณ์เหล่านี้จะต้องดำเนินการในห้องปฏิบัติการที่มีเครื่องมือวัดที่แม่นยำเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่เชื่อถือได้ นอกจากนี้ ยังต้องมีการควบคุมความปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงานอย่างเคร่งครัด โวลเตจดิไวเดอร์ถือเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งต้องมีการทดสอบหลังจากกระบวนการผลิตเพื่อตรวจสอบคุณภาพของอุปกรณ์ โดยทั่วไปแล้วเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบอาจต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาที่สูงและจุดคุมทุนต่ำมากหากนำไปใช้เฉพาะด้านการศึกษา

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุที่มีพิกัดวัดแรงดันได้สูงสุด 200 kV สำหรับการวัดแรงดันกระแสสลับ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ประกอบการเรียนภาคปฏิบัติการด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง การวิจัยในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน รวมไปถึงช่วยเสริมสร้างความเข้าใจในกระบวนการทำเครื่องมือวัดและการทดสอบด้วยไฟฟ้าแรงสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ขอบเขตงานวิจัย

ออกแบบและสร้างสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุย่อยต่ออันดับสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับซึ่งใช้ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์แบ่งแรงดันไฟฟ้าทั้งภาคแรงดันสูงและภาคแรงดันต่ำ โดยคำนวณค่าคาปาซิเตอร์ให้เป็นอิมพีแดนซ์ในวงจรแล้วจำลองผลการออกแบบวงจรด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink การฉนวนอุปกรณ์ด้วยสุญญากาศโดยใช้การทำสุญญากาศออกจากภายในฉนวนบรรจุอิมพีแดนซ์แบ่งแรงดัน ซึ่งสามารถดูค่าแรงดันได้จาก Bourdon Gauge

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวัดไฟฟ้าแรงดันสูงๆมีข้อแตกต่างจากการวัดไฟฟ้าแรงดันต่ำคืออุปกรณ์ตัวชี้ค่าและผู้วัดค่าจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ต้องการวัดมากพอที่จะไม่เกิดอันตราย จะต้องอาศัยการฉนวนที่ถูกต้องเหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันที่จะวัดถ้าแรงดันสูงมากขึ้นระยะการฉนวนและระยะห่างของผู้วัดจะต้องมากขึ้น การวัดแรงดันสูงจึงต้องใช้เทคนิคพิเศษบางประการ

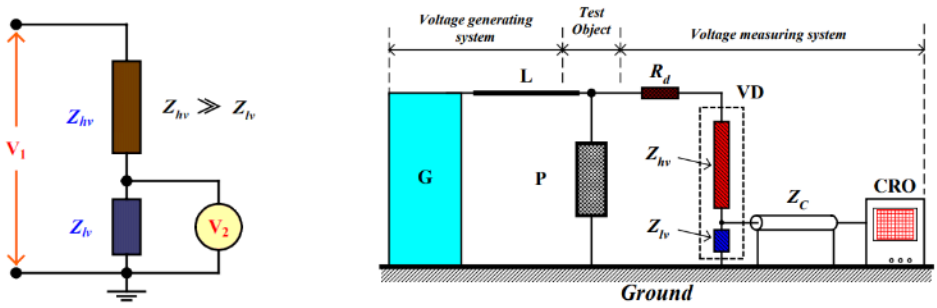
โดยอาศัยอุปกรณ์และเครื่องวัดช่วยลักษณะสมบัติที่ต้องการของอุปกรณ์และเครื่องวัดที่สำคัญได้แก่ ความถูกต้องเที่ยงตรงและความไวต่อสัญญาณที่ต้องการวัด, ความเชื่อถือได้, ขีดความสามารถของเครื่องวัด รวมถึงความเร็วของเครื่องวัดที่จะติดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน [1] [2] เทคนิคการวัดแรงดันสูงขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ แรงดันกระแสสลับ แรงดันกระแสตรง และแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งสองชนิดหลังนี้มักจะหมายถึงแรงดันที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการทดลองส่วนชนิดแรกคือแรงดันกระแสสลับนั้นจะมีการวัดทั้งภายในห้องปฏิบัติการและในระบบส่งจ่าย การวัดแรงดันกระแสสลับภายในห้องปฏิบัติการอาจวัดได้ด้วยวิธีต่อไปนี้ คือ 1) โวลต์มิเตอร์แบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic voltmeter) 2) แกปทรงกลม (sphere gap) 3) อิมพีแดนซ์ต่ออันดับ (series impedance) 4) โวลเตจดิไวเดอร์ (voltage divider)

โวลเตจดิไวเดอร์เป็นอุปกรณ์วัดแรงดันทำหน้าที่แบ่งทอนแรงดันสูงๆ ออกเป็นส่วนแรงดันต่ำพอที่จะใช้โวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัดแรงดันต่ำๆวัดได้ โดยใช้อิมพีแดนซ์แรงสูง Z_{hv} ต่อเข้ากับแรงดันที่จะวัดแล้วแบ่งเอาแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์แต่พียงส่วนน้อยออกมาวัด

โวลเตจดิไวเดอร์แบ่งออกเป็นภาคแรงดันสูง Z_{hv} และภาคแรงดันต่ำ Z_{lv} ปลายข้างหนึ่งของภาคแรงสูงจะต่ออยู่กับสายแรงดันสูงที่จะวัดส่วนอีกข้างหนึ่งจะต่ออยู่กับปลายหนึ่งของภาคแรงดันต่ำซึ่งอีกข้างหนึ่งของภาคแรงดันต่ำจะต่อกับดินตรงรอยต่อระหว่างภาคแรงดันสูงกับภาคแรงดันต่ำนี้เองจะเป็นจุดที่ต่อออกมาเข้าเครื่องวัดแรงต่ำ โวลต์มิเตอร์หรือเครื่องวัดแรงต่ำที่จะต่อเข้ากับโวลเตจดิไวเดอร์นี้จะต้องเป็นเครื่องวัดที่ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยที่สุด คือจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ทางเข้าสูงมากๆ และค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องวัดจะต้องไม่มีผลกระทบต่ออัตราส่วนอิมพีแดนซ์ของโวลเตจดิไวเดอร์ เมื่อวัดค่า V_2 ด้วยเครื่องวัดแรงต่ำได้แล้ว จึงคำนวณค่าแรงดันสูงที่ต้องการวัดได้ คือ [3]

$$V_1 = \frac{Z_{hv}+Z_{lv}}{Z_{lv}} V_2 \tag{1}$$

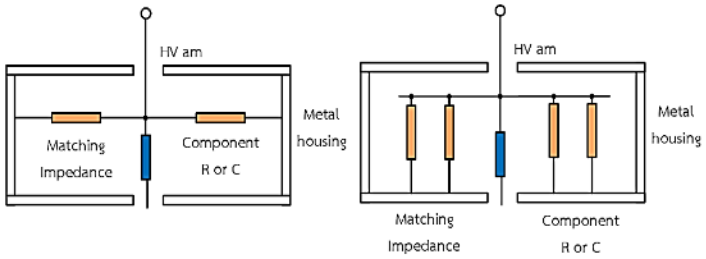
การวัดแรงดันกระแสสลับแรงสูงจะวัดด้วยโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ อาจจะเกิดความผิดพลาดซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ เนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เมื่ออิมพีแดนซ์ Z_{hv} และ Z_{lv} เป็นสารประเภทเดียวกัน ความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไป ปัญหาที่ทำให้ผลของการวัดผิดพลาดอีกประการหนึ่งคือองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไม่เป็นเชิงเส้นเช่น ผลกระทบจากความร้อน, ค่าอิมพีแดนซ์ภายในวงจร [4]



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุและการต่อวัดค่าด้วยออสซิสโลสโคป [5]

โวลเตจดิไวเดอร์มีอิมพีแดนซ์ภาคแรงดันสูงและมีอิมพีแดนซ์ภาคแรงดันต่ำเป็นแบบตัวเก็บประจุ ภาคแรงดันสูงอาจเป็นแบบตัวเก็บประจุย่อยต่ออันดับกันหรือตัวเก็บประจุเดี่ยวก็ได้ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุย่อยจะใช้ตัวเก็บประจุย่อยจะต่ออนุกรมกันค่าเก็บประจุและแรงดันตามต้องการ ตัวเก็บประจุย่อยอาจเป็นแบบกระดาษชุบน้ำมัน หรือเซรามิก ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุเดี่ยวจะใช้เป็นตัวประจุแบบอัดความดันโดยมีโครงสร้างอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมภายในอัดก๊าซซึ่งก๊าซที่ใช้อาจเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซ SF_6 เนื่องจากโวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดัน

ต้องมีเวลาตอบสนองไวการที่มีความเหนี่ยวนำแฝงในระบบวัดโดยเฉพาะภาคแรงดันต่ำจะทำให้ได้รูปคลื่นวัดที่มีการแกว่ง การเรียงตัวอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำให้มีความเหนี่ยวนำน้อยที่สุด จึงมีความจำเป็นอย่างมากตัวอย่างการจัดเรียงตัวอิมพีแดนซ์ให้ความสม่ำเสมอจะช่วยลดค่าความเหนี่ยวนำได้ [6]



รูปที่ 2 การจัดเรียงอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ

4. การดำเนินการวิจัย

การออกแบบและกำหนดคุณลักษณะของโวลเตจดิไวเดอร์ จะกำหนดคุณสมบัติของโวลเตจดิไวเดอร์ที่ออกแบบและสร้างคือเป็นชนิดตัวเก็บประจุ สำหรับวัดแรงดันสูงกระแสสลับที่มีพิกัดแรงดันขาเข้าไม่เกิน 200 kV และมีแรงดันขาออกอยู่ที่ไม่เกิน 200 V อัตราส่วนการลดทอนแรงดันคือ 1000:1 ในการออกแบบสร้างและการทดสอบอ้างอิงตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60060-2 (2010) ซึ่งจะกำหนดวิธีการและข้อกำหนดสำหรับการทดสอบแรงดันไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยมุ่งเน้นที่การวัดแรงดันไฟฟ้าและการทดสอบความทนทานต่อแรงดัน เพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์สามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมจริง [7][8][9]

ตารางที่ 1 พิกัดแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ที่ต้องการออกแบบ

รายละเอียด	ค่าพารามิเตอร์
พิกัดแรงดัน	200 kV_{AC}
ความถี่	50 Hz
อัตราส่วนลดทอนแรงดัน	1000 : 1
ค่าความแม่นยำที่ต้องการ	±1%

4.1 การสร้างโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุฉนวนสุญญากาศ

โดยทั่วไปมักใช้ก๊าซทำหน้าที่เป็นฉนวนหลัก เนื่องมีคุณสมบัติที่ดี หลังจากเกิดการเบรกดาวน์แล้วจะสามารถกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนได้อย่างรวดเร็ว ไม่มีพลังงานสูญเสียไดเล็กตริก ในด้านอุตสาหกรรมไฟฟ้าได้ยอมรับในการใช้ SF_6 แต่เป็นก๊าซที่อันตรายที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนสูงกว่า CO_2 ปัจจุบันนี้บริษัท 3M ได้มีการคิดค้นก๊าซฉนวน Novec (Novec Insulating Gases) เข้ามาใช้งานแทนที่ SF_6 สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ความเป็นสุญญากาศในกระบอกบรรจุคาปาซิเตอร์แรงสูงและแรงต่ำ ซึ่งมีค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้า 20 – 40 MV/m และมีคุณสมบัติด้าน Dielectric strength

4.1.1 การออกแบบสร้างภาคแรงดันสูงโดยจะนำตัวเก็บประจุเพื่อให้ได้การทนแรงดัน 200 kV

1) การออกแบบกระบอกบรรจุคาปาซิเตอร์ในงานวิจัยนี้กำหนดใช้ฉนวนภายในแบบฉนวนสุญญากาศ คาปาซิเตอร์ทั้งหมดจะบรรจุในท่อโพลิไวนิลคลอไรด์ คุณสมบัติที่ดีมีความเหนียวยืดหยุ่นตัวได้ดี ทนต่อแรงดันไฟฟ้าและการกัดกร่อน ในการออกแบบนี้จะนำท่อพีวีซีขนาด 150 mm สามารถคำนวณหาความหนาของท่อได้จากสมการ [4] [5]

$$t_{\min} = \frac{pD}{2(SE + 0.4p)} + A \qquad (2)$$

เมื่อ t_{min} = ค่าความหนาของท่อที่ต่ำที่สุด

p = ความดันบรรยากาศภายในท่อ (Pa)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (mm)

S = ค่าความเค้นที่ยอมให้วัสดุรับได้ (Pa)

E = ตัวประกอบคุณภาพ

A = ค่าระยะเผื่อสำหรับความผิดพลาดในชิ้นงานจริง

$$t_{\min} = \frac{101325x165mm}{2(100Mpax0.85) + 0.4101325))} + 0.4$$

t_{min} = 0.40009 mm.

ความหนาของท่อกระบอกพีวีซีต้องมีขนาดอย่างน้อย 0.4 mm เลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกขนาด 125 mm คลาส13.5 หนา 9.9±0.55mm ออกแบบให้ชั้นวางตัวเก็บประจุย่อยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 cm โดยสามารถจัดวางตัวเก็บประจุย่อยต่อ 1 แผ่นได้ 20 ตัว แรงดันตกคร่อมของตัวเก็บประจุในแต่ละชั้นจะได้ (600x20) เท่ากับ 12 kV เมื่อคำนึงถึงค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนอากาศ 25 kV/cm ดังนั้นระยะห่างระหว่างชั้นจะต้องไม่ต่ำกว่า 0.67 cm ระยะห่างระหว่างชั้นห่าง 3.5 cm ขนาดของอะคริลิคที่ใช้ยึดชั้นตัวเก็บประจุย่อย องค์ประกอบย่อยของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงทั้งหมดบรรจุไว้ภายในท่อฉนวนพีวีซี โดยความยาวของท่อพีวีซีที่ใช้มีความยาว 100 cm และภาคแรงดันต่ำบรรจุอยู่ในกล่องพักสายจำนวน 1 ชั้น อิเล็กโทรดออกแบบสร้างจากฝาครอบปลายท่อพีวีซี ซึ่งจะทำให้สามารถถอดประกอบได้

2) ความจุสเตรย์ลงดิน เป็นลักษณะสมบัติที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ คือค่าความจุสเตรย์ลงดินขึ้นอยู่กับมิติโครงสร้างของโวลเตจดิไวเดอร์ สำหรับตัวเก็บประจุแรงดันสูงเป็นตัวเก็บประจุย่อย เมื่อบรรจุอยู่ในท่อพีวีซี สามารถถือได้ว่าเป็นประจุเดี่ยวรูปทรงกระบอกดัง ในทางปฏิบัติค่าความจุสเตรย์อาจประมาณค่าจากความสูงของตัวแบ่งแรงดัน โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 10-15 pF/m ค่าความจุภาคแรงสูงควรใช้ Schering Bridge หรือ Transformer Ratio Arm Bridge แต่การใช้ LCR วัดค่าอาจทำให้สายวัดและความจุสเตรย์ถูกรวมค่าเข้าไปในการวัด ส่งผลให้ค่าสเกลเฟคเตอร์คลาดเคลื่อน สามารถหาค่าความจุสเตรย์ได้จากสมการดังต่อไปนี้ [7]

$$C_e = \frac{2\pi\varepsilon l}{\left[\left(\ln\frac{2l}{d}\right)\left(\sqrt{\frac{4h+1}{4h+3l}}\right)\right]} \tag{3}$$

ท่อพีวีซีที่เลือกใช้มีความยาว (l) ของท่อที่ใช้เป็นฉนวนชั้นนอกเท่ากับ 1 m ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) เท่ากับ 15 ± 0.4 cm มีความสูงวัดจากพื้นดิน (h) เท่ากับ 20 cm นำมาแทนในสมการที่(4) จะได้

$$C_e = \frac{2\pi\times(8.854\times10^{-3})\times1}{\ln\left[\left(\frac{2\times1}{0.165}\right)\left(\sqrt{\frac{(4\times0.216)+1}{(4\times0.216)+(3\times1)}}\right)\right]} \tag{4}$$

$$= \frac{55.631\times10^{-12}}{2.1304} = 26.11\text{pF}$$

3) ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง สำหรับวัดแรงดันกระแสสลับตามมาตรฐาน IEEE Std.4 กำหนดให้ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงมีขนาดอยู่ที่ 50-100 pF/m ของความสูงโวลเตจดิไวเดอร์ เพื่อเป็นการลดจำนวนของจำนวนของตัวเก็บประจุจึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุ ที่สามารถทนแรงดัน 600 V เป็นอย่างต่ำจากพิกัดแรงดันของชุดแบ่งแรงดันที่ต้องการออกแบบสร้าง 200 kV แรงดันทดสอบสูงสุดตามมาตรฐานคือการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะทำการทดสอบที่ 110 % ของพิกัดแรงดันคือ 220 kV ดังนั้นทำการออกแบบสร้างชุดแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ 120 % ของพิกัดแรงดันคือ

240 kV เลือกใช้แบบโพลีพรอพีลีนฟิล์ม R76 125C ขนาด 47 nF ทนแรงดันได้ 600 V จำนวนตัวเก็บประจุย่อยภาคแรงดันสูง $n=\frac{200\times10^{3}V}{600V}$ จะต้องใช้ตัวเก็บประจุทั้งสิ้นจำนวน 334 ตัวเนื่องจากจำเป็นต้องทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันที่จะวัด จึงต้องคิดเผื่อความปลอดภัยที่ 1.2 เท่า หรือ 120% ของแรงดันทดสอบใช้Capacitor จำนวน $\frac{1.2\times200kV}{600V}=400$ ตัว ค่าตัวเก็บประจุทั้งหมด $C=\frac{47\times10^{-9}}{480}=97.916pF$ เลือกใช้ตัวเก็บประจุจำนวณ 480 ตัว เพื่อให้ง่ายต่อการประกอบสร้างและมีอัตราส่วนของค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงสูงและด้านแรงดันต่ำใกล้เคียงกับ 1000:1 มากที่สุด ต่ออนุกรมกันแบ่งเป็น 24 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะมีตัวเก็บประจุอยู่ที่ 20 ตัว ที่ความปลอดภัย 1.2 เท่าหรือ 120 % และในการออกแบบค่าตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงควรมีค่ามากกว่าความจุสเตรย์ประมาณ 3 เท่า ความจุสเตรย์ลงดินมีค่าเท่ากับ 26.112 pF เมื่อนำตัวเก็บประจุมาต่ออนุกรมกันจะได้ค่าตัวเก็บประจุรวมทั้งหมดเท่ากับ 98 pF ซึ่งมีค่ามากกว่าความจุสเตรย์มาก โดยหาพิกัดกระแสได้จาก

$$X_c=\frac{1}{2\pi x50x97.916pF}=31.83M\Omega$$

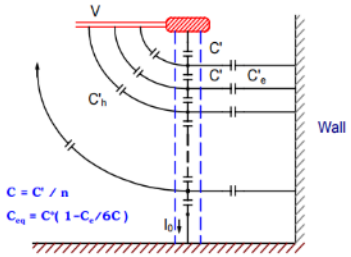
แทนสมการ

$$I=\frac{200kV}{31.830M\Omega}=6.283mA$$

4) จุดวาบไฟตามผิวฉนวน ความยาวท่อพีวีซีซึ่งใช้เป็นโครงสร้างของโวลเตจดิไวเดอร์ กำหนดด้วยระยะวาบไฟตามผิวฉนวนซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและคุณสมบัติของท่อพีวีซีในกรณีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะใช้ระยะวาบไฟตามผิวฉนวนมีค่าอย่างน้อย 0.5 m/100 kV โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างมีค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพิกัดเท่ากับ 200 kV ดังนั้นระยะวาบไฟตามผิวฉนวนควรมีค่าอย่างน้อยเท่ากับ 1เมตรซึ่งในกรณีนี้ออกแบบท่อจะขึ้นอยู่กับมิติภายในที่ออกแบบความเป็นฉนวนไฟฟ้าของท่อพีวีซี [6]

ในการทดสอบค่าความต้านทานฉนวนเราจะมีการกำหนดค่าแรงดันทดสอบ ซึ่งแรงดันทดสอบนี้ผู้จัดทำได้เลือกให้เหมาะสมกับแรงดันที่ใช้งานจริงโดยปกติจะเลือกแรงดันทดสอบอยู่ที่ประมาณ 2 เท่าของแรงดันที่ใช้งาน เมื่อเลือกแรงดันทดสอบได้แล้วก็ทำการทดสอบค่าฉนวนไฟฟ้า แล้วค่าฉนวนไฟฟ้าต้องการถึงแสดงว่าอุปกรณ์ไฟฟ้ามีสภาพสมบูรณ์พร้อมใช้งานตามมาตรฐาน IEC 60364

5) แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุดเนื่องจากการกระจายแรงดันของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งตัวเก็บประจุตัวบนสุดจะรับแรงดันสูงกว่าตัวอื่นๆ ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุดว่าสามารถทนแรงดันไฟฟ้าตามเงื่อนไขการกำหนดแรงดันที่ 200kV



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง

$$V_k=\frac{V}{C_e'+C_h'}\left[\frac{C_e'\sinh(\alpha k/n)}{\sinh\alpha}+C_h'\left[\frac{1-\sin(\alpha k/n)}{\sinh\alpha}\right]\right] \quad (5)$$

$$\alpha=\sqrt{\frac{C'_e+C'_h}{C'}} \quad (6)$$

เมื่อ c_k' = ความจุระหว่างตัวเก็บประจุย่อยกับอิเล็กโทรดแต่ละตัว

C_s' = ความจุระหว่างตัวเก็บประจุย่อยลงดินแต่ละตัว

C' = ความจุแต่ละตัว

K = ตัวเก็บประจุย่อยตัวบนสุด

$$\alpha = \sqrt{\frac{0.0541pF}{47nF}} = 1.0728\times10^{-3}$$

$$V_k = \frac{200kV}{0.0541pF}\left[\frac{0.0541pFx\sinh(1.0728x10^{-3}/480)}{\sinh(1.0728x10^{-3})}\right]$$

$$= 416.976\ \ V$$

4.1.2 การออกแบบภาคแรงดันต่ำ

คาปาซิเตอร์ภาคแรงดันต่ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากและเป็นส่วนหนึ่งในการกำหนดคุณสมบัติของโวลเตจดิไวเดอร์ การออกแบบสร้างภาคแรงดันต่ำต้องคำนึงถึงข้อกำหนดต่างๆ ดังนี้ [10] [11]

1) แรงดันขาออกไม่ต่ำเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากภายนอก เช่นจากกระแสที่ไหลในชีลด์ของเคเบิลสายวัดหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเกิดขึ้นตามส่วนต่างๆ ถ้าขนาดของสัญญาณที่ต้องการวัดต่ำเกินไปจะทำให้สัญญาณรบกวนเด่นชัดขึ้น เป็นผลกระทบต่อแรงดันที่ต้องการวัด

2) การจัดวางองค์ประกอบภาคแรงดันต่ำและความต้านทานแมชชิ่งของเคเบิลวัดต้องระวังไม่ให้เกิดสัญญาณรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านองค์ประกอบภาคแรงดันต่ำที่มีต่อลูปขาเข้าของเคเบิลวัดและต้องมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำเพื่อให้อิมพีแดนซ์ ที่ภาวะทรานเซี้ยนต์มีค่าต่ำทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากภาคแรงดันต่ำกับความต้านทานแมชชิ่งให้อยู่ในลักษณะสมนัย [12]

4..1.3 การเลือกแรงดันขาออกแรงดันขาออกสูงสุดของโวลเตจดิไวเดอร์กำหนดด้วยแรงดันขาเข้าสูงสุดของเครื่องวัดแรงดันต่ำซึ่งอาจเป็นออสซิสโลสโคป หรือมัลติมิเตอร์วัดค่ายอดเมื่อทราบแรงดันขาเข้า และขาออกที่กำหนดจะทำให้ทราบค่าสเกลแฟกเตอร์ของโวลเตจดิไวเดอร์ดังสมการ (7)

$$a = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \tag{7}$$

เมื่อ a = อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์

C_1 = ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูง

C_2 = ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ

เลือกแรงดันขาออก 200 V ซึ่งอัตราส่วนแรงดันโวลท์เตจดิไวเดอร์มีค่า 1000:1 สามารถคำนวณหาค่าเก็บตัวประจุและค่าความต้านทานภาคแรงต่ำได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$R_1C_1 = R_2C_2 \tag{8}$$

4.1.4 หาตัวเก็บประจุภาคแรงดันต่ำ จากอัตราส่วนของโวลเตจดิไวเดอร์เลือกแรงดันทางด้านขาออก 200 V จะได้อัตราส่วนลดทอนของโวลเตจดิไวเดอร์เท่ากับ 1000:1 ซึ่งค่าเก็บประจุภาคแรงดันสูงทั้งหมดเท่ากับ 98 nF ซึ่งเลือกตัวเก็บประจุเป็นแบบโพลีพรอพีลีนฟิล์มค่าเก็บประจุภาคแรงดันต่ำคำนวณได้ดังสมการ (9)

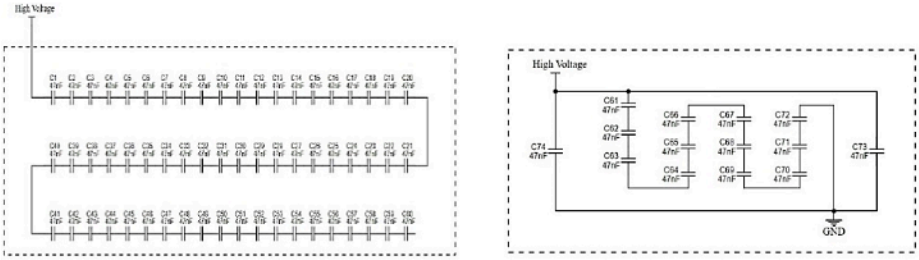
$$C_2 = \left(1000 \times C_1\right) - C_1 \tag{9}$$

$$C_2 = (1000 \times 97.916pF) - 97.916pF$$

$$= 97.818nF \approx 98nF$$

4.2 รายละเอียดการออกแบบวงจรของโวลเตจดิไวเดอร์

การต่อตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงดันสูง ซึ่งจะใช้ตัวเก็บประจุย่อยทั้งหมดจำนวน 480 ตัว การประกอบทำได้โดยใช้แผ่นอะคริลิคเป็นวงกลมหนา 2 mm เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12 cm ทำการเจาะช่องให้พอดีกับตัวเก็บประจุ 24 ตัวต่อชั้นระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ 3.5 cm ลักษณะการต่อตัวเก็บประจุเป็นแบบอนุกรมและภาคแรงดันต่ำบรรจุอยู่ในกล่องโลหะพักสายแยกออกจากภาคแรงดันสูง



รูปที่ 4 วงจรสมมูลภาคแรงดันสูงและวงจรสมมูลภาคแรงดันต่ำ

4.3 การออกแบบอิเล็กโทรด

ออกแบบอิเล็กโทรดที่ดีควรจะไม่มีขอบคม เพราะจะทำให้จุดนั้นเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงส่งผลต่อการเกิดโคโรน่าขณะจ่ายแรงดันใช้งาน อีกทั้งควรมีความแข็งแรงทางกลด้วยเมื่อนำไปประกอบเข้ากับกระบอกพีวีซีสะดวกในการต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงหรืออุปกรณ์แรงดันสูงอื่นๆ วัสดุที่ใช้ทำควรป้องกันการรั่วซึมเนื่องจากภายในท่ออาจมีของเหลวหรือก๊าซบรรจุอยู่เพื่อเพิ่มความเป็นฉนวนระหว่างตัวอุปกรณ์กับผิวท่อโดยจะหาค่าขนาดของรัศมีที่มากที่สุดของอิเล็กโทรดได้จากการคำนวณดังนี้ [12]

$$r \geq \frac{V_p}{E_{\max}} = \frac{V_p}{25kV} \tag{10}$$

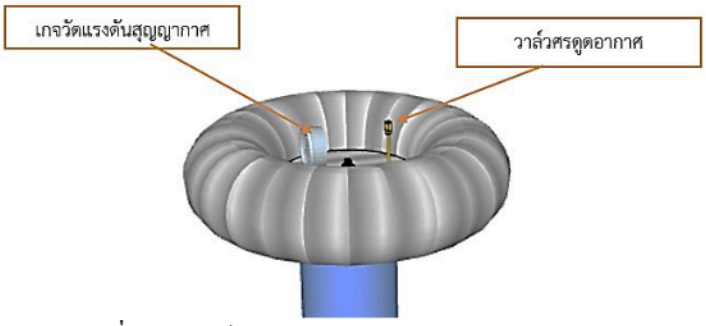
$$r \geq \frac{200kV_{rms} \times \sqrt{2}}{25kV_p} = 11.3 \quad cm$$

เมื่อ r = รัศมีของอิเล็กโทรด

V = ค่ายอดของแรงดันใช้งาน

E_{max} = ความเครียดสนามไฟฟ้าของอากาศ 25 kV/cm

โดยการออกแบบอิเล็กโทรดที่ใช้ในการสร้างโวลเตจดิไวเดอร์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 22.6 cm รัศมีไม่น้อยกว่าขนาด 11.3 cm จึงออกแบบอิเล็กโทรดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 23.3 cm และรัศมีขนาด 11.65 cm

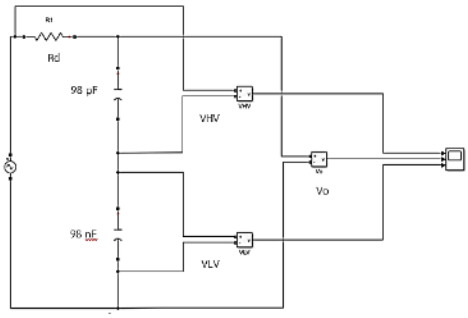


รูปที่ 5 แบบอิเล็กโทรดส่วนบนพร้อมBourdon Gauge

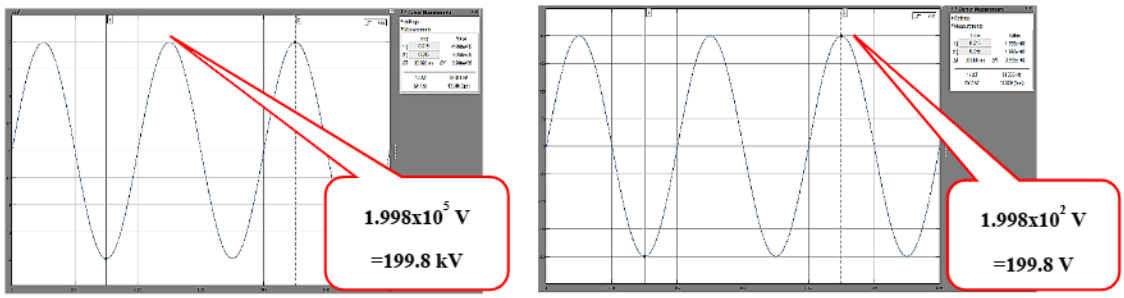
ค่าของความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถทนอยู่ได้ ค่าความคงทนของฉนวนมีหน่วยเป็น V/cm หรือ kV/cm ในงานวิจัยนี้คือค่าแรงดันต่อความหนาของฉนวนหรือระยะห่างของอิเลกโทรด

4.4 การจำลองผลการทดลองผ่านโปรแกรมMatlab/Simulink

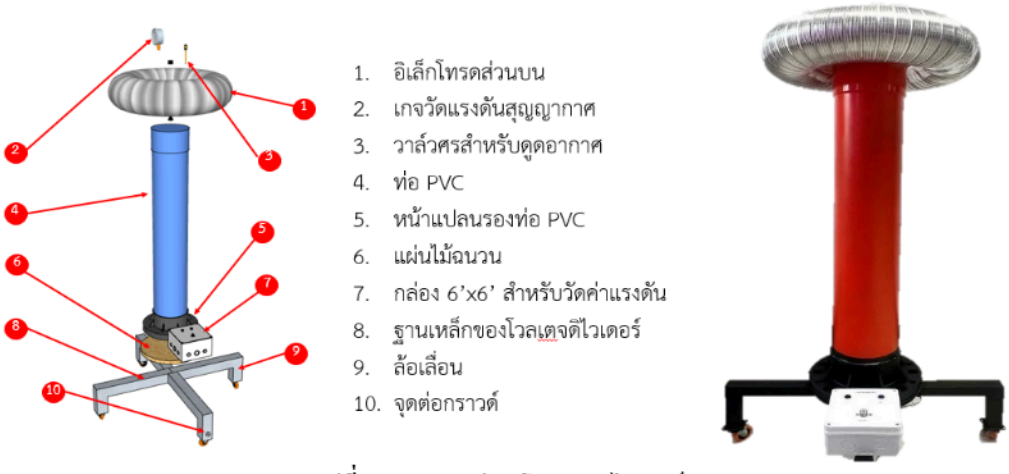
การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์(computer simulation) เป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งในการช่วยวิเคราะห์ผลการออกแบบวงจร ทำให้ทราบพฤติกรรมการทำงานและปัจจัยต่าง ๆของระบบที่ส่งผลต่อการทำงานเช่นผลตอบสนองแรงดันและผลตอบสนองเชิงความถี่ การจำลองวงจรโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุด้วยโปรแกรม MATLAB เริ่มต้นด้วยการกำหนดพารามิเตอร์ของวงจร เช่น ค่าความจุของตัวเก็บประจุ (C_1, C_2) และระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ จากนั้นใช้เครื่องมือ Simulink เพื่อสร้างและกำหนดค่าของวงจรที่ออกแบบไว้ การจำลองจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์การแบ่งแรงดันและการตอบสนองของวงจรในสภาวะต่าง ๆ โดยการจำลองและตรวจสอบผลลัพธ์ หากผลลัพธ์ไม่ตรงตามข้อกำหนด อาจต้องปรับปรุงการออกแบบและทำการจำลองซ้ำ ก่อนนำข้อมูลไปใช้ในการสร้างวงจรจริง



รูปที่ 6 จำลองการออกแบบวงจรของโวลเตจดิไวเดอร์ด้วยMATLAB/Simulink



รูปที่ 7 สัญญาณของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมภาคแรงดันต่ำ



รูปที่ 8 แบบแยกส่วนโวลเตจดิไวเดอร์

รูปที่ 9 การวางตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงในแต่ละชั้น

5.ผลการวิจัย

อุปกรณ์บางอย่างที่ได้ออกแบบไม่มีจำหน่ายตามท้องตลาดจึงเลือกอุปกรณ์มีค่าที่ใกล้เคียงมากที่สุดและส่วนในการออกแบบส่วนอื่นก็ปรับไปตามด้วย ซึ่งต้องทำการทดสอบและเก็บผลการทดสอบให้ได้ตามมาตรฐานIEC 6006-2 (2010) เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้ประกอบการศึกษาและเพื่อให้นักศึกษานำไปใช้ศึกษาปรับปรุงและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งการทดสอบสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนการทดสอบได้ดังนี้

5.1 การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงและภาคแรงดันต่ำ

การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงและภาคแรงดันต่ำโดยใช้เครื่องมือวัด LCR meter HP Agilent 4263B

ตารางที่ 2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุของตัวเก็บประจุ

จุดวัดค่าความจุไฟฟ้า	ค่าจากการคำนวณ (pF)	ค่าจากการวัด (pF)	% ความผิดพลาด % Error
ตัวเก็บประจุ ภาคแรงดันสูง	97.91	97.11	0.817
ตัวเก็บประจุ ภาคแรงดันต่ำ	97.90	96.99	0.929

จากตารางที่ 2 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุภาคแรงดันสูงมีค่าความจุไฟฟ้ารวม 97.01 pF ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการวัดต่ำกว่าค่าที่คำนวณ ซึ่งจากคำนวณได้มีค่าความจุไฟฟ้ารวม 97.91 nF ค่าความผิดพลาดอาจจะเกิดจากความคลาดเคลื่อนของตัวเก็บประจุย่อยแต่ละตัว ในงานวิจัยนี้ใช้ LCR วัดค่าซึ่งอาจทำให้สายวัดและความจุสเตรย์ถูกรวมค่าเข้าไปในการวัด ส่งผลให้ค่าสเกลเฟคเตอร์มีความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 10 ค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงสูงและค่าความจุไฟฟ้าด้านแรงต่ำที่วัดได้จาก LCR Meter Agilent 4263B

5.2 การทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

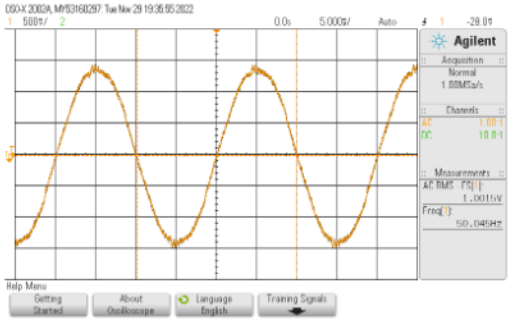
มาตรฐาน IEC 60060-1:2010 ข้อ 7.4.3 Check of the scale factors of the components ได้ระบุ ความไม่แน่นอนขยายไม่เกิน 1 % หากความแตกต่างของสเกลแฟกเตอร์ของแต่ละส่วนประกอบจากค่าก่อนหน้าไม่เกิน ±1 % ระบบจะถือว่าสเกลแฟคเตอร์ที่กำหนดนั้นยังคงใช้ได้ หากความแตกต่างใดๆ เกิน 1% ค่าใหม่ของตัวประกอบมาตราส่วนที่กำหนดจะต้องถูกกำหนดในการทดสอบประสิทธิภาพ (การสอบเทียบ)

ในการทดสอบหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะทำการทดสอบที่แรงดันที่พิกัด 100 kV โดยมาตรฐานกำหนดว่าจะต้องทำการทดสอบไม่น้อยกว่า n ค่า ($n \geq 10$) โดยจะทำการทดสอบจำนวน 15 ครั้ง โดยมาตรฐานกำหนดว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จะต้องน้อยกว่า 1% ของค่าเฉลี่ย Fm วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่13 และผลการทดสอบแสดงดังตารางที่3 (สถานที่ทำการทดสอบห้องปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน สภาวะบรรยากาศขณะทดสอบอุณหภูมิห้อง 21.9 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 69%)

ตารางที่ 3 ผลการทดลองหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 100 kV

ครั้งที่	V_{supply} (kV)	$V_{measurement}$ (V)	Fi (V_{REF} /Vm)
1	100.00	1.002	9,980.00
2	100.00	1.003	9,970.00
3	100.00	1.002	9,980.00
4	100.00	1.003	9,970.00
5	100.00	1.002	9,980.00
6	100.00	1.002	9,980.00
7	100.00	1.003	9,970.00
8	100.00	1.002	9,980.00
9	100.00	1.002	9,980.00

10	100.00	1.002	9,980.00
11	100.00	1.001	9,990.00
12	100.00	1.002	9,980.00
13	100.00	1.003	9,970.00
14	100.00	1.002	9,980.00
15	100.00	1.003	9,970.00
ค่าเฉลี่ย Fm			9,977.33
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)			5.93
%ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)/ค่าเฉลี่ย Fm			0.059



รูปที่ 11 สัญญาณของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพิกัด 100 kV ขณะไม่มีโหลด

จากรูปที่ 11 ผลการทดสอบโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดตัวเก็บประจุวัดแรงดันกระแสสลับจะทำการทดสอบที่แรงดัน 100 kV จำนวน 15 ครั้ง ผลการทดสอบตามตารางที่ 3 ค่าสเกลแฟกเตอร์มีค่าเท่ากับ 9,977.33 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.059 ของค่าเฉลี่ย Fm (มีค่าน้อยกว่า 1%) ซึ่งเป็นตามข้อกำหนดมาตรฐาน

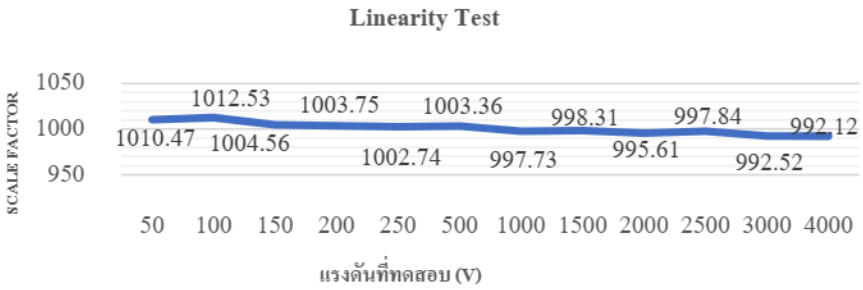
5.3 การทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น (Linearity Test)

การทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุวัดแรงดันกระแสสลับโดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60060-2 (2010) ได้ทำการทดสอบวัดแรงดันเปรียบเทียบกับระบบวัดแรงดันอ้างอิง เพื่อดูผลของระบบที่ต้องการทดสอบว่าค่าแรงดันที่วัดมีความเป็นเชิงเส้นหรือไม่ตามข้อกำหนดมาตรฐาน การทดสอบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในการทดสอบจะทำการทดสอบ 5 ช่วง ตลอดแรงดันใช้งานซึ่งแต่ละค่าของระดับแรงดันจะทำการทดสอบ 5 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยแต่ละระดับแรงดัน ตามมาตรฐานIEC ได้กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบไว้ดังนี้ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนระหว่างแรงดันทดสอบกับแรงดันที่เปรียบเทียบมีค่าไม่เกิน ±1% ของค่าเฉลี่ย Fm ให้ถือว่าเครื่องมือที่ทำการทดสอบมีความเป็นเชิงเส้น

การทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในการทดสอบจะทำการทดสอบระดับแรงดัน 5 ช่วงตลอดช่วงแรงดันใช้งาน ซึ่งแต่ละค่าของระดับแรงดันจะทำการทดสอบ 5 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับแรงดันมาตรฐานได้กำหนดเงื่อนไขในการทดสอบไว้ ดังนี้ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนระหว่างแรงดันทดสอบกับแรงดันที่เปรียบเทียบมีค่าไม่เกิน ±1% ของค่าเฉลี่ย ให้ถือว่าเครื่องมือที่ทำการทดสอบมีความเป็นเชิงเส้น วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 12 และผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

ครั้งที่	V_{REF} (kV)	Vm (V)	Fi (V_{REF} /V_m)
1	0.50	0.498	1.004
2	1.00	1.002	0.998
3	2.00	2.008	0.996
4	3.00	3.002	0.999
5	4.00	4.031	0.992
ค่าเฉลี่ย Fm			0.998
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)			0.004
% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)/ค่าเฉลี่ย Fm			0.40%

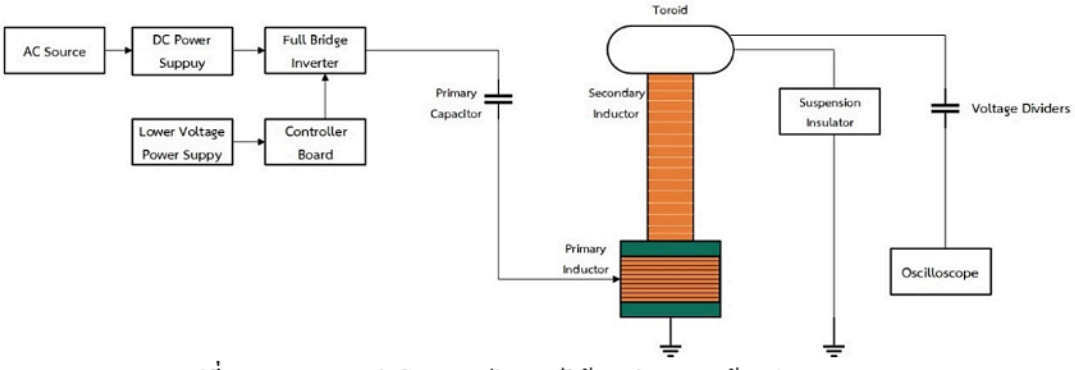


รูปที่ 12 กราฟคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

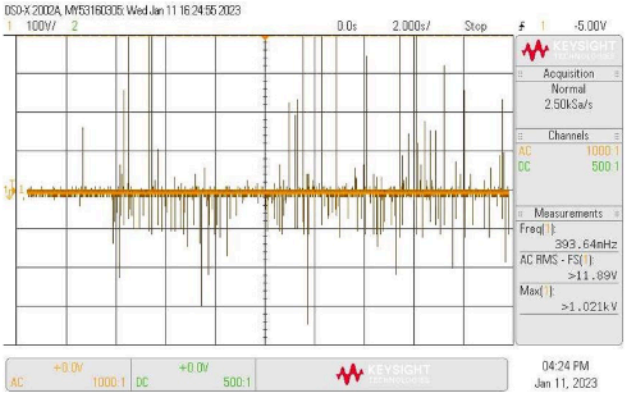
จากผลการทดสอบคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.04% ของ Fm ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ±1% ของค่าเฉลี่ย Fm ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

5.4 การทดสอบความเป็นเสถียรภาพ (Stability Test)

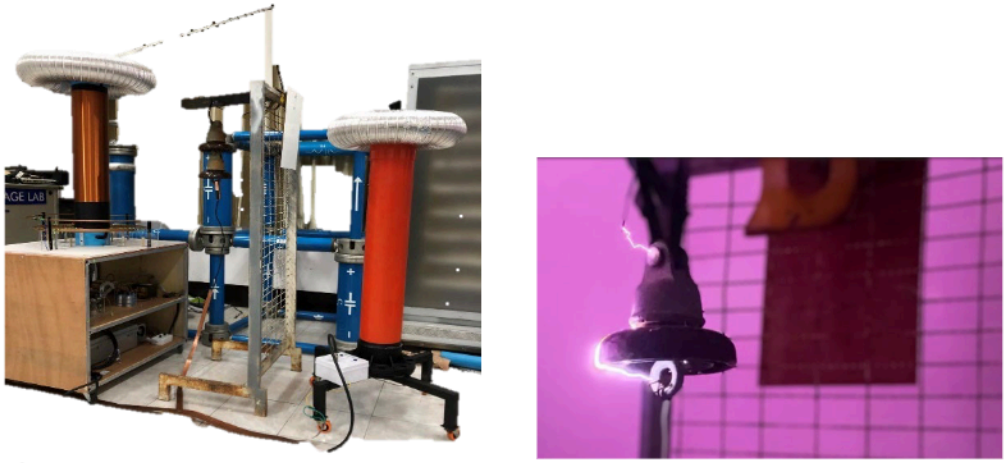
ทำการทดสอบโดยการนำโวลเตจดิไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างวัดค่าแรงดันสูงจากหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง ขนาดพิกัด 200 kV 200 kHz โดยนำมาต่อกับหม้อแปลงแล้วทำการวัดค่าผ่านออสซิลโลสโคปแล้วบันทึกผล เพื่อทำการทดสอบคาปาซิทีฟโวลเตจดิไวเดอร์ที่ออกแบบสร้างสามารถทนต่อแรงดันสูงที่พิกัดตามกำหนดได้เมื่อใช้งานที่พิกัด ที่ระดับแรงดันทดสอบ 110%ของพิกัด เป็นเวลา 1นาที ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5



รูปที่ 13 แผนผังการต่อโวลเตจดิไวเดอร์ใช้งานร่วมกับหม้อแปลงแรงดันสูง



รูปที่ 14 กราฟผลการทดสอบคุณสมบัติความเป็นเสถียรภาพของหม้อแปลงแรงดันสูงความถี่สูง



รูปที่ 15 การทดสอบโวลเตจดิไวเดอร์ในการทดสอบลูกถ้วยด้วยหม้อแปลงเทสล่า(ทดสอบวัดขณะมีโหลด)

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบคุณสมบัติความเป็นเสถียรภาพผ่านหม้อแปลงแรงดันสูงขณะมีโหลด

ครั้งที่	Vm(V)	Vr (kV)	Times (s)	Status
1	1.34	134.10	60	Withstands
2	1.24	124.70	60	Withstands
3	1.29	129.98	60	Withstands
4	1.30	130.05	60	Withstands
5	1.21	121.25	60	Withstands

การสร้างเครื่องมือวัดไฟฟ้า จะเกิดความไม่แน่นอนของการวัดที่ระบุในมาตรฐาน ใช้กับระดับการทดสอบที่ระบุใน IEC 60071-1 หลักการของมาตรฐานนี้ยังใช้กับระดับที่สูงขึ้นด้วย แต่ความไม่แน่นอนอาจมากกว่านั้น วิธีการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัดด้วยไฟฟ้าแรงสูง ที่ระบุข้อกำหนดที่ระบบการวัดต้องเป็นไปตามกำหนดวิธีการในการตรวจสอบระบบการวัดและตรวจสอบส่วนประกอบ รวมไปถึงกำหนดข้อกำหนดของผู้ใช้สำหรับระบบการวัดนี้ จะทำให้เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นนั้นมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

การออกแบบโวลเตจดิไวเดอร์ที่ใช้ตัวเก็บประจุชนิดโพลีพรอพีลีนฟิล์ม ซึ่งมีความทนทานต่อแรงดันสูงและอุณหภูมิได้ดี ใช้การบรรจุในฉนวนแบบสุญญากาศและวัสดุพีวีซีทรงกระบอก ซึ่งเป็นการเลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษเพื่อรองรับการใช้งานที่มีแรงดันสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีราคาไม่สูง อัตราส่วนในการลดทอนแรงดันที่เลือกใช้คือ 1000:1 ซึ่งทำให้โวลเตจดิไวเดอร์นี้มีความสามารถในการลดทอนแรงดันได้อย่างแม่นยำ และมีค่าความจุไฟฟ้ารวมที่ถูกคำนวณและออกแบบมาอย่างละเอียด ซึ่งอาจแตกต่างจากงานวิจัยอื่นที่ใช้วิธีการฉนวน การใช้ MATLAB/Simulink ในการจำลองและวิเคราะห์การทำงานของโวลเตจดิไวเดอร์ ช่วยให้การออกแบบและการทดสอบเป็นไปอย่างมีระบบและมีความแม่นยำสูง ซึ่งเป็นการพัฒนาเทคนิคในการจำลองการทำงานการตรวจสอบก่อนการสร้างวงจรจริง

6.สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบโวลเตจดิไวเดอร์สามารถวัดแรงดันสูงกระแสสลับ มีคุณสมบัติสอดคล้องตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60060-2 (2010) ขณะทำการทดสอบเกิดปัญหาด้านเสถียรภาพของแรงดันที่จ่ายทดสอบ ตามพิกัดของโวลเตจดิไวเดอร์ในบางครั้ง แต่ก็สามารถนำไปใช้ในการเรียนการสอนปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา หรือนำไปใช้งานต่อร่วมกับอุปกรณ์ที่มีอยู่ในปัจจุบันได้ตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ ส่วนค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการทดสอบแรงดันกระแสสลับ อาจเกิดจากหลายสาเหตุดังต่อไปนี้

1) ค่าความผิดพลาดของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ใช้มีค่าความผิดพลาดที่แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อนำมาต่อใช้งานกับวงจรในภาคแรงดันสูงและแรงดันต่ำที่ออกแบบไว้ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความความผิดพลาดขึ้นกับระบบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

2) ความผิดพลาดของเครื่องมือวัด เครื่องมือวัดที่นำมาใช้ในการทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนั้นมีทั้งแบบดิจิตอลมัลติมิเตอร์ อนาล็อกมัลติมิเตอร์และดิจิตอลออสซิลโลสโคป ซึ่งมีค่าความผิดพลาดในตัวของเครื่องมือวัด

3) การเกิดโคโรน่าในการทดสอบนั้นทำให้เกิดคลื่นรบกวนในระบบวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้และเนื่องจากคุณสมบัติระบบวัดทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า จึงมีผลทำให้ระบบวัดเกิดความผิดพลาดขึ้น

4) ผลของอุณหภูมิและความชื้นในขณะการทดสอบ

5) ระหว่างการทำการทดลองเครื่องกำเนิดหรือแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้จ่ายแรงดันขาออกแต่ละครั้งอาจมีค่าไม่เท่ากัน จึงทำให้ระบบวัดเกิดความผิดพลาดขึ้นได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่สนับสนุนในการจัดซื้อวัสดุอุปกรณ์ รวมถึงให้สถานที่ตลอดจนถึงเครื่องมือต่างๆ ในการจัดทำงานวิจัย และขอขอบคุณนางสาววิไลวรรณ กาวินคำ นายภูชิต อินต๊ะวงค์ นักศึกษาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ช่วยเหลือในการร่วมจัดทำงานวิจัยและเก็บผลการทดสอบ

8. เอกสารอ้างอิง

[1] สำรวย สังข์สะอาด. (2549). **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[2] ณัฐพงศ์ ตัณฑนุช. (2564). **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.**พิมพ์ครั้งที่ 1.ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

[3] Kuffel, E. & Zaengl, W.S. (2000). **High Voltage Engineering Fundamentals**. Great Britain. A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd.

[4] มินเรศน์ เตชะวงศ์ และ วรพงศ์ กันทะ. (2556).การออกแบบและสร้างชุดแบ่งแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับแบบตัวเก็บประจุขนาด 150 กิโลโวลต์ .วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล (JEDT), 1(2): 43-48.

[5] อติกร เสรีพัฒนานนท์, ธนากร น้ำหอมจันทร์, พงษสวัสดิ์ คชภูมิ และ สุพิศ บุญรัตน์. (2563). การออกแบบและสร้างโวลเตจดิไวเดอรแบบตัวเก็บประจุขนาด 150 กิโลโวลต์ สำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ. วารสารมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย, 2(1): 19-25.

[6] ไชยพร หล่อทองคำ. (2546). โวลเตจดิไวเดอร์แบบวงจรร่วมสำหรับใช้วัดแรงดันสูง กระแสสลับ กระแสตรงและแรงดันอิมพัลส์" (โครงการวิจัยภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร).

[7] อานนท์ อิศรมงคลรักษ์ และคณะ. (2565). การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดไฟฟ้าแรงสูงด้วยเทคนิคการแบ่งแรงดันไฟฟ้าชนิดตัวเก็บประจุพิกัด100kV สำหรับห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง. ในการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 14(931-942). นครปฐม: มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.

[8] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC Standard Publication 60060-1: High-Voltage Test Techniques - Part 1: General Definitions and Test Requirements, 3rd Edition, 2010.

[9] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC Standard Publication 60060-2: High-Voltage Test Techniques - Part 2: Measuring Systems, 3rd Edition, 2010.

[10] IEEE Standards Association, IEEE 4-2013: Standard Techniques for High-Voltage Testing, 2013.

[11] Uros Kovacevic, Zijad Bajramovic and Bojan Jovanovic.(2022). The Construction of Capacitor Voltage Divider for Measurement Ultrafast Pulse Voltage. Retrieved on December 1,2022, from https://ieeexplore.ieee.org/stamp /stamp.jsp? tp=&arnumber=7296889

[12] Simon, B. (2022).Testing and Analysis of Universal High Voltage Divider. (Master Degree Thesis, Tampere University).

การพัฒนาต้นแบบชุดรับส่งข้อมูลโดยใช้หลักการเรดิโอโอเวอร์ไอพี ผ่านวิทยุทหารรุ่น CNR 900

Development of a Prototype Data Transmission Device Using Radio Over IP Principles for CNR 900 Military Radios

Received: April 22, 2024
Revised: July 17, 2024
Accepted: October 23, 2024

[1*]ชนะ จันทร์อิ่ม, [2]อนุรักษ์ วงษ์พระจันทร์ และ [3]พิมพ์ชนก เกียรติสิน
[1]กองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
[2]ภาควิชาวิทยุทางทหาร กองการศึกษา โรงเรียนทหารสื่อสาร กรมการทหารสื่อสาร
[3]ภาควิชาการจัดการเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
[1*] **Chana Jan im, [2]Anurak Wongprachan and [3]Pimchanok Kiattisin**
[1] Department of Electrical Engineering, Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy
[2] Department of Radio Tactical Military, Academic Division, Signal School of the Signal Department
[3]Department of Information Technology Management Faculty of Engineering Mahidol University
[*]chana.ja@crma.ac.th, [#]anurak.w@signalschool.ac.th, [#]pim.kiattisin@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์การพัฒนาต้นแบบชุดเชื่อมต่อวิทยุทหารรุ่น CNR 900 เพื่อเพิ่มช่องทางการรับ-ส่ง ข้อมูลดิจิทัลโดยใช้หลักการเรดิโอโอเวอร์ไอพี (Radio Over Internet Protocol: RoIP) ที่ผนวกรวมระบบวิทยุเคลื่อนที่ประจำรถยานเกราะในหน่วยระดับกองร้อยดำเนินกลยุทธ์กับระบบโทรศัพท์หมายเลขภายใน 5 ตัว (E-ARMY) ทำให้การอำนวยการและสั่งการในพื้นที่ประสบภัยพิบัติหรือพื้นที่ยากต่อการทำสถานีส่งต่อทางวิทยุเพื่อเพิ่มระยะการติดต่อสื่อสารได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการแปลงสัญญาณเสียงผ่านโดยตรงกับชุดวิทยุทหารรุ่น CNR 900 เข้ากับไมโครโปรเซสเซอร์ Raspberry Pi4 แล้วทำการกรองสัญญาณเสียงแบบ CMOS Wideband เพื่อเชื่อมผ่านไปยังระบบโทรศัพท์ภายในกองทัพบกได้ อีกทั้งการเชื่อมต่อระบบ RoIP เข้ากับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตภายในผ่าน Private Sever บนระบบปฏิบัติการ Linux โดยทำการทดสอบผ่านโปรแกรมการรับส่งรหัสมอร์ส เพื่อทดสอบแม่นยำของสัญญาณเสียงวิทยุที่ผ่านต้นแบบดังกล่าว ผลที่ได้คือการรับส่ง พร้อมถอดรหัสมอร์สได้ทั้งอักษรภาษาไทย อังกฤษ และตัวเลข ได้ถูกต้องทุกคำ พร้อมทั้งการวัดค่า Signal to Noise Ratio (SNR) เพื่อประเมินคุณภาพของสัญญาณเสียงวิทยุเชื่อมต่อกับชุดโทรศัพท์ ค่าที่ได้มากกว่า 25 dBm ซึ่งสามารถรองรับการรับส่งสัญญาณเสียงผ่านชุดต้นแบบได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: เรดิโอโอเวอร์ไอพี, วิทยุทหารรุ่น CNR 900

Abstract

The purpose of this research is to develop a prototype communication system using the CNR 900 military radio model to enhance digital data transmission channels utilizing Radio Over Internet Protocol (RoIP). This system integrates with the mobile radio system of armored vehicles in the Black Panther Battalion's E-ARMY, allowing for command and control operations in disaster-stricken or hard-to-reach areas by extending the communication range through radio relay stations. The research involves directly converting Digital Encrypted Voice signals with the CNR 900 military radio set and interfacing it with a Raspberry Pi4 microprocessor. The voice signals are then filtered using CMOS Wideband technology to connect to the internal telephone system of the army. Additionally, the RoIP system is connected to the internal Internet network through a Private Server on a Linux operating system. Testing is conducted using Morse code transmission programs to assess the accuracy of the radio voice signals passed through the prototype. The results demonstrate accurate transmission and decoding of Thai and English alphabets and numerals, with every word decoded correctly. Furthermore, the Signal to Noise Ratio (SNR) is measured to evaluate the quality of the radio voice signals connected to the telephone set, with values exceeding 25 dBm, indicating suitable support for voice signal transmission through the prototype system.

Keywords: Radio Over Internet Protocol, CNR 900 Military Radio

1. บทนำ

กองทัพบกมีการใช้งานวิทยุทางทหารที่มาจากหลายบริษัทที่มาจากหลายมิตรประเทศ โดยที่ประเภทของวิทยุทางทหารที่บรรจุให้แต่ละหน่วยทหารขึ้นกับขีดตามความสามารถและหน้าที่รับผิดชอบของหน่วยนั้น ๆ ในทำนองเดียวกันการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านการสื่อสารทางทหารมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้กองทัพบกจำเป็นจัดหายุทโธปกรณ์ที่มีความทันสมัยและประกอบกับยุทโธปกรณ์รุ่นเก่าเริ่มเข้าวงรอบการปลดประจำการ แต่ด้วยงบประมาณที่จำกัด จึงมีข้อจำกัดในการจัดหายุทโธปกรณ์ให้กับหน่วยทหารได้ทั้งหมดได้ทันที ดังนั้นสำหรับการเปลี่ยนผ่านของเทคโนโลยียุคเก่าไปสู่ยุคใหม่ ทำให้ยุทโธปกรณ์ทางการสื่อสารประเภทวิทยุรุ่นเก่าที่ไม่โหมดการทำงานไม่สามารถติดต่อสื่อสารกับวิทยุรุ่นใหม่เช่น CNR 900, VRC-730 หรือ VRC-710 เป็นต้น โดยที่ส่วนใหญ่จะมี 3 โหมดการทำงาน คือ 1. โหมดเสียงกระจ่าง (CLR) 2. โหมดเข้ารหัส (SEC) และ 3. โหมดความถี่ก้าวกระโดด (Frequency Hopping : AJ) ในส่วนของโหมดเสียงกระจ่าง (CLR) เป็นโหมดที่ใช้งานความถี่ให้ตรงกันของชุดวิทยุทั้งสองฝ่ายก็สามารถดำรงการติดต่อสื่อสารได้ แต่โหมดเข้ารหัส (SEC) และโหมดความถี่ก้าวกระโดด (AJ) ถือว่าเป็นองค์ความรู้เฉพาะ ๆ ของบริษัทหรือประเทศผู้ผลิตนั้น ๆ

การพัฒนาเทคโนโลยีด้านวิทยุทางทหาร โดยเฉพาะหลักการเรดิโอโอเวอร์ไอพี (RoIP) เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยให้การสื่อสารทางวิทยุแบบสองทางสามารถส่งผ่านเครือข่าย IP เช่น อินเทอร์เน็ตหรืออินทราเน็ต เป็นต้น สิ่งนี้ตรงกันข้ามกับระบบวิทยุสองทางแบบดั้งเดิมซึ่งใช้คลื่นวิทยุในการส่งการสื่อสาร ลักษณะของ RoIP ทำงานโดยการแปลงสัญญาณวิทยุเป็นแพ็กเก็ตดิจิทัล ซึ่งจากนั้นจะถูกส่งผ่านเครือข่าย IP จากนั้นแพ็กเกจจะถูกถอดรหัสและแปลงกลับเป็นสัญญาณวิทยุที่ส่วนรับสัญญาณ การใช้เครือข่าย IP สำหรับวิทยุผ่าน IP ช่วยให้ผู้ใช้สามารถสื่อสารในระยะทางที่มากขึ้นและเป็นการขยายเครือข่ายให้มากกว่าระบบวิทยุสองทางแบบดั้งเดิม ROIP คล้ายกับ Voice over IP (VoIP) แต่เพิ่มการสื่อสารทางวิทยุแบบสองทางมากกว่าการโทรศัพท์ จากมุมมองของระบบ มันคือ VoIP ที่มีคุณสมบัติ Push-To-Talk เป็นหลัก

ผู้วิจัยเล็งเห็นได้ว่า ปัญหาการเชื่อมต่อทั้งเทคนิคเฉพาะของวิทยุที่มีความหลากหลายของมิตรประเทศและการพัฒนาทางเทคโนโลยีทางด้านโทรคมนาคมเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเพื่อพัฒนาต้นแบบชุดเชื่อมต่อระบบสื่อสารติดตามทางยุทธวิธีผ่านวิทยุสื่อสารผ่านเรดิโอโอเวอร์ไอพี โดยฉพาะชุดวิทยุทหารแบบ CNR 900 ซึ่งเป็นชุดวิทยุที่ใช้งานหลัก เช่นหน่วยทหารราบ ทหารม้า ทหารปืนใหญ่ เป็นต้น ประกอบกับภารกิจของกองทัพบกที่จำเป็นต้องปฏิบัติงานร่วมกับหน่วยงานอื่นเช่น กองทัพเรือ กองทัพอากาศ สำนักงานตำรวจแห่งชาติ หรือ หน่วยป้องกันบรรเทาสาธารณะภัย ที่มีการใช้งานวิทยุในแต่ละหน่วยงานคนละประเภทเช่นกัน ก็สามารถเชื่อมโยงเข้าระบบ ในการรับข้อมูลการติดต่อสื่อสารผ่านระบบ Radio Over IP (RoIP) ที่มีศักยภาพในการเชื่อมโยงข่ายการสื่อสารให้กับที่บัญชาการหลักของหน่วยงานต่างๆไปยังที่หน่วยปฏิบัติการในแนวหน้า อีกทั้งสามารถทำการเชื่อมโยงข่ายการสื่อสารหลักของ ทบ. ผ่าน เช่นระบบ E-ARMY, ระบบโทรศัพท์ ทบ., ระบบวิทยุประจำรถ, ระบบสนธิวิทยุทางสาย เป็นต้น

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 เพื่อจัดทำต้นแบบชุดรับ-ส่งสัญญาณเสียงวิทยุ สำหรับชุดวิทยุทหารแบบ CNR 900 กับระบบโทรศัพท์ภายใน ทบ.

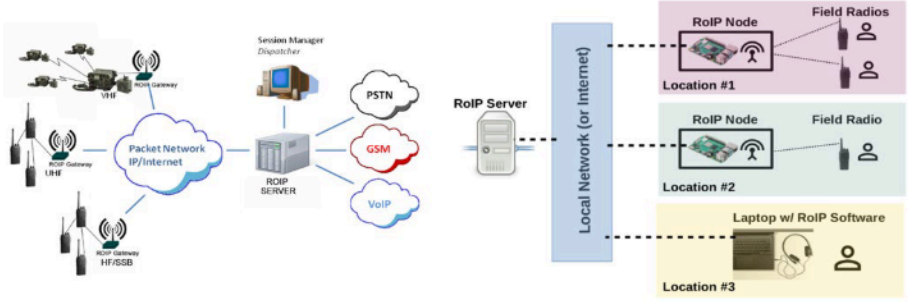
2.2 เพื่อพัฒนาต้นแบบชุดเชื่อมต่อระบบสื่อสารวิทยุทหารผ่านวิทยุสื่อสารผ่านเรดิโอโอเวอร์ไอพี (RoIP) ประกอบชุดวิทยุทหารแบบ CNR 900 ให้รับส่งสัญญาณโดยไม่อาศัยการจัดตั้งสถานีส่งต่อสัญญาณ

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การทำงานเรดิโอโอเวอร์ไอพีผ่านวิทยุ

เทคโนโลยี Radio over Internet Protocol (RoIP) ซึ่งเป็นวิธีการที่ช่วยให้การสื่อสารทางวิทยุสองทางสามารถส่งผ่านเครือข่าย IP เช่นอินเทอร์เน็ตได้ โดย RoIP ทำงานโดยการแปลงสัญญาณวิทยุเป็นแพ็กเกจดิจิทัล และส่งผ่านเครือข่าย IP หลังจากนั้นแพ็กเกจจะถูกถอดรหัสและแปลงกลับเป็นสัญญาณวิทยุเพื่อให้ส่วนรับสัญญาณเข้าใจได้ การใช้เครือข่าย IP สำหรับวิทยุผ่าน IP ช่วยให้ผู้ใช้สามารถสื่อสารในระยะทางที่มากขึ้นและกับผู้คนได้มากกว่าระบบวิทยุสองทางแบบดั้งเดิม แม้ RoIP จะคล้ายกับ Voice over IP (VoIP) แต่ RoIP เพิ่มการสื่อสารทางวิทยุแบบสองทางมากกว่าการโทรศัพท์ โดยที่เทคโนโลยี RoIP ไม่ใช่โครงสร้างที่เป็นกรรมสิทธิ์หรือจำกัดโปรโตคอล แต่เป็นแนวคิดพื้นฐานที่ได้รับการนำไปใช้ในหลายวิธี มีการใช้ระบบต่าง ๆ มากมายในกลุ่มนักวิทยุสมัครเล่นและผู้ผลิตระบบวิทยุเชิงพาณิชย์ เช่น Motorola และ Harris ได้นำ RoIP มาใช้เป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบระบบของตน และมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทยด้วย

หน่วยงานทางทหารและหน่วยงานด้านความมั่นคงแห่งประเทศสหรัฐอเมริกาและสถาบันมาตรฐานและเทคโนโลยีแห่งชาติได้สนับสนุนมาตรฐาน BSI for ROIP เพื่อให้เทคโนโลยี RoIP ทำงานร่วมกันได้ นอกจากนี้ RoIP ยังใช้โปรโตคอล VoIP เพื่อส่งสัญญาณวิทยุผ่านเครือข่าย IP อีกด้วย การทำงานของ RoIP ต้องใช้สัญญาณสองแบบคือ PTT (Push-To-Talk) และ COR (Carrier Operated Relay) เพื่อควบคุมอุปกรณ์และส่งเสียงเข้า-ออกจากวิทยุโดยใช้เครือข่าย IP [1] โดยรวมแล้ว เทคโนโลยี VoIP และ RoIP มีความสำคัญในการเปลี่ยนแปลงวิถีชีวิตของเรา แม้ว่าระบบจะมีข้อจำกัดเมื่อพยายามส่งระบบวิทยุหรือเสียงที่ต้องใช้สัญญาณ COR และ PTT แต่ยังมีการพัฒนาและการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในหลายด้านโดยเฉพาะในสถานการณ์ทางทหารและอื่น ๆ ที่ต้องการการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพและมีความเชื่อถือได้ ตามรูปที่ 1 [2]



รูปที่ 1 ไดอะแกรมระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการเชื่อมต่อสัญญาณวิทยุผ่านโครงข่าย RoIP

3.2 สัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

การหาค่าประสิทธิภาพของสัญญาณเสียงพูดนั้น โดยในงานวิจัยนี้ด้านการประมวลผลสัญญาณเสียงและสัญญาณเสียงพูด ใช้การหาค่าประสิทธิภาพของกำลังสัญญาณจากค่า SNR (Signal to Noise Ratio: SNR) และ PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) ตามสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณอินพุตเทียบกับกำลังสัญญาณเอาต์พุต โดยจะทำให้ทราบถึงคุณภาพของสัญญาณเสียงพูดที่เปลี่ยนแปลงไป อันเนื่องจากการส่งสัญญาณเสียงจากต้นทางไปยังปลายทางได้ [3]

$$SNR = 10 \log \left[\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right] = 20 \log \left[\frac{V_{signal}}{V_{noise}} \right] \quad (1)$$

โดยที่ P_{signal} คือ ค่ากำลังของสัญญาณเสียงอินพุตของชุดต้นแบบ

P_{noise} คือค่ากำลังของสัญญาณเสียงเอาต์พุตของชุดต้นแบบ

V_{signal} คือค่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณเสียงเอาต์พุตของชุดต้นแบบ

V_{noise} คือค่าแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณเสียงเอาต์พุตของชุดต้นแบบ

$$PSNR = 10 \log \left[\frac{NX^2}{\|x-r\|^2} \right] \quad (2)$$

โดยที่ N คือ ความยาวของสัญญาณเสียงเอาต์พุต

X คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองสูงสุด

$\|x-r\|^2$ คือ ความแตกต่างของค่าพลังงานระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต

3.3 การออกแบบการเข้าและถอดรหัสของสัญญาณวิทยุ

การสื่อสารข้อมูลแบบสัญญาณเสียงผ่านระบบวิทยุ ต้องมีการเข้ารหัสสัญญาณเสียงของข้อมูลเพื่อให้สามารถส่งผ่านไปยังอุปกรณ์วิทยุได้ วิธีหนึ่งที่นิยมใช้คือการใช้วิธีการเข้ารหัสแบบแมนเชสเตอร์ (Manchester Encoding) หลักการคือการสื่อสารข้อมูลแบบสัญญาณเสียงผ่านระบบวิทยุ ต้องมีการเข้ารหัสสัญญาณเสียงของข้อมูลเพื่อให้สามารถส่งผ่านไปยังอุปกรณ์วิทยุได้ วิธีหนึ่งที่นิยมใช้คือการ ใช้วิธีการเข้ารหัสแบบ FSK (Frequency Shift Keying) ใช้การเปลี่ยนแปลงความถี่สลับกันเพื่อเข้ารหัสสัญญาณเสียงโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่นี้คือรหัสไบนารี่ (Binary) รหัสเหล่านี้ถูกแฝงไปในความถี่เสียงแล้วนำไปส่งต่อให้กับระบบวิทยุหนือโทรศัพท์มอตดูเลต (Modulation) โดยมีรหัส FSK นี้รวมออกไปด้วย [4]

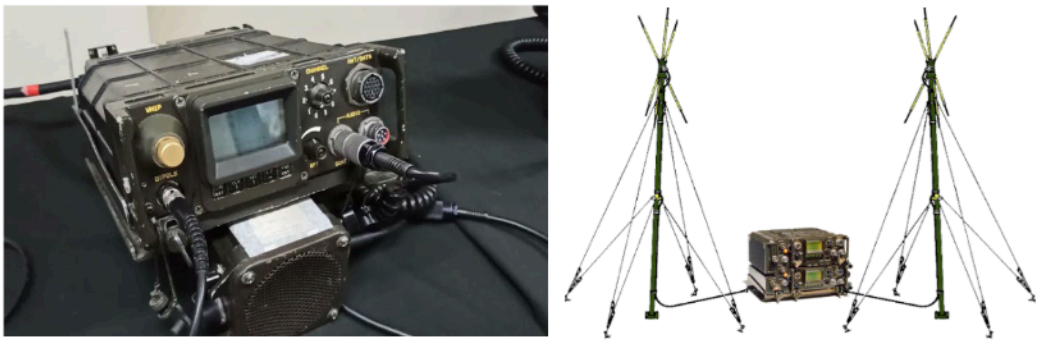
3.4 การออกแบบตัวกรองสัญญาณ

สัญญาณที่รับได้จากชุดวิทยุมักประกอบด้วยสัญญาณที่มีหลายความถี่ การนำไปถอดรหัสและแปลงเป็นข้อมูลที่ต้องการจะต้องกรองความถี่ที่ไม่ต้องการออกไปโดยใช้ตัวกรองแบบ Bandpass Filter (BPF) ที่เป็นวงจรกรองสัญญาณเสียงที่มีความถี่อยู่ในช่วง 300-3400 Hz โดยมีวงจรกรองแบบBPFนี้จะมีสองวงจร โดยวงจรแรกจะทำหน้าที่กรองเสียงให้ได้ความถี่ 300-3400Hz เพื่อนำไปใช้ถอดรหัส Demodulator แยกเสียงกลับออกมาใช้งานเป็นเสียงปกติ ส่วนวงจรที่สองจะแบบ Active BPF จะกรองสัญญาณเสียงที่มีความถี่อยู่ในช่วง 2400-3400 Hz จะนำไปสร้างสัญญาณการกด KEY PTT (Push to Talk) หรือเรียกว่า สัญญาณ COS (Carrier Over Switch) เพื่อจะส่งสัญญาณเสียงที่ถอดรหัสได้ไปให้อุปกรณ์ระบบวิทยุหรือระบบโทรศัพท์ใช้ในการส่งต่อสัญญาณเสียงที่ฟังรู้เรื่องแล้วต่อไป และต้องมีแหล่งจ่ายไฟขนาดตามที่อุปกรณ์เหล่านั้นต้องการ ในส่วนของการนำ Passive Filter การออกแบบจะใช้เพียงอุปกรณ์พื้นฐานคือ ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ มีความง่ายในการพัฒนาต่อยอดแต่อาจจะต้องมีการสูญเสียค่าสัญญาณรบกวนได้เช่นกัน [5,6]

3.5 ชุดวิทยุ CNR - 900

ชุดวิทยุ CNR - 900 เป็นชุดวิทยุในย่านความถี่ VHF/FM ที่ใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในกองทัพบก กองทัพเรือ และกองทัพอากาศ ใช้ในการติดต่อสื่อสารที่มีประจำการ ตั้งแต่ระดับหมวด-กองพลทหารราบ โดยตัวเครื่องรับ-ส่งจะใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 30 - 87.975 MHz โดยมีช่องความถี่ห่างกัน 25 kHz ซึ่งจะทำให้มีช่องสำหรับการติดต่อสื่อสารกันได้ถึง 2,320 ช่อง มีทั้งแบบพกพาสำหรับพนักงานวิทยุ และแบบติดตั้งบนยานยนต์ โดยจะสามารถติดต่อกันได้ประมาณ 35 กิโลเมตร ที่กำลังออกอากาศสูงสุด (50 W) และโหมดการทำงาน 3 โหมด คือ 1. โหมดเสียงกระจ่าง (CLR) 2. โหมดเข้ารหัส (SEC) และ 3. โหมดความถี่ก้าวกระโดด (Frequency Hopping : AJ) โดยในโหมด CLR ใช้หลักการการตั้งค่าความถี่ที่ตรงกันก็สามารถทำการติดต่อสื่อสารได้ แต่ในส่วนของโหมด SEC และ AJ จะมีความเฉพาะของรุ่นชุดวิทยุ CNR เท่านั้นตามรูปที่ 2 (ก)

ปัจจุบันมีเหตุการณ์อุทกภัยหรือเหตุภัยพิบัติเกิดขึ้นบ่อยครั้ง ซึ่งทุกครั้งจะต้องใช้บุคลากรและยุทโธปกรณ์หลายหน่วยงานเพื่อมาช่วยเหลือประชาชนหรือผู้ที่ได้รับผลกระทบเป็นจำนวนมาก เช่นเหตุการณ์สึนามิในปี 2547 ที่มีทั้งเจ้าหน้าที่ตำรวจ ทหาร เจ้าหน้าที่ของกรมป้องกันและบรรเทาสาภารณภัย และมูลนิธิต่าง ๆ ซึ่งการติดต่อสื่อสารเป็นไปอย่างยากลำบากและมีข้อจำกัดหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นที่ตั้งของศูนย์วิทยุที่จะต้องไม่มีสิ่งกีดขวางมาบดบังคลื่นวิทยุ ระบบโทรคมนาคมไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ หน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้โดยตรง จึงทำให้การติดต่อประสานงานล่าช้าและไม่ทันต่อสถานการณ์ที่ต้องช่วยเหลือ การแก้ปัญหาดังกล่าวอาจใช้วิธีเพิ่มสถานีส่งต่อสัญญาณ (Retransmission) เพื่อเพิ่มระยะการติดต่อสื่อสารให้ได้มากขึ้น ตามรูปที่ 2 (ข) แต่ก็ทำได้ยาก เนื่องจากทุกหน่วยงานมีอุปกรณ์อย่างจำกัด [7]



(ก) (ข)

รูปที่ 2 ชุดวิทยุ CNR – 900 และการจัดตั้งสถานีส่งต่อสัญญาณ

3.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

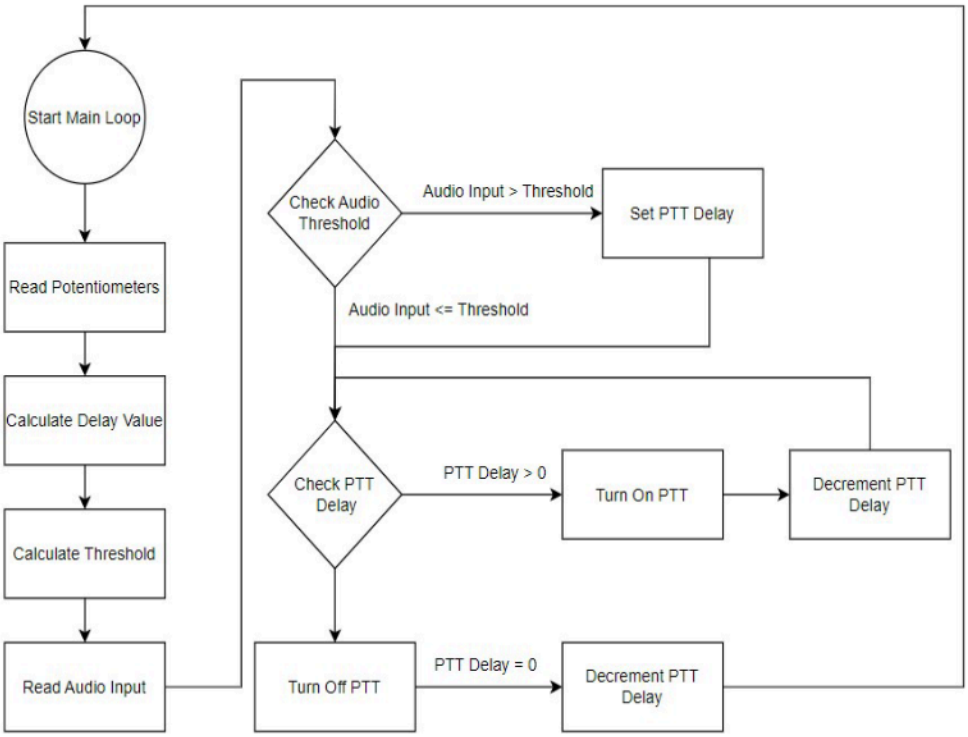
ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและงานวิจัยที่เคยเกี่ยวข้องกับการออกแบบและพัฒนาต้นแบบชุดเชื่อมต่อวิทยุทหารรุ่น CNR 900 ทั้งใช้งานในย่านคลื่น VHF/FM (30 - 87.95MHz) เป็นย่านความถี่ทางทหารของกองทัพบกที่ใช้งาน

การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ในการส่งและอุปกรณ์ในการรับข้อมูลดิจิตอลสำหรับวิทยุทางทหารรุ่น AN/PRC-77 โดย พันเอก ผศ.ดร.ผเดิม หนังสือ วารสาร โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าปีที่ 11 สำหรับวิทยุทางทหารรุ่น AN/PRC-77 เป็นการเปิดช่องทางการติดต่อสื่อสารแบบดิจิตอลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ปลายทางสองเครื่อง (Machine to Machine) แทนที่การใช้มนุษย์ในการสื่อสาร (Man to Man) ซึ่งสามารถส่งข้อมูลได้รวดเร็วกว่า ผิดพลาดน้อยกว่า และกระทำได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากไม่ใช้กำลังพลในการทำงานผลลัพธ์เป็นอุปกรณ์รับ/ส่งข้อมูลดิจิตอลที่มีประสิทธิภาพเป็นที่น่าพึงพอใจสำหรับวิทยุรุ่นนี้ โดยสามารถรับ/ส่งข้อมูลในภูมิประเทศจริงได้ระยะสูงสุด 5.9 ก.ม [5]

ในการพัฒนาชุดสาธิตทางทหารในการส่งสัญญาณแสงด้วยเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา โดย พ.ต. ชนะจันทร์อิ่ม วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ 2564 ในการส่งสัญญาณที่ถูกมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งทางเวลา ไปบนระบบการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงสามารถทำการรับ-ส่ง ข้อมูลผ่านเครื่องวิทยุถ่ายทอดทางยุทธวิธี รุ่น RL 422A ที่จะวิเคราะห์ข้อมูลดิจิทัลทั้ง 4 สัญญาณ สามารถถูกปรับค่าความถี่ได้และสามารถรวมสัญญาณในรูปแบบการมัลติเพล็กซ์แบบ TDM อีกทั้งสามารถนำ Eye diagram มาวิเคราะห์และคำนวณหาค่า BER ได้และทำการประยุกต์ใช้กับเครื่องวิทยุถ่ายทอดทางยุทธวิธี รุ่น RL 422A ในโหมด TDM ได้คำนวณหาค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER) เพื่อเป็นการตรวจสอบสถานภาพของยุทโธปกรณ์ที่พร้อมใช้งานได้เช่นกัน [8] ซึ่งทางผู้วิจัยสามารถนำเทคนิคการวิเคราะห์ค่า BER ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับการหาค่าประสิทธิภาพของกำลังสัญญาณจากค่า(SNR)ในระบบสัญญาณวิทยุ ดังกล่าวเช่นกัน

4. การดำเนินการวิจัย

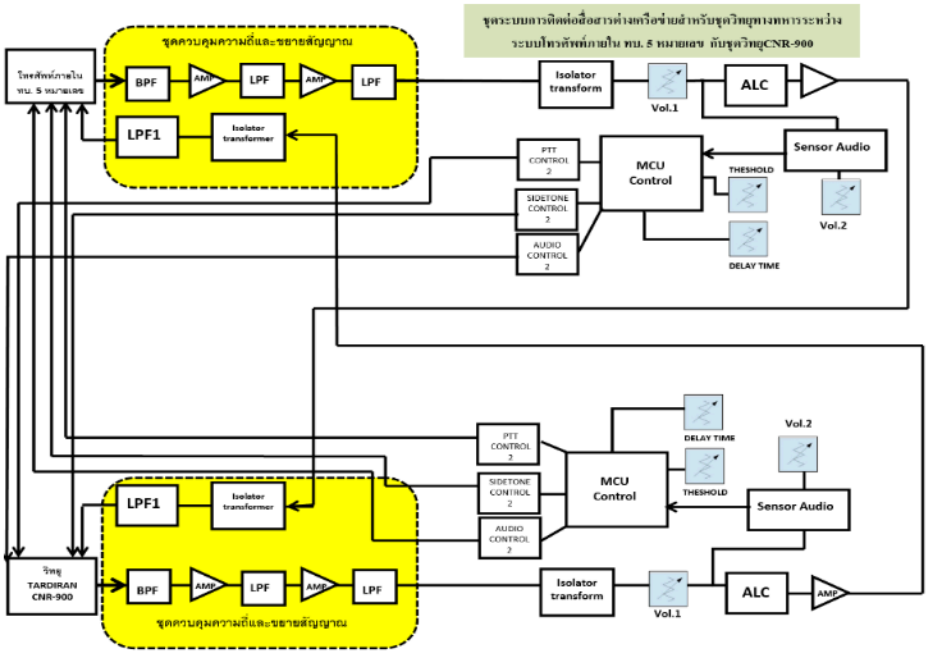
การดำเนินการออกแบบและพัฒนาต้นแบบชุดเชื่อมต่อวิทยุทางทหารหลักการเรดิโอโอเวอร์ไอพี สำหรับรับส่งสัญญาณระหว่างชุดวิทยุทหารแบบ CNR 900 กับระบบโทรศัพท์ภายใน 5 ตัว โดยได้ออกแบบการทำงานของระบบต้นแบบชุดเชื่อมต่อวิทยุทางทหารหลักการเรดิโอโอเวอร์ไอพี โดยที่ระบบ Radio Over IP ใช้การตรวจสอบค่าเสียงที่ได้รับและเปรียบเทียบกับค่า Threshold ที่กำหนดไว้ หากเสียงที่ได้รับสูงกว่าค่า Threshold จะเริ่มตั้งค่า PTT Delay และเปิดการใช้งาน PTT เมื่อค่า PTT Delay น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0 จะทำการปิด PTT และกลับเข้าสู่ loop หลักเพื่อตรวจสอบเสียงใหม่อีกครั้ง ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 ไอดะแกรมหลักการทำงานของเรดิโอโอเวอร์ไอพี

4.1 การออกแบบและจัดทำต้นแบบชุดเชื่อมต่อวิทยุทางทหารหลักการเรดิโอโอเวอร์ไอพี

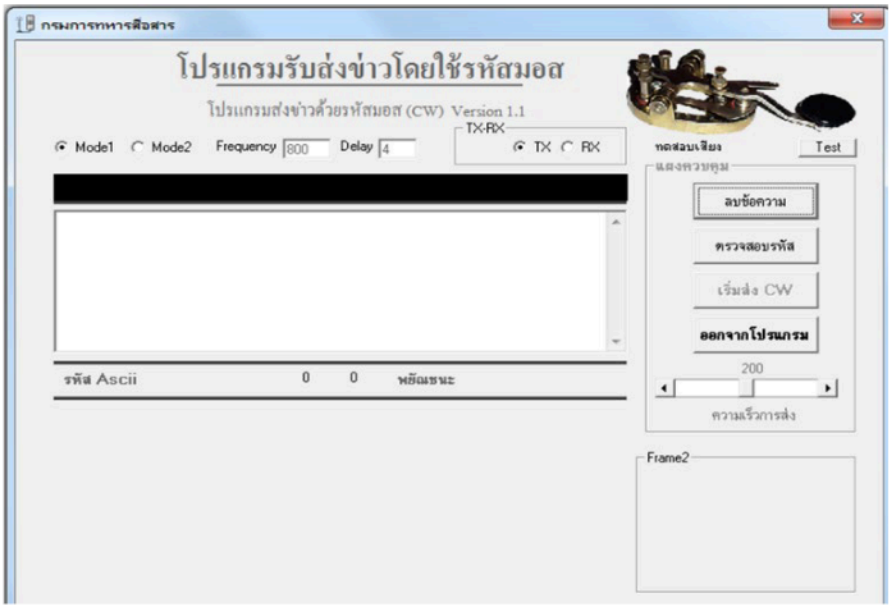
ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างต้นแบบชุดเชื่อมต่อวิทยุทางทหารหลักการเรดิโอโอเวอร์ไอพี (RoIP) สำหรับรับส่งสัญญาณระหว่างชุดวิทยุทหารแบบ CNR 900 กับระบบโทรศัพท์ภายใน 5 ตัว โดยคณะผู้วิจัยจัดทำร่างแบบหลักการทำงานวงจรต้นแบบดังกล่าว ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 การออกแบบหลักการทำงานวงจรต้นแบบชุดเชื่อมต่อวิทยุทางทหาร โดยใช้เครือข่าย RoIP

4.2 การออกแบบโปรแกรมการรับส่งข่าวด้วยรหัสมอส

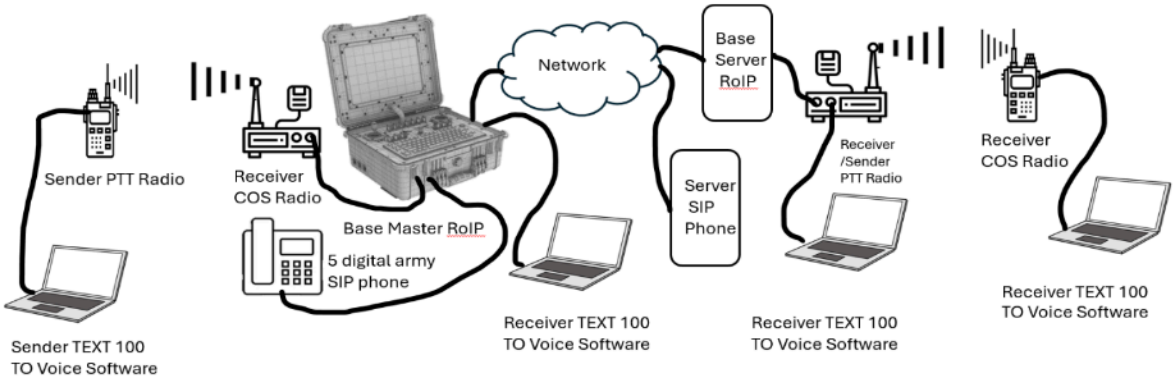
ผู้วิจัยได้ประยุกต์การทดสอบการรับส่งสัญญาณรหัสมอส ผ่านโปรแกรมการรับส่งรหัสมอสทางทหารที่พัฒนาขึ้น เพื่อทดสอบระบบการประมวลผลความแม่นยำและเสถียรภาพของระบบ โดยการประมวลผลสัญญาณเสียงที่ได้รับจากสัญญาณวิทยุแบบ Adaptive หลังจากสัญญาณผ่าน Differential Amplifier โดยทำการหาค่าเฉลี่ยของระดับสัญญาณวิทยุที่ได้รับอย่างต่อเนื่องแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่อ่านได้เพื่อพิจารณาตามรูปแบบ Manchester Encoding and Decoding ให้เป็นรหัส NRZ (Non Return to Zero) ให้ข้อมูลที่ได้รับคือ 0 หรือ 1 ในทำนองเดียวกันกับการรับ-ส่งรหัสสัญญาณเสียงผ่านวิทยุของรหัสมอสที่มี 2 ค่าเช่นกัน คือ ดิ (Di) และ ดา (Dah) โดยทำการออกแบบโปรแกรมการรับ-ส่งสัญญาณเสียงรหัสมอสผ่านวิทยุ ตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 โปรแกรมการรับส่งข่าวด้วยรหัสมอส

4.3 วิธีการทดสอบการทำงานของชุดต้นแบบ

การทดสอบการทำงานของชุดต้นแบบชุดเชื่อมต่อวิทยุทางทหารหลักการเรดิโอโอเวอร์ไอพี สำหรับรับส่งสัญญาณระหว่างชุดวิทยุทหารแบบ CNR 900 กับระบบโทรศัพท์ภายใน 5 ตัว โดยทำการเปิดเครื่องรับ (ชุดวิทยุ CNR 900) จำนวน 3 เครื่อง เชื่อมต่อกับชุดต้นแบบและเครื่องส่ง (โทรศัพท์ภายในกองทัพบก แบบ 5 ตัว) แล้วสังเกตผลข้อมูลที่ได้รับจากโปรแกรมและการวัดค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR) ทางฝั่งผู้รับ ตามรูปที่ 6

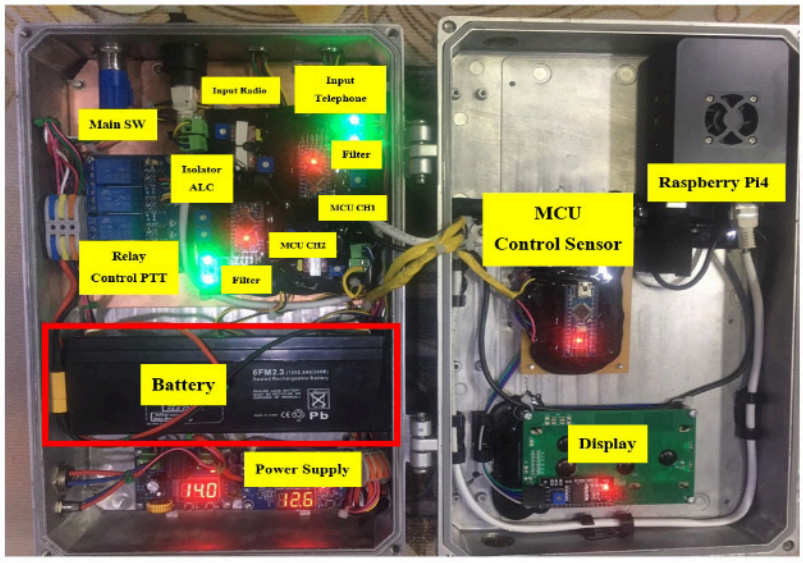


รูปที่ 6 การออกแบบการทดสอบการทำงานของชุดต้นแบบ

5. ผลการวิจัย

5.1 ชุดสาธิตที่เสร็จสมบูรณ์

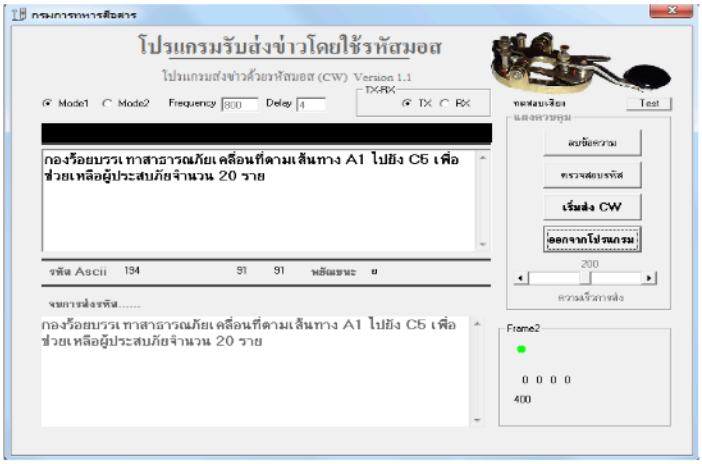
การพัฒนาชุดต้นแบบชุดเชื่อมต่อวิทยุทางทหารหลักการเรดิโอโอเวอร์ไอพีที่เสร็จสมบูรณ์ โดยสามารถรองรับการทำเชื่อมต่อกับชุดวิทยุทหารแบบ CNR 900 และโทรศัพท์ เข้ากับไมโครโพรเซสเซอร์ Raspberry Pi4 แล้วทำการกรองสัญญาณเสียงแบบ CMOS Wideband เพื่อเชื่อมผ่านไปยังระบบโทรศัพท์ภายในกองทัพบกได้ อีกทั้งการเชื่อมต่อระบบ RoIP เข้ากับโครงข่ายอินเทอร์เน็ตภายในผ่าน Mikrotik ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เข้าสู่ Sever ภายในบนระบบปฏิบัติการ Linux มีลักษณะรูปแบบภายนอกและอุปกรณ์บรรจุชุดสาธิตดังกล่าว ตามรูปที่ 7



รูปที่ 7 ชุดต้นแบบชุดเชื่อมต่อวิทยุทางทหารหลักการเรดิโอโอเวอร์ไอพี

5.2 ผลการทดสอบของการทำงานผ่านโปรแกรมการรับส่งข่าวด้วยรหัสมอส

ในการทดลองนี้ เพื่อให้ทราบถึงความชัดเจนของสัญญาณเสียงผ่านระบบวิทยุที่สามารถถอดรหัสที่ได้รับจากภาคส่งสัญญาณผ่านเสียงสัญญาณภาคส่งไปยังทั้ง 3 ชุดวิทยุและทำการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงค่าข้อความที่ใช้ส่งมายังภาครับ เพื่อให้สามารถวัดมาตรฐานระดับเสียงของภาครับที่อยู่ในระดับเดียวกันเสมอ ดังนั้นผลที่ได้จากการทดสอบส่งสัญญาณทั้งข้อความภาษาไทย ภาษาอังกฤษ และตัวเลข ระบบของชุดต้นแบบสามารถถอดรหัสสัญญาณได้ทุกคำตรงกับข้อความของภาคส่ง ตามรูปที่ 8



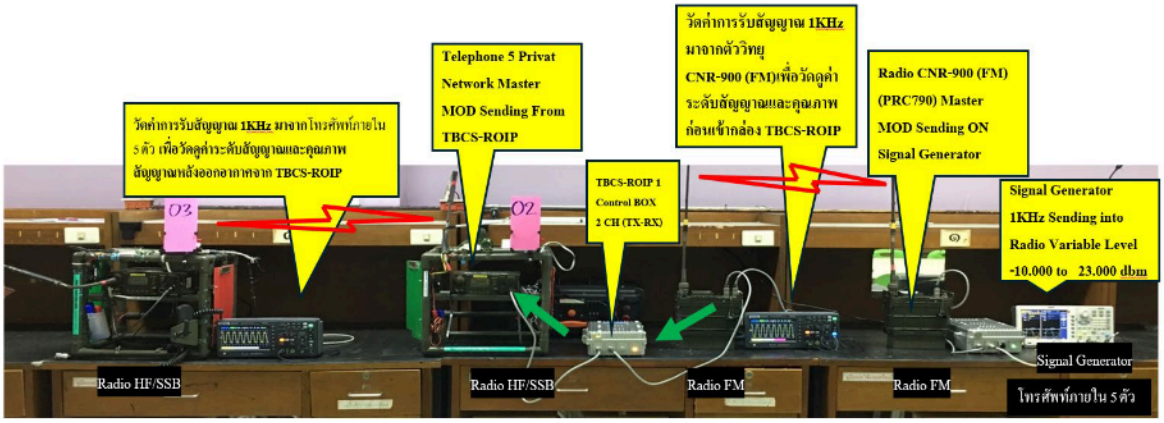
รูปที่ 8 ผลการส่งสัญญาณเสียงผ่านชุดต้นแบบผ่านชุดวิทยุ CNR 900

5.3 ผลการทดสอบของความสัมพันธ์ของ SNR

ผู้วิจัยทำการบันทึกค่าการวัดระดับสัญญาณและคุณภาพเพื่อให้ตรงตามคุณลักษณะการใช้งานของวิทยุทางทหาร โดยเมื่อผ่านการส่งผ่านสัญญาณแล้วจากชุดต้นแบบเชื่อมต่อระบบชุดวิทยุ (TBCS-ROIP) ตามตารางที่ 1 แสดงถึงความสัมพันธ์เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังสัญญาณอินพุตเทียบกับกำลังสัญญาณเอาต์พุต โดยจะทำให้ทราบถึงคุณภาพของสัญญาณเสียงพูดที่เปลี่ยนแปลงไป อันเนื่องจากการส่งสัญญาณเสียงจากต้นทางไปยังปลายทางได้ โดยแสดงการทดสอบของชุดต้นแบบชุดเชื่อมต่อวิทยุทางทหารหลักการเรดิโอโอเวอร์ไอพี สำหรับรับส่งสัญญาณระหว่างชุดวิทยุทหารแบบ CNR 900 กับระบบโทรศัพท์ภายใน 5 ตัว ตามรูปที่ 9

ตารางที่ 1 บันทึกค่าในการวัดระดับสัญญาณและคุณภาพการใช้งานรับส่งสัญญาณชุดต้นแบบ

Generated Feq.	SCOPE 1 Source		SCOPE 2 Noise		20*log (V_in/V_noise)
Amplitude	SC1 Freq (KHz)	Voltage_in (mV)	SC2 Freq KHz	Voltage_Noise (mV)	SNR_dBm
-4	0.990.49	209.19	0.99604	11.52	25.18176882
-2	0.998	219.67	0.998	12.06	25.20846884
-1	0.990.49	212.19	0.998	11.19	25.55789653
0	0.99602	219.39	0.9901	11.54	25.58022039
2	0.998	217.69	0.99606	12.09	25.10824357
4	0.990.49	216.29	0.998	12.12	25.03067642



รูปที่ 9 การทดสอบในการวัดค่า SNR ในแต่ละชุดวิทยุ CNR 900 ที่เชื่อมต่อกับชุดต้นแบบ

จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 1 จะแสดงให้ถึงการนำชุดต้นแบบโครงการวิจัยนี้ไปใช้กับกับระหว่างชุดวิทยุทหารแบบ CNR 900 กับระบบโทรศัพท์ภายใน 5 ตัว ผ่าน Scope เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าของขาเข้าต้นแบบและออกจากชุดต้นแบบไปยังชุดวิทยุที่ติดตั้งสังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของค่า Amplitude กับความถี่ 1 KHz ซึ่งอัตราส่วน สัญญาณเสียงต่อสัญญาณรบกวน ยิ่งห่างกันมาก เสียงยิ่งดี-ยิ่งชัดเจนมากขึ้นเท่านั้น สำหรับสัญญาณเสียงผ่านวิทยุ CNR 900 ไปยังชุดโทรศัพท์ภายใน 5 ตัว ทั้งนี้ตามที่ผู้วิจัยได้ทำการถ่ายทอดองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยและทำการเรียนการสอนสำหรับการทำงานให้สอดคล้องกับหลักการใช้งานชุดวิทยุทหารที่กองทัพบกมีใช้งานปัจจุบัน ผลการสอบผ่านการทำข้อสอบก่อนและหลังการรับฟังการอบรม จำนวน 4 ชั่วโมง ให้กับกำลังพลที่เข้ารับการศึกษาภายในโรงเรียนทหารสื่อสาร กรมการทหารสื่อสารทั้ง 6 หลักสูตรคือ

1. หลักสูตรชั้นนายร้อย เหล่าสื่อสาร รุ่นที่ 65 จำนวน 60 นาย
2. หลักสูตรนายสิบอาวุโส เหล่าสื่อสาร (ผ่านสื่ออิเล็กทรอนิกส์) รุ่นที่ 12 จำนวน 60 นาย
3. หลักสูตรนายสิบชั้นต้น เหล่าสื่อสาร (ผ่านสื่ออิเล็กทรอนิกส์) รุ่นที่ 8 จำนวน 70 นาย
4. หลักสูตรนักเรียนนายสิบกองทัพบก เหล่าสื่อสาร รุ่นที่ 26/65 จำนวน 100 นาย
5. หลักสูตรนายสิบอาวุโสเหล่าสื่อสารผ่านสื่ออิเล็กทรอนิกส์ (หลักสูตรเร่งรัด) รุ่นที่ 1 จำนวน 75 นาย
6. หลักสูตรนายสิบอาวุโสเหล่าสื่อสารผ่านสื่ออิเล็กทรอนิกส์ (หลักสูตรเร่งรัด) รุ่นที่ 2 จำนวน 80 นาย

จากที่กำลังพลส่วนใหญ่ ทำผลการทดสอบก่อนเรียนจะมีค่าเฉลี่ยของคะแนนอยู่ 25.87 คะแนนจากข้อสอบ 50 ข้อ (ข้อละ 1 คะแนน) แต่เมื่อทำการอบรมพร้อมกับถ่ายทอดองค์ความรู้ ผลที่ได้จากงานวิจัยที่สอดคล้องกับยุทโธปกรณ์สื่อสารของหน่วยต่าง ๆ ที่มีการใช้งานอยู่ ค่าคะแนนเฉลี่ยอยู่ที่ 37.43 คะแนน

6. สรุป

การพัฒนาชุดต้นแบบชุดเชื่อมต่อวิทยุทางทหารหลักการเรดิโอโอเวอร์ไอพี ในการรับส่งสัญญาณเสียงผ่านวิทยุ CNR 900 ทำการเชื่อมต่อกับระบบโทรศัพท์ภายใน 5 ตัว โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพของสัญญาณเสียงผ่านโปรแกรมการถอดรหัสมอส ที่ยืนยันการถอดรับสัญญาณได้ทั้งฝั่งวิทยุและโทรศัพท์ ทั้งเป็นลักษณะของข้อความภาษาไทย ภาษาอังกฤษ และตัวเลขได้ถูกต้องทุกคำ อีกทั้งทำการทดสอบหาความสัมพันธ์ของกำลังสัญญาณอินพุตเทียบกับกำลังสัญญาณเอาต์พุต โดยจะทำให้ทราบถึงคุณภาพของสัญญาณเสียงพูดที่ผ่านต้นแบบดังกล่าวไปยังวิทยุทหารแบบ CNR 900 เปลี่ยนแปลงไปจากค่า SNR ตามตารางชี้ให้เห็นถึง ค่าความ SNR สูงๆ ถือว่าเป็นการรับส่งที่ดีแต่ไม่ควรต่ำกว่า 25 dBm

7. กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยชุดต้นแบบชุดเชื่อมต่อวิทยุทางทหารหลักการเรดิโอโอเวอร์ไอพีผ่านวิทยุทหารรุ่น CNR 900 สำเร็จลุล่วงด้วยดีนั้น ต้องขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ในส่วนของ ทบ. ประจำปีงบประมาณ 2567 ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จ

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Ivany, S., Denny, I., Nina, L., Kusmadi., H., Mistialustina. & Rudy, G. (2021). Implementation of Radio Over Internet Protocol Gateway for Police Station in Mountainous and Uncovered Areas, Proceedings of the 15th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (26-30). Bali: Indonesia.

[2] Amasiri, Watchara. (2016). Development of Prototypical Portable Radio Communication Range Extender System Using Simplex Repeater Technique, The Second Asian Conference on Defence Technology & The First Pacific Rim International Workshop (31-34). Chiang Mai: Thailand.

[3] Mysore, S., & Morbi, Z. (2012). SNR and BER degradation of upstream RFoG signals due to accumulated RIN and shot noise of off-state R-ONUs, Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference. California: USA.

[4] มังคลา ม่วงรัตน์. (2552). การวัดแพร่กระจายสัญญาณวิทยุย่านคลื่นความถี่สูงยิ่งในลานจอดรถ. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา).

[5] พันเอก ผศ.ดร.ผเดิม หนังสือ. (2556). การพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ในการส่งและอุปกรณ์ในการรับข้อมูลดิจิตอลสำาหรับวิทยุทางทหารรุ่น AN/PRC-77. *วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า*. 11: 11-19.

[6] Mastura, O., Nor Affida, M.Z, Zatul, I.A.L, & Nur, A.I. (2016). Review on design of on chip band pass filter for radio frequency applications. Proceedings of the 7th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (148-152). Shah Alam: Malaysia.

[7] อนุรักษ์ วงษ์พระจันทร์. (2565). **คู่มือราชการสนาม รส 24-18 เทคนิคการใช้วิทยุสนาม แผนกการสื่อสารประเภทวิทยุและการสงครามอิเล็กทรอนิกส์ กรมการทหารสื่อสาร.** กรุงเทพมหานคร: กรมยุทธศึกษาทหารบก.

[8] ชนะ จันทร์อิ่ม. (2564). ชุดสาธิตทางทหารในการส่งสัญญาณแสงด้วยเทคนิคการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ*, 17(2): 1-16.

การประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์และการหาสูตรผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส เพื่อการฆ่าเชื้อโรคสำหรับใช้ภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

Equipment Invention and Protocol Production of Hypochlorous Acid Solution for Disinfection Using in Chulachomklao Royal Military Academy

Received: March 25,2024
Revised: September 4,2024
Accepted: September 14,2024

[1*]ภัทรพล คงสุข และ [2#]สุทธบถ ซื่อมาก

[1*]กองวิชาเคมี ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

[2#]กองวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

[1*]Pattarapol Khongsuk and [2#]Suttabot Suemark

[1] Department of Chemistry, Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy

[2] Department of Environmental Science, Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy

[*]pattarapol.kh@crma.ac.th, [#]suttabot.sue@crma.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์และหาสูตรผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส (HOCl) จากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีอิเล็กโทรลิซิสของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกิดเป็นสารละลายกรดไฮโปคลอรัสที่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสำหรับใช้ภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (รร.จปร.) โดยผู้วิจัยได้ประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ขนาดถังความจุ 12 ลิตร พร้อมจัดหาวัสดุอุปกรณ์ส่วนประกอบและสารที่ใช้ตลอดจนเครื่องมือสำหรับการตรวจวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของสารละลายที่หาซื้อได้ง่ายและต้นทุนต่ำ จากนั้นทำการหาสูตรผลิตที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นคู่มือของชุดอุปกรณ์นี้ ผลจากการวิจัยพบว่า เมื่อใช้สูตรที่เตรียมสารละลายตั้งต้น คือ (1) น้ำประปา รร.จปร. ปริมาตร 10 ลิตร (2) เกลือโซเดียมคลอไรด์ 1%w/v และ (3) น้ำส้มสายชู (5% กรดแอซิติก) 0.3%v/v แล้วให้ไฟฟ้ากระแสตรง 12V, 5A เป็นเวลาอย่างน้อย 35 นาที จะได้สารละลายกรดไฮโปคลอรัสที่ความเข้มข้นของคลอรีนที่มีค่าอยู่ (ACC) ที่ 200 ppm ค่า pH 4.51 ซึ่งค่า pH ที่ได้พบว่าอยู่ในรูป HOCl ทั้งหมดหรือคิดเป็นร้อยละร้อยของคลอรีนที่มีค่าอยู่ (100%ACC) และมีค่าความต่างศักย์ของการออกซิไดซ์-การรีดิวซ์ (ORP) มีค่า +934 mV ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียงพอในการฆ่าเชื้อโรค ดังนั้นชุดอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นพร้อมสูตรผลิตสามารถนำมาใช้งานได้

คำสำคัญ: การประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์, การฆ่าเชื้อ, กรดไฮโปคลอรัส, อิเล็กโทรลิซิส, โซเดียมคลอไรด์

Abstract

The purposes of this research include: to invent an equipment set and to produce a protocol for generating Hypochlorous acid (HOCl) solution from electrochemical reaction by using electrolysis of Sodium chloride solution (NaCl) to obtain HOCl solution, which is effective in disinfection for using in Chulachomklao Royal Military Academy (CRMA). A researcher has invented equipment set, a tank capacity of 12 liters, providing easily available and low-cost materials, tools, and substances, including qualitative and quantitative analysis of HOCl solution, and has produced a suitable formula to use as protocol for this equipment set. The results of the research found that using a formula of the starting solution, which is (1) tap water produced by CRMA, 10 liters (2) NaCl 1%w/v and (3) vinegar (5% Acetic acid) 0.3%v/v and then provide current of 12V, 5A DC at least 35 minutes to obtain HOCl solution. The HOCl solution has an approximately available chlorine concentration (ACC) of 200 ppm at pH 4.51, which this pH-value has found to be all the HOCl species or one hundred percentage of available chlorine concentration (100%ACC). Oxidation-reduction potential (ORP) is +934 mV, which is effective enough to disinfect. Therefore, this invented equipment set with the protocol for generating HOCl solution can be practical.

Keywords: to Invent an Equipment Set, Disinfection, Hypochlorous Acid, Electrolysis, Sodium Chloride

1. บทนำ

จากสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 หรือโรคโควิด-19 (Coronavirus Disease 2019, COVID-19) ที่ผ่านมา [1] และนโยบายจากผู้บังคับบัญชาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า ในการป้องกันเชื้อโรคโดยการรักษาความสะอาดวัสดุอุปกรณ์และสถานที่ที่ต้องสัมผัส ซึ่งสารที่ใช้เพื่อทำการฆ่าเชื้อโรคทั่วไปที่มีการใช้อยู่ ได้แก่ เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol; CH_3CH_2OH) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 70 และน้ำยาฟอกขาว (Bleach) หรือสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรท์ (Sodium hypochlorite solution; NaOCl) นั้น ยังมีข้อจำกัดบางประการของสารข้างต้น เช่น การจัดซื้อจัดหา การใช้สารได้เฉพาะในบางพื้นที่ หรือความเป็นพิษจากสารที่ใช้ จึงจำเป็นต้องหาสารประเภทอื่นเพื่อเป็นทางเลือกในการใช้เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว

สารละลายกรดไฮโปคลอรัส (Hypochlorous acid solution; HOCl) จัดเป็นสารละลายที่น่าสนใจเพื่อเป็นทางเลือกในการนำมาใช้งาน โดยเตรียมจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) ด้วยวิธีอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) ของสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) [2] เนื่องจากขั้นตอนการเตรียมสารที่ใช้และการผลิตสารละลายไม่ยุ่งยากซับซ้อนและสามารถผลิตได้ง่ายและรวดเร็ว อีกทั้งคุณสมบัติของสารละลายที่ได้ที่ไม่เป็นพิษ มีความเสถียร ราคาไม่แพง และมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน [3] ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของสารละลายกรดไฮโปคลอรัสที่ผลิตได้มีดังนี้ (1) ค่าความสามารถฆ่าเชื้อดูจากค่าความต่างศักย์ของการออกซิไดซ์-การรีดิวซ์ (Oxidation-Reduction Potential; ORP) พบว่าค่า ORP > +848 mV จะมีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรคได้ [4], (2) ความเข้มข้นคลอรีนที่มีค่าอยู่ (Available Chlorine Concentration; ACC) ที่สนใจในรูปกรดไฮโปคลอรัสเพียงชนิดเดียว จากคลอรีนที่มีค่าอยู่ที่พบได้อีก 2 ชนิด ได้แก่ ก๊าซคลอรีน (Chlorine gas; Cl_2) ในรูปสารละลายและไฮโปคลอไรท์ไอออน (Hypochlorite ion; ClO^-) และ (3) ช่วงค่า pH ระหว่าง 4–5.33 ที่กำหนดปริมาณร้อยละของความเข้มข้นคลอรีนที่มีค่าอยู่ (%ACC) ที่ต้องการ คือ 100% HOCl [5]

การศึกษารายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของสารละลายกรดไฮโปคลอรัสในการฆ่าเชื้อโรค จากงานวิจัยของ McKenna และ Davies (1988) [6] ได้ออกแบบและศึกษากรดไฮโปคลอรัสในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย *Escherichia coli* โดยพบว่าความเข้มข้นที่ต่ำของกรดไฮโปคลอรัสสามารถออกฤทธิ์อย่างรวดเร็วและยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและการแบ่งเซลล์ได้ ซึ่งที่ความเข้มข้น 20 μM-HOCl สำหรับการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้

50% (5 x 10^8 *E. coli*/mL) และที่ความเข้มข้น 50 µM-HOCl สามารถยับยั้งการแบ่งเซลล์อย่างสมบูรณ์ (การก่อตัวของโคโลนี) เห็นผลชัดเจนภายใน 5 นาที ของการสัมผัสกรดไฮโปคลอรัส งานวิจัยของ วิยดา และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาโดยนำสารละลายกรดที่เตรียมได้มาทดสอบคุณสมบัติการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ผลการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีพบว่า ORP มีค่า +1,090.50±29.62 mV, คลอรีนอิสระ 136.50±6.40 ppm และสารละลายมีคุณสมบัติเป็นกรดที่ pH 2.45±0.08 ผลที่ได้แสดงการเป็นสารที่สามารถฆ่าเชื้อได้ และการศึกษาของ Block และ Rowan [8] รายงานว่าสำนักงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อมแห่งสหรัฐอเมริกา ได้แนะนำสารฆ่าเชื้อสำหรับต้านโควิด-19 รวมถึงกรดไฮโปคลอรัส ซึ่งพิสูจน์แล้วว่าสามารถยับยั้งไวรัสหลายชนิดรวมถึงเชื้อโคโรนาไวรัส โดยกรดไฮโปคลอรัสมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อบริเวณพื้นผิวสัมผัสที่มีเชื้อโคโรนาไวรัสได้ภายในเวลาสัมผัส 1 นาที ที่ความเข้มข้น 200 ppm

สำหรับการผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัสในปัจจุบัน มีการผลิตเป็นชุดอุปกรณ์ผลิตที่วางจำหน่ายในท้องตลาดตั้งแต่ชุดอุปกรณ์ผลิตที่มีความซับซ้อนขนาดถังความจุปริมาตรในหน่วยมิลลิลิตรถึงขนาดถังความจุมากกว่า 1 ลิตร [9-14] จนถึงชุดอุปกรณ์ผลิตที่ใช้ในครัวเรือนซึ่งประชาชนทั่วไปที่มีความสนใจสามารถประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ขึ้นมาใช้งานได้เอง [15-17] เพราะสามารถหาซื้อวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือได้ง่ายและในราคาต้นทุนต่ำ จากประโยชน์และความเป็นไปได้ในขั้นตอนของการผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัสทำให้ได้รับการสนับสนุนจากผู้บังคับบัญชา เพื่อให้โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (รร.จปร.) สามารถผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัสไว้ใช้งานได้เองจากชุดอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นใช้เอง เพื่อใช้เป็นสารทางเลือกในการทำความสะอาดเพื่อฆ่าเชื้อโรคต่าง ๆ รวมถึงเชื้อโรคโควิด-19 [8-9,18-19] บนพื้นผิวสัมผัสของวัสดุอุปกรณ์และสถานที่ภายใน รร.จปร. และสามารถนำความรู้ของการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ไปถ่ายทอดให้กับหน่วยขึ้นตรง รร.จปร. และหน่วยทหารที่สนใจ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการจัดทำขั้นตอนการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัสที่ประดิษฐ์ขึ้นใช้เองปริมาตร 10 ลิตร จากขนาดถังที่ความจุ 12 ลิตร ที่ใช้งานได้จริงพร้อมทั้งทำการรายงานต้นทุนการผลิตชุดอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้น และทำการหาสูตรการผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัสจากชุดอุปกรณ์ผลิตดังกล่าว

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อแสดงราคาต้นทุนและขั้นตอนการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัสที่ประดิษฐ์ขึ้นใช้เองสำหรับใช้ฆ่าเชื้อโรคภายใน รร.จปร.

2.2 เพื่อหาสูตรการผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัสจากชุดอุปกรณ์โดยใช้น้ำประปา รร.จปร. ในขั้นตอนการผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส

3. ขอบเขตงานวิจัย

3.1 งานวิจัยนี้ศึกษาข้อมูลของชุดอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายและที่ประดิษฐ์ขึ้นใช้เอง และนำมาออกแบบตามหลักการและองค์ประกอบของชุดอุปกรณ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการชุดอุปกรณ์ที่สามารถผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัสที่ปริมาตร 10 ลิตร จากขนาดถังที่ความจุ 12 ลิตร

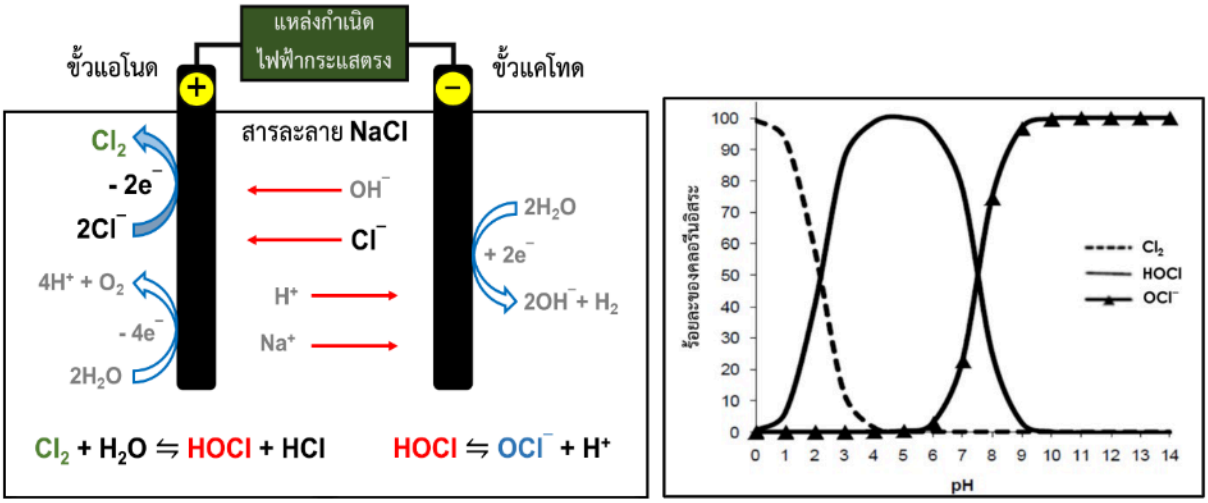
3.2 งานวิจัยนี้ทำการจัดซื้อวัสดุอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ง่ายและราคาถูก เพื่อให้ได้ต้นทุนในการผลิตที่ต่ำสามารถผลิตเป็นจำนวนมากได้ และการซื้อเครื่องมือสำหรับการตรวจวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ได้แก่ (1) ค่า pH (2) ค่า ACC และ (3) ค่า ORP ของสารละลายกรดไฮโปคลอรัสตามที่กำหนด

3.3 งานวิจัยนี้ได้ทำการหาสูตรการผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส กำหนดใช้น้ำประปา รร.จปร. จากอาคารกองวิชาเคมี ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (น้ำประปา เคมี สกศ.รร.จปร.) ในขั้นตอนการผลิต และทำการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเกิดสารละลาย ได้แก่ (1) ปริมาณร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร (%w/v) ของเกลือ NaCl ที่ใช้ (2) ปริมาณร้อยละโดยปริมาตร (%v/v) ของน้ำส้มสายชูที่ใช้เพื่อเป็นบัฟเฟอร์ในการควบคุมค่า pH และ (3) เวลาที่ให้กระแสไฟฟ้า

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

4.1 กระบวนการผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส

การผลิตสารละลายกรดกรดไฮโปคลอรัสใช้หลักการทางไฟฟ้าเคมี ตามรูปที่ 1 ก. เริ่มจากการเกิดอิเล็กโทรลิซิสของสารละลายเกลือ NaCl ที่มีความเข้มข้นต่ำประมาณร้อยละ 0.5–5 w/v [20] เมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วอิเล็กโทรดซึ่งประกอบด้วยขั้วแคโทดหรือขั้วลบและขั้วแอโนดหรือขั้วบวก โดยให้กระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current, AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current, DC) (Output: ความต่างศักย์ไฟฟ้า 9–10V, กระแสไฟฟ้า 8–10A DC) ให้กับสารละลายดังกล่าวเกิดปฏิกิริยาเคมีในสารละลายซึ่งเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ เมื่อเกลือ NaCl ละลายในน้ำแล้วจะแตกตัวเป็นประจุบวก ของโซเดียมไอออน (Na^+) และประจุลบของคลอไรด์ไอออน (Cl^-) นอกจากนี้ยังมี H_2O ที่เคลื่อนไปที่ขั้วแคโทดเพื่อรับอิเล็กตรอนเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และประจุลบของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในระบบ ขณะที่ Cl^- และ OH^- เคลื่อนไปที่ขั้วแอโนดเพื่อให้อิเล็กตรอน โดย Cl^- จะเกิดเป็นก๊าซคลอรีน (Chlorine gas; Cl_2) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ H_2O เกิดเป็นกรดไฮโปคลอรัส (HOCl) [7,21] และเมื่อ HOCl อยู่ในสภาวะที่เป็นด่างที่มาจาก OH^- จะเกิดปฏิกิริยาที่เปลี่ยน HOCl เกิดเป็นไฮโปคลอไรท์ไอออน (Hypochlorite ion; OCl^-)



(ก) (ข)

รูปที่ 1 (ก) อิเล็กโทรลิซิสของสารละลายเกลือ NaCl โดย Cl^- จะให้อิเล็กตรอนเกิดเป็น Cl_2ซึ่งทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นกรดไฮโปคลอรัส (HOCl) เมื่อ HOCl อยู่ในสภาวะที่เป็นด่างจะเกิดเป็นไฮโปคลอไรท์ไอออน (OCl^-) **(ข)** ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของคลอรีนอิสระในรูปของ Cl_2, HOCl และ OCl^- ที่ขึ้นกับช่วงค่า pH

4.2 คลอรีนอิสระและคลอรีนที่มีค่าอยู่

โดยปกติชนิดหรือรูปของคลอรีนที่เกิดขึ้นในระบบ เรียกว่า คลอรีนอิสระ (Free chlorine) ซึ่งเป็นรูปคลอรีนที่อยู่รวมกันที่สมดุลในรูป Cl_2, HOCl และ OCl^- (ในน้ำคลอรีน โดยทั้งหมดยังไม่ได้ทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนที่อยู่ในน้ำนั้น) ซึ่งในการตรวจวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของคลอรีนอิสระที่เราสนใจในครั้งนี้ คือ ในรูป HOCl ซึ่งรูปคลอรีนดังกล่าวจะเรียกว่า คลอรีนที่มีค่าอยู่ (Available chlorine, AC) และหากใช้ในการหาปริมาณความเข้มข้น จะเรียกว่าความเข้มข้น คลอรีนที่มีค่าอยู่ (Available chlorine concentration, ACC; วัดในหน่วย ppm) [22]

รูปคลอรีนที่มีค่าอยู่ของ Cl_2 จะถูกไฮโดรไลซ์อย่างรวดเร็วและเกือบสมบูรณ์ในน้ำ เพื่อสร้าง HOCl, HCl และ OCl^- ดังสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$Cl2(g) + H2O(l) \leftrightharpoons HOCl(aq) + HCl(aq) \quad (1)$$

$$HOCl(aq) \leftrightharpoons H^{+}(aq) + OCl^{-}(aq) \quad (2)$$

ค่าคงที่สมดุลสำหรับปฏิกิริยาในระบบของคลอรีนอิสระที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของคลอรีนอิสระในรูปของคลอรีนที่มีค่าอยู่ ได้แก่ Cl_2, HOCl และ OCl^- ที่ขึ้นกับค่า pH ในสารละลายที่เป็นน้ำ ตามรูปที่ 1 ข. [22]

คลอรีนที่มีค่าอยู่ในรูป Cl_2, HOCl และ OCl^- ในระบบของคลอรีนอิสระทั้งหมดตามรูปที่ 1 ข. จะมีปริมาณร้อยละของความเข้มข้นคลอรีนที่มีค่าอยู่ (%ACC) ในแต่ละรูปมากน้อย ขึ้นอยู่กับค่า pH ในระบบขณะนั้น คือ (1) ที่ pH ของสารละลาย < 1 คลอรีนที่มีค่าอยู่จะอยู่ในรูปของ Cl_2 ทั้งหมด และจะระเหยสู่บรรยากาศ (2) ที่ pH 1–4 คลอรีนที่มีค่าอยู่จะอยู่ในรูป Cl_2 และ HOCl ผสมกัน (3) ที่ pH ในช่วง 4–5.33 คลอรีนที่มีค่าอยู่จะอยู่ในรูป HOCl ทั้งหมด (4) ที่ pH ในช่วง 5.33–9 คลอรีนที่มีค่าอยู่จะอยู่ในรูป HOCl และ OCl^- ผสมกัน และ (5) ที่ pH ≥ 9 ขึ้นไป คลอรีนที่มีค่าอยู่จะอยู่ในรูป OCl^- ทั้งหมด [5]

4.3 ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของสารละลายกรดไฮโปคลอรัส

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของสารละลายกรดไฮโปคลอรัส ได้แก่ (1) ค่าความต่างศักย์ของการออกซิไดซ์-การรีดิวซ์ (Oxidation-reduction potential, ORP; มีหน่วยเป็น mV), (2) ค่า ACC ในรูป HOCl และ (3) ค่า pH ที่บอกถึง %ACC ในรูป HOCl

โดยปัจจัยของ pH ในระบบสารละลายตามรูปที่ 1 ข. ที่เกิดขึ้น มี %ACC ในรูป HOCl ทั้งหมด ที่ช่วงค่า pH 4–5.33 ซึ่งมีผลโดยตรงกับค่า ORP และค่า ACC ของสารละลายกรดไฮโปคลอรัส เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น > 5.33 จะมีผลให้ค่า ORP และค่า ACC ลดลง และเมื่อค่า pH มีค่าลดลง ≤ 5.33 จะทำให้การเพิ่มจำนวนของเชื้อโรคลดลง ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อโรคและทำให้เซลล์ของเชื้อโรคที่ไวต่อสารกลุ่มคลอรีนถูกยับยั้งโดยกรดไฮโปคลอรัสที่ออกฤทธิ์แทรกซึมเข้าบริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อโรค และสร้างอนุมูลอิสระของสารกลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl radicals) ออกมา ผ่านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งสามารถทำลายเยื่อหุ้มเซลล์และฆ่าเชื้อโรคได้ [23-25] ตามหลักการแล้ว ค่า pH ที่ต่ำ และค่า ORP ที่สูงของกรดไฮโปคลอรัสจะเสริมฤทธิ์กันในการฆ่าเชื้อโรค ขณะที่ค่า ORP ที่มีค่า < +848 mV จะไม่มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรค [4]

4.4 ชุดอุปกรณ์ผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส

ในการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัสที่ประดิษฐ์ขึ้นใช้เอง ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักสำหรับการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ผลิตและรายละเอียดตามรูปที่ 2 ก. ดังนี้

4.4.1 *แหล่งให้กระแสไฟฟ้า* เป็นอุปกรณ์หม้อแปลงไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เป็นกระแสตรง (DC)

4.4.2 *ขั้วอิเล็กโทรด* เป็นขั้วนำกระแสไฟฟ้าภายในสารละลาย โดยเลือกใช้แท่งแกรไฟต์ (graphite) เนื่องจากมีข้อดี คือ นำไฟฟ้าได้ดี น้ำหนักเบา ราคาถูก หาซื้อได้ง่าย มีหลายขนาดทั้งเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาว และทนทานต่อสารละลายและค่า pH แต่ข้อเสีย คือ เปราะ แตกหักได้ง่าย และหากได้รับความร้อนมากหรือนานเกินไปอาจไหม้ได้

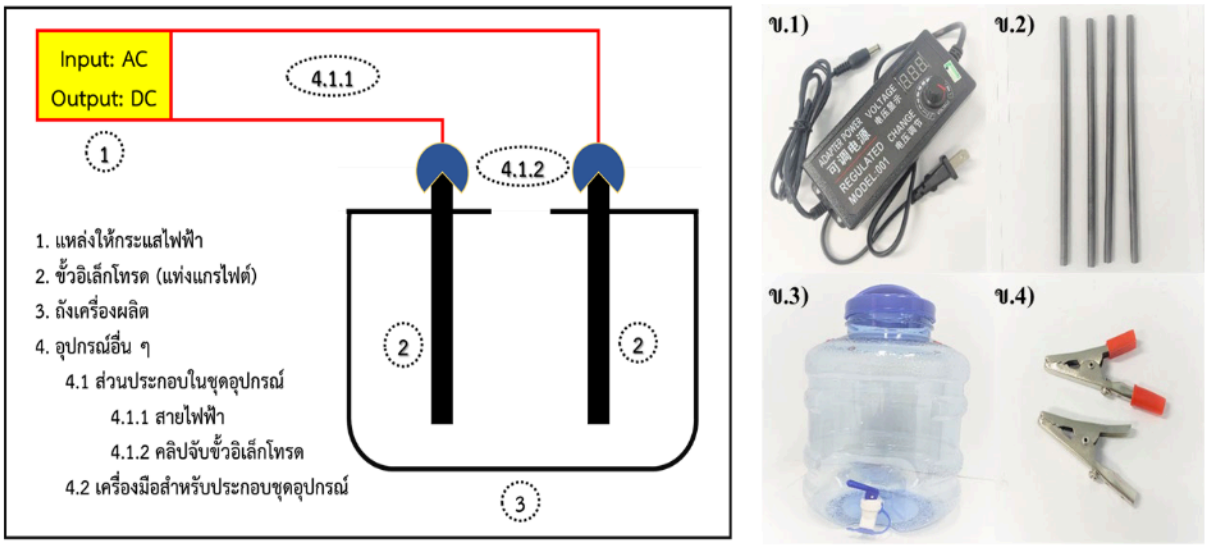
4.4.3 *ถังอุปกรณ์ผลิต* เลือกใช้จากถังพลาสติกที่เป็นภาชนะบรรจุน้ำ ซึ่งทนต่อความร้อนและ pH และสามารถเจาะตัวถังโดยถังไม่เสียหาย

4.4.4 *อุปกรณ์อื่น ๆ* เช่น สายไฟฟ้า คลิปจับขั้วอิเล็กโทรด เป็นต้น ตลอดจน เครื่องมือช่างที่จำเป็นสำหรับใช้ประกอบชุดอุปกรณ์

5. การดำเนินการวิจัย

5.1 วัสดุอุปกรณ์ สารเคมีและเครื่องมือสำหรับประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์

วัสดุอุปกรณ์สารเคมีและเครื่องมือที่เกี่ยวข้องมีดังนี้



(ก) (ข)

รูปที่ 2 (ก) องค์ประกอบหลักของชุดอุปกรณ์ผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส
(ข) อุปกรณ์และชิ้นส่วน: **ข.1)** หม้อแปลงไฟฟ้า, **ข.2)** แท่งแกรไฟต์ (ขั้วอิเล็กโทรด),
ข.3) ถังน้ำ PET ขนาดถังความจุ 12 ลิตร และ **ข.4)** คลิปปากจระเข้ (คลิปจับขั้วอิเล็กโทรด)

5.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับประกอบชุดอุปกรณ์

1) *แหล่งให้กระแสไฟฟ้า* ใช้หม้อแปลงไฟฟ้า Input: 110~240V AC; Output: 12V, 5A DC, รูปที่ 2 ข.1

2) *ขั้วอิเล็กโทรด* ใช้แท่งแกรไฟต์ ความยาว 30 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร, รูปที่ 2 ข.2

3) *ถังเครื่องผลิต* ถังพลาสติก PET (Polyethylene Terephthalate) ขนาดถังความจุ 12 ลิตร, รูปที่ 2 ข.3

4) *อุปกรณ์อื่นๆ* แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ (1) ประเภทส่วนประกอบในชุดอุปกรณ์ ได้แก่ คลิปปากจระเข้ (คลิปจับขั้วอิเล็กโทรด) ขนาด 55 มิลลิเมตร ซึ่งทำหน้าที่ยึดแท่งแกรไฟต์, รูปที่ 2 ข.4; สายไฟฟ้าขนาดสายไฟ 22AWG (2 x 0.3 ตารางมิลลิเมตร), รองรับไฟฟ้า 300V, 7A; ท่อหดคลุมสายไฟฟ้า และ (2) ประเภทเครื่องมือสำหรับประกอบ ชุดอุปกรณ์ ได้แก่ เครื่องมือช่างที่ใช้งานปกติทั่วไป เช่น ปากกาบัดกรี คีมจับสายไฟฟ้า คีมตัดสายไฟฟ้า ไขควง เป็นต้น

5.1.2 สารเคมี สำหรับสารเคมีที่ใช้เตรียมเป็นสารละลายเริ่มต้นก่อนทำปฏิกิริยา มีทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ (1) น้ำประปา เคมี สกศ.รร.จปร. (2) เกลือ NaCl (หาปริมาณที่เหมาะสม) และ (3) น้ำส้มสายชู (5%v/v กรดแอซิติก) (หาปริมาณที่เหมาะสม) ซึ่งทั้งหมดจะผสมเป็นสารละลาย 10 ลิตร จากขนาดถังที่ความจุจริง 12 ลิตร

5.1.3 เครื่องมือสำหรับการตรวจวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

1) *เครื่องมือสำหรับการตรวจสอบค่า pH* ได้แก่ (1) เครื่องพีเอชมิเตอร์แบบปากกา (Pen Type pH meter) [AMT03 AMTAST® pH/ORP METER, Neonics] ใช้วัดค่า pH เป็นแบบพกพา ใช้งานง่ายและมีความแม่นยำในระดับที่น่าเชื่อถือ แต่มีราคาสูง และ (2) กระดาษวัดค่าพีเอช (pH-Indicator strip) pH 0–14 Universal indicator [Mqunat®, Merck] ใช้วัดค่า pH ใช้งานง่ายและราคาไม่แพง แต่ช่วงการวัด pH จำกัดที่ช่วงละ 1 pH [18]

2) *เครื่องมือสำหรับการตรวจสอบค่า ORP* ได้แก่ เครื่องโออาร์พีมิเตอร์แบบปากกา (Pen Type ORP meter) [AMT03 AMTAST® pH/ORP METER, Neonics] ใช้วัดค่า ORP เพื่อตรวจวัดการเกิดเป็นน้ำอิเล็กโทรไลต์แบบกรด หากค่า ORP > +848 mV สามารถฆ่าเชื้อโรคได้ [4] โดยใช้เครื่องเดียวกับเครื่องพีเอชมิเตอร์แบบปากกา แต่เปลี่ยนหัววัดเป็น ORP ก่อนใช้งาน [3,8,18]

3) *เครื่องมือสำหรับการตรวจสอบปริมาณคลอรีนที่มีค่าอยู่* ตรวจสอบค่า ACC ในรูป HOCl ซึ่งขึ้นกับค่า pH จากรูปที่ 1 ข. จากข้อ 4.2 ด้วยแถบทดสอบคลอรีนแบบกระดาษ ได้แก่ (1) แถบทดสอบคลอรีน (USA.) (Chlorine Test strip) [WaterWorks™, Free Chlorine Check Ultra High, ITS, USA.] วัดค่า ACC ระหว่าง 0–750 ppm และ (2) แถบทดสอบคลอรีน (China) (Chlorine Test paper strip) [HANGZHOU SPECIAL PAPER INDUSTRY CO.,LTD (NEWSTAR), China] วัดค่า ACC 0–2,000 ppm [18]

5.2 การศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส

5.2.1 นำน้ำประปาอาคาร เคมี สกศ.รร.จปร. ที่ใช้เป็นตัวทำละลาย มาทำการวัดค่า pH, ค่า ACC และค่า ORP ตามลำดับ และบันทึกผลการทดลอง

5.2.2 กำหนดปริมาณของเกลือที่ใช้ ปริมาณเกลือ NaCl 1%w/v ตามงานวิจัยของ Sukwaree และคณะ [16] โดยใช้น้ำหนัก 100 กรัม ต่อน้ำประปาปริมาตร 10 ลิตร และเติมลงไปในถังเครื่องผลิตที่มีน้ำประปาอยู่ คนให้เกลือละลายจนหมด จากนั้นทำการวัดค่า pH, ค่า ACC และค่า ORP ตามลำดับ และบันทึกผลการทดลอง

5.2.3 ศึกษาปริมาณน้ำส้มสายชูที่ใช้ เพื่อใช้เป็นบัฟเฟอร์ในการควบคุมค่า pH ในระบบ โดยใช้น้ำส้มสายชู (5%v/v กรดแอซิติก) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร (0.1%v/v), 20 มิลลิลิตร (0.2%v/v), 30 มิลลิลิตร (0.3%v/v) และ 40 มิลลิลิตร (0.4%v/v) ตามลำดับ เติมลงไปในชุดอุปกรณ์ผลิตที่มีสารละลายเกลือ NaCl คนสารละลายให้เข้ากัน จากนั้นทำการวัดค่า pH, ค่า ACC และค่า ORP ตามลำดับ ก่อนทำการทดลอง (นาทีที่ 0) และระหว่างการทดลอง (ให้กระแสไฟฟ้า) ที่เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที, 25 นาที, 30 นาที, 35 นาที และ 40 นาที จนครบ และบันทึกผลการทดลอง

5.2.4 เลือกปริมาณน้ำส้มสายชูจากข้อ 5.2.3 มากำหนดปริมาณของน้ำส้มสายชูที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย และทำการศึกษาหาปริมาณเกลือ NaCl ที่ใช้ โดยใช้น้ำหนัก 50 กรัม ต่อน้ำประปาปริมาตร 10 ลิตร (0.5%w/v), น้ำหนัก 100 กรัม ต่อน้ำประปาปริมาตร 10 ลิตร (1%w/v) และน้ำหนัก 200 กรัม ต่อน้ำประปาปริมาตร 10 ลิตร (2%w/v) โดยเติมเกลือ NaCl ลงไปในถังเครื่องผลิตที่เติมน้ำส้มสายชูที่เลือกไว้จากข้อ 5.2.3 จากนั้นทำการวัดค่า pH, ค่า ACC และค่า ORP ตามลำดับ ก่อนทำการทดลอง (นาทีที่ 0) และระหว่างการทดลอง (ให้กระแสไฟฟ้า) เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที, 25 นาที, 30 นาที, 35 นาที และ 40 นาที จนครบ และบันทึกผลการทดลอง

5.2.5 นำผลการศึกษาที่ได้มาวิเคราะห์หาสูตรที่เหมาะสมสำหรับชุดอุปกรณ์ผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส ปริมาตร 10 ลิตร

6. ผลการวิจัย

6.1 การประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส

6.1.1. การรายงานต้นทุนการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส

ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยของชุดอุปกรณ์ผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัสที่ประดิษฐ์ขึ้นใช้เองและเครื่องมือสำหรับการตรวจวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของสารละลายกรดไฮโปคลอรัส สามารถหาซื้อได้ง่ายและต้นทุนต่ำผ่านการสั่งซื้อจากร้านค้าออนไลน์ผ่านระบบแอปพลิเคชัน เช่น Shopee หรือ Lazada เป็นต้น สำหรับราคาชุดอุปกรณ์ผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัสปริมาตร 10 ลิตร จากขนาดถังที่ความจุจริง 12 ลิตร ต่อ 1 ชุดอุปกรณ์ อยู่ที่ราคาประมาณ 960.00 บาท โดยไม่รวมอุปกรณ์เครื่องมือตรวจวิเคราะห์และค่าแรง รายละเอียดตามตารางที่ 1

เมื่อเปรียบเทียบขนาดปริมาตรในการเตรียมสารละลายและราคาของชุดอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์กับชุดอุปกรณ์ที่มีขายในท้องตลาด ได้แก่ (1) เครื่องผลิตน้ำยาฆ่าเชื้อ HOCl แบบพกพา, คลอรินน็อกซ์ [12] ปริมาตร 350 มิลลิลิตร ที่ราคาจำหน่าย 3,578.00 บาท และ (2) NEW Hypo 7.5 Hypochlorous Acid Generator [14] ปริมาตร 7.5 ลิตร ที่ราคาจำหน่าย 66,000.00.- บาท (US$ 2,200.00) พบว่าชุดอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นใช้เองมีความคุ้มค่าทั้งปริมาตรในการเตรียมสารละลายและราคาต้นทุนการประดิษฐ์ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรและราคาที่จำหน่ายจากตัวอย่างของชุดอุปกรณ์ที่มีขายในท้องตลาด

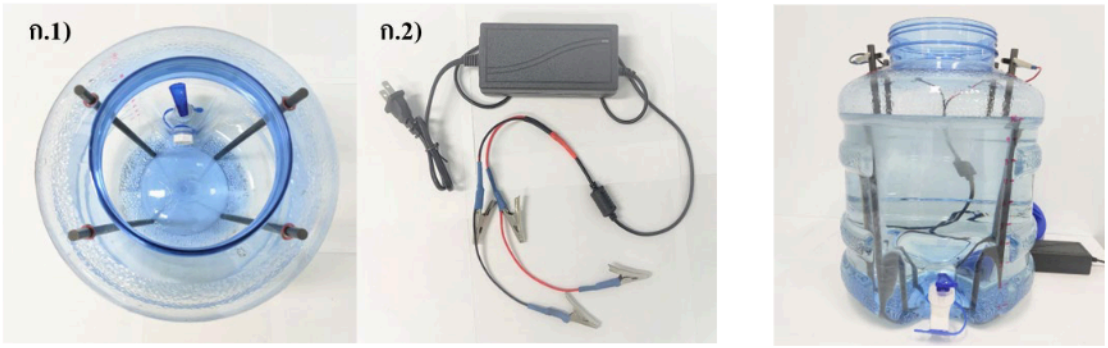
6.1.2 ขั้นตอนการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส

1) *การทำถังเครื่องผลิต* ตรวจสอบสภาพของถังน้ำ PET ขนาดถังความจุ 12 ลิตร จากนั้นทำการวัดขนาดเพื่อเจาะช่องสำหรับใส่แท่งแกรไฟต์ (ขั้วอิเล็กโทรด) จำนวน 4 ช่อง ที่บริเวณพื้นที่ด้านบนใกล้กับปากถัง แล้วตรวจสอบขนาดของช่องอีกครั้งด้วยแท่งแกรไฟต์ว่าสามารถใส่เข้าไปได้พอดี ไม่ควรให้ช่องหลวมจนเกินไป ตามรูปที่ 3 ก.1 เพื่อป้องกันไม่ให้แท่งแกรไฟต์แต่ละแท่งสัมผัสกัน เกิดไฟฟ้าลัดวงจรระหว่างการผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส

ตารางที่ 1 ราคาต้นทุนต่อหน่วยสำหรับวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ สารที่ใช้ และเครื่องมือการตรวจวิเคราะห์

ลำดับ	รายการ	หน่วย	จำนวน	ราคา (บาท)	หมายเหตุ
1. วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ					
1.1	หม้อแปลงไฟฟ้า [Input: 110~240V AC; Output: 12V, 5A DC]	ชุด	1	275.00	
1.2	แท่งแกรไฟต์	คู่	2	250.00	
1.3	ถังพลาสติก PET (12 ลิตร)	ใบ	1	220.00	ใช้จริง 10 ลิตร
1.4	คลิปปากจระเข้	ตัว	4	48.00	
1.5	สายไฟฟ้า	เซนติเมตร	50	2.00	ยาว 10 เมตร
1.6	ท่อหดคลุมสายไฟฟ้า	เซนติเมตร	25	5.00	ยาว 5 เมตร
1.7	เครื่องมือสำหรับประกอบชุดอุปกรณ์			100.00	คิดเฉลี่ยต่อ 10 ชุด
2. สารเคมี					
2.1	เกลือโซเดียมคลอไรด์	ถุง	1	30.00	1 กิโลกรัม
2.2	น้ำส้มสายชู	ขวด	1	30.00	700 มิลลิลิตร
2.3	น้ำประปา รร.จปร.			0.00	ไม่นำมาคำนวณ
			รวมเป็นเงิน	**960.00**	**ราคาโดยประมาณ**
3. อุปกรณ์เครื่องมือตรวจวิเคราะห์					
3.1	เครื่องพีเอชมิเตอร์/โออาร์พีมิเตอร์แบบปากกา [AMT03 AMTAST® pH/ORP METER, Neonics]	ชุด	1	7,500.00	เปลี่ยนหัววัดได้ (pH/ORP Probe)
3.2	กระดาษวัดค่าพีเอช pH 0–14 Universal indicator [MQunat®, Merck]	กล่อง	1	400.00	100 แผ่น
3.3	แถบทดสอบคลอรีน (USA.) [WaterWorks™, Free Chlorine Check Ultra High, ITS, USA.] 0–750 ppm	ขวด	1	800.00	50 แผ่น
3.4	แถบทดสอบคลอรีน (China) [HANGZHOU SPECIAL PAPER INDUSTRY CO.,LTD (NEWSTAR), China] 0–2,000 ppm	ตลับ	1	40.00	10 เมตร

2) *การทำแหล่งให้กระแสไฟฟ้าและที่จับขั้วอิเล็กโทรด* นำหม้อแปลงไฟฟ้า (แหล่งให้กระแสไฟฟ้า) ที่ใช้งานขนาด Input: 110~240V AC; Output: 12V, 5A DC มาทำการปรับเปลี่ยนส่วนปลายของสายไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเดิม มาเชื่อมกับคลิปปากจระเข้ (คลิปจับขั้วอิเล็กโทรด) โดยต้องเชื่อมสายไฟเพิ่มอีก 1 คู่ เพื่อเชื่อมต่อกับคลิปปากจระเข้รวมจำนวน 4 ตัว ตามรูปที่ 3 ก.2 และใช้ท่อหดคลุมสายไฟฟ้าคลุมบริเวณที่เป็นส่วนเชื่อมของสายไฟ เพื่อป้องกันการเกิดไฟฟ้าลัดวงจร



(ก) **(ข)**

รูปที่ 3 (ก) ชุดอุปกรณ์ผลิต: **ก.1)** ถังเครื่องผลิตพร้อมแท่งแกรไฟต์ (ขั้วอิเล็กโทรด) และ **ก.2)** ชุดให้กระแสไฟฟ้า **(ข)** การใช้งาน: ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ขั้วอิเล็กโทรดเกิดก๊าซ $H_2(g)$, $O_2(g)$ และ $Cl_2(g)$

3) การประกอบชุดอุปกรณ์ผลิตสำหรับใช้งานและการเก็บรักษา

3.1) การเตรียมสารละลายเริ่มต้น ประกอบด้วย (1) น้ำประปา เคมี สกศ.รร.จปร. ปริมาตรสารละลาย 10 ลิตร (2) เกลือ NaCl และ (3) น้ำส้มสายชู คนให้ละลาย แล้วนำแท่งแกรไฟต์มาใส่แล้วนำคลิปปากจระเข้ของชุดให้กระแสไฟฟ้าจับที่ปลายของแท่งแกรไฟต์ เมื่อให้กระแสไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาเคมีที่บริเวณแท่งแกรไฟต์ เกิดฟองก๊าซได้แก่ $H_2(g)$, $O_2(g)$ และ $Cl_2(g)$ ตามรูปที่ 3 ข. และเกิดสารละลายกรดไฮโปคลอรัส เนื่องจากมีก๊าซในระบบ จึงต้องระบายความดันก๊าซที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งถ่ายเทก๊าซเหล่านี้ เนื่องจาก $H_2(g)$ เป็นก๊าซติดไฟ และ $Cl_2(g)$ เป็นก๊าซอันตราย ซึ่งมีกลิ่นฉุน และทำให้เกิดการระคายเคืองได้

3.2) เมื่อครบเวลา ทำการหยุดให้กระแสไฟฟ้าและนำชุดให้กระแสไฟฟ้าและที่จับขั้วอิเล็กโทรดพร้อมทั้งแท่งแกรไฟต์ออกจากถังเครื่องผลิต สามารถนำสารละลายกรดไฮโปคลอรัสที่ได้ไปใช้งาน เมื่อมีค่า ACC 200 ppm [8] ในรูป HOCl ทั้งหมดหรือคิดเป็น 100%ACC โดยค่า pH ต้องอยู่ในช่วง 4–5.33 [5,22] และมีค่า ORP > +848 mV ขึ้นไป จึงมีประสิทธิภาพเพียงพอในการฆ่าเชื้อโรค [4]

3.3) การเก็บรักษาชุดอุปกรณ์เครื่องผลิตที่สำคัญ คือ การล้างด้วยน้ำสะอาดและเช็ดอุปกรณ์ทุกชิ้น ให้แห้งเพื่อป้องกันการเกิดสนิม สำหรับการจัดเก็บอุปกรณ์ในขั้นตอนสุดท้ายนั้น ให้นำแท่งแกรไฟต์และชุดให้กระแสไฟฟ้าและที่จับขั้วอิเล็กโทรดเก็บไว้ภายในตัวถังผลิตและปิดฝาให้เรียบร้อย และนำไปเก็บในตู้ที่สะอาดและแห้งเพื่อป้องกันฝุ่นละอองและความชื้น

6.2 ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

6.2.1 ผลการศึกษาปริมาณน้ำส้มสายชูที่เหมาะสมสำหรับการผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส

การตรวจวัดค่า pH, ค่า ACC และค่า ORP ของสารละลายเริ่มต้นที่มีส่วนประกอบของเกลือ NaCl และน้ำประปา เคมี สกศ.รร.จปร. โดยน้ำประปาเริ่มต้นมีค่า pH 6.64–6.65 แบบใช้เครื่องพีเอชมิเตอร์แบบปากกา (แบบใช้เครื่อง) และมีค่า pH 6 แบบใช้กระดาษวัดค่าพีเอช (แบบใช้กระดาษ) ซึ่งเป็นค่าอยู่ในระดับมาตรฐานของน้ำประปาที่ pH 6.5–8.5 (Field test) [26]; ค่า ACC 0 ppm คือ ตรวจไม่พบคลอรีนอิสระทั้งหมด (ในรูปของ Cl_2, HOCl และ OCl^-) จากแถบทดสอบคลอรีน (USA.) และ (China); ค่า ORP +260 – +270 mV จากผลการตรวจสอบค่าต่าง ๆ ของสารละลายเริ่มต้นที่ใช้ไม่มีคลอรีนอิสระในระบบก่อนทำการทดลอง และไม่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค (ค่า ORP < +848 mV) [4] การหาปริมาณน้ำส้มสายชูที่ใช้ เพื่อใช้เป็นบัฟเฟอร์ในการควบคุมค่า pH ในระบบ โดยใช้น้ำส้มสายชูที่ความเข้มข้น 0.1%v/v, 0.2%v/v, 0.3%v/v และ 0.4%v/v ในสารละลายเกลือ NaCl 1%w/v แล้วทำการตรวจวัดค่า pH, ค่า ACC และค่า ORP ก่อนทำการศึกษา (นาทีที่ 0) ได้ค่า pH ระหว่าง 3.76–4.48 แบบใช้เครื่อง และมีค่า pH ระหว่าง 4–5 แบบใช้กระดาษ; ค่า ACC 0 ppm ทั้ง (USA.)

และ (China); ค่า ORP มีค่าระหว่าง +314 – +320 และระหว่างการศึกษา (ให้กระแสไฟฟ้า Input: 110~240V AC; Output: 12V, 5A DC) ที่เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที, 25 นาที, 30 นาที, 35 นาที และ 40 นาที สำหรับค่า pH, ค่า ACC และค่า ORP ที่เวลาต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2 โดยกำหนดค่า ACC ที่ได้อยู่ที่ 200 ppm สำหรับการศึกษาครั้งนี้ [8,18-19]

ตารางที่ 2 ค่า pH, ค่า ACC และค่า ORP ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 นาที
เมื่อใช้ปริมาณน้ำส้มสายชูเพื่อเป็นบัฟเฟอร์ในการควบคุมค่า pH ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4%v/v

ปริมาณน้ำส้มสายชู	เวลาที่ใช้ผลิต	pH		ACC (ppm)		ORP	ปริมาณน้ำส้มสายชู	เวลาที่ใช้ผลิต	pH		ACC (ppm)		ORP
(%v/v)	(นาที)	เครื่อง	กระดาษ	USA.	China	(mV)	(%v/v)	(นาที)	เครื่อง	กระดาษ	USA.	China	(mV)
	0	4.48	5	0	0	+314		0	3.83	4	0	0	+314
	5	4.71	5	25	25	+474		5	4.01	4	25	25	+567
	10	4.95	5	25	25	+815		10	4.12	4	25	50	+960
	15	5.25	5	50	50	+837		15	4.22	4	50	50	+962
0.1	20	5.59	5	50	50	+835	0.3	20	4.30	4	100	100	+956
	25	5.92	6	100	100	+832		25	4.40	4	100	100	+944
	30	6.22	6	100	100	+831		30	4.47	4	150	150	+938
	35	6.46	6	150	150	+827		35	4.51	4	200	200	+934
	40	6.63	6	200	200	+820		40	4.60	5	200	200	+929
	0	4.09	4	0	0	+318		0	3.76	4	0	0	+320
	5	4.26	4	25	25	+493		5	3.92	4	25	25	+786
	10	4.42	4	25	25	+915		10	3.98	4	50	50	+993
	15	4.57	4	50	50	+933		15	4.07	4	50	50	+998
0.2	20	4.72	5	50	50	+939	0.4	20	4.14	4	100	100	+1000
	25	4.89	5	100	100	+931		25	4.20	4	100	100	+1000
	30	5.07	5	100	150	+924		30	4.27	4	150	150	+1000
	35	5.27	5	200	200	+917		35	4.32	4	200	200	+1000
	40	5.50	5	200	200	+901		40	4.38	4	200	200	+1000

หมายเหตุ: *เครื่อง*, เครื่องพีเอชมิเตอร์แบบปากกา; *กระดาษ*, กระดาษวัด ค่าพีเอช; *USA.*, แถบทดสอบคลอรีน (USA.); *China*, แถบทดสอบคลอรีนแบบกระดาษ (China); การวัดค่า ORP จากเครื่อง วัดได้ในช่วง -999 – +999 mV ค่าที่วัดเกิน > +999 จึงรายงานเป็น +1000

เมื่อให้กระแสไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ ค่า pH, ค่า ACC และค่า ORP ที่ทุกความเข้มข้นมีแนวโน้มสูงขึ้น รายละเอียดตามตารางที่ 2 ที่ปริมาณน้ำส้มสายชูที่ใช้ 0.3%v/v พบว่าต้องใช้เวลาอย่างน้อย 35 นาที ค่า pH 4.51 (100%ACC ในรูป HOCl ทั้งหมด); ค่า ACC ที่ 200 ppm; ค่า ORP +934 mV และค่า ORP ยังมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค ตามรูปที่ 4 ค. และ ง. ดังนั้นความเข้มข้นของน้ำส้มสายชู 0.3%v/v ถูกใช้เป็นค่าในการศึกษาหาปริมาณเกลือ NaCl ที่เหมาะสมในการใช้

แนวโน้มที่สูงขึ้นของค่า pH, ค่า ACC และค่า ORP เมื่อให้กระแสไฟฟ้า เป็นไปตามหลักการหัวข้อ 4.1 แสดงตามรูปที่ 1 ก. คือ (1) กรณีค่า pH ที่สูงขึ้นในระบบสารละลายเกลือ NaCl เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำที่ขั้วแคโทด ได้ OH^-(aq) และ H_2(g) ซึ่ง OH^-(aq) ที่เกิด ส่งผลให้ระบบสารละลายมีค่า pH เพิ่มขึ้น หากไม่มีการควบคุมค่า pH (ควบคุมค่า pH 4–5.33) ด้วยน้ำส้มสายชูที่ใช้เป็นบัฟเฟอร์ในปริมาณที่เหมาะสม pH > 5.33 จะเกิดรูป OCl^- ที่ไม่ต้องการส่งผลต่อ %ACC ในรูป HOCl ทั้งหมด เนื่องจาก OCl^- ที่เกิดขึ้นมีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรคน้อยกว่า HOCl และมีกลิ่นฉุน ระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อและผิวหนังมากกว่า [7-8] (2) กรณีค่า ACC ในรูป HOCl เกิดมาจากความเข้มข้นของ Cl^-(aq) จากปริมาณเกลือ NaCl ที่ใช้ [21-22] เมื่อใช้ปริมาณเกลือเท่ากัน ปริมาณน้ำส้มสายชูที่ใช้มากขึ้น ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการเกิด HOCl คือ ใช้เวลาน้อยลง ตามรายงานของ Block และ Rowan [8] กล่าวถึงประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อบริเวณพื้นผิวสัมผัสที่มีเชื้อโคโรนาไวรัสได้ภายในเวลาสัมผัส 1 นาที ที่ความเข้มข้น 200 ppm และ (3) กรณีค่า ORP พบว่า แนวโน้มของค่า ORP ในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นเป็นค่าบวกอย่างรวดเร็วและค่อย ๆ ลดลงอย่างช้า ๆ ในเวลาต่อมา เนื่องจากช่วงแรกเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ

Cl^-(aq) ที่ขั้วแอโนดได้ Cl_2(g) และ Cl_2(g) ทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น HOCl ขณะเดียวกันเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำที่ขั้วแคโทดได้ OH^-(aq) มาแข่งขันในระบบสารละลาย ทำให้ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของระบบสารละลายลดลง

6.2.2 ผลการศึกษาปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส

ค่า pH, ค่า ACC และค่า ORP ของสารละลายเริ่มต้นที่มีส่วนประกอบของเกลือ NaCl และน้ำประปาเคมี สกศ.รร.จปร. โดยน้ำประปาเริ่มต้นมีค่า pH 6.64–6.65 แบบใช้เครื่อง และมีค่า pH 6 แบบใช้กระดาษ; ค่า ACC 0 ppm ทั้ง (USA.) และ (China); ค่า ORP +262 – +273 mV การหาปริมาณเกลือ NaCl ที่ใช้ โดยใช้เกลือ NaCl ที่ความเข้มข้น 0.5%w/v, 1%w/v และ 2%w/v เมื่อเติมน้ำส้มสาย 0.3%v/v ในการควบคุม pH ของสารละลาย แล้วทำการตรวจวัดค่า pH, ค่า ACC และค่า ORP ก่อนทำการศึกษา (นาทีที่ 0) พบว่า มีค่า pH 3.84 แบบใช้เครื่อง และมีค่า pH 4 แบบใช้กระดาษ; ค่า ACC 0 ppm ทั้ง (USA.) และ (China); ค่า ORP มีค่าระหว่าง +318 – +320 และระหว่างการศึกษา (ให้กระแสไฟฟ้า) ที่เวลา 5 นาที, 10 นาที, 15 นาที, 20 นาที, 25 นาที, 30 นาที, 35 นาที และ 40 นาที สำหรับค่า pH, ค่า ACC และค่า ORP ที่เวลาต่าง ๆ โดยกำหนด ค่า ACC ที่ได้อยู่ที่ 200 ppm สำหรับการศึกษาครั้งนี้ ผลการศึกษาปริมาณเกลือ NaCl ที่เหมาะสมในการใช้ พบว่า

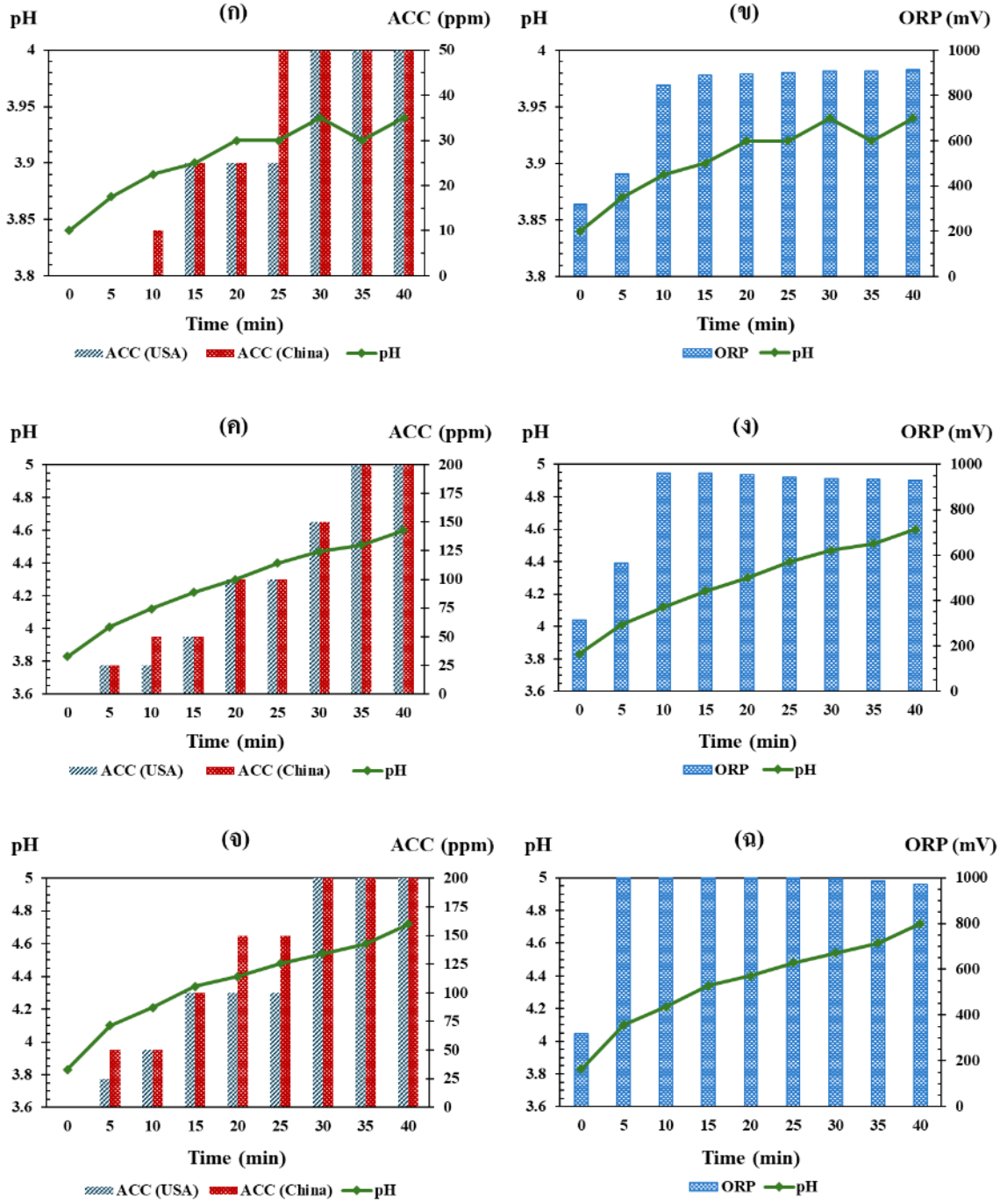
ปริมาณเกลือ NaCl 0.5%w/v ก่อนทำการศึกษา (นาทีที่ 0) ได้ค่า pH 3.84 แบบใช้เครื่อง และมีค่า pH 4 แบบใช้กระดาษ; ค่า ACC 0 ppm ทั้ง (USA.) และ (China); ค่า ORP +320 เมื่อเวลาผ่านไปถึงนาทีที่ 40 ค่า pH จะเพิ่มเป็น 3.94 แบบใช้เครื่อง และมีค่า pH 4 แบบใช้กระดาษ; ค่า ACC 50 ppm ทั้ง (USA.) และ (China); ค่า ORP +913 เมื่อทำการวิเคราะห์ค่า pH และค่า ACC ที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่าง ๆ ตามรูปที่ 4 ก. และ ข. พบว่าแม้ใช้เวลาถึง 40 นาที ค่า ACC เพียง 50 ppm ขณะที่ค่า pH ในระบบจะมี %ACC ในรูป HOCl และ Cl_2 ผสมอยู่ในช่วง pH 1–4 [5] สำหรับค่า ORP ยังมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค

ปริมาณเกลือ NaCl 1%w/v ก่อนทำการศึกษา (นาทีที่ 0) ได้ค่า pH 3.83 แบบใช้เครื่อง และมีค่า pH 4 แบบใช้กระดาษ; ค่า ACC 0 ppm ทั้ง (USA.) และ (China); ค่า ORP +314 เมื่อเวลาผ่านไปถึงนาทีที่ 35 ค่า pH จะเพิ่มขึ้นเป็น 4.51 แบบใช้เครื่อง และมีค่า pH 4 แบบใช้กระดาษ; ค่า ACC 200 ppm ทั้ง (USA.) และ (China); ค่า ORP +934 mV เมื่อทำการวิเคราะห์ค่า pH และค่า ACC ที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่าง ๆ ตามรูปที่ 4 ค. และ ง. พบว่าต้องใช้เวลาอย่างน้อย 35 นาที ได้ค่า ACC 200 ppm ขณะที่ค่า pH ในระบบจะได้ 100%ACC ในรูป HOCl ทั้งหมด สำหรับค่า ORP ยังมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค แต่มีค่าแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

ปริมาณเกลือ NaCl 2%w/v ก่อนทำการศึกษา (นาทีที่ 0) ได้ค่า pH 3.83 แบบใช้เครื่อง และมีค่า pH 4 แบบใช้กระดาษ; ค่า ACC 0 ppm ทั้ง (USA.) และ (China); ค่า ORP +318 เมื่อเวลาผ่านไปถึงนาทีที่ 30 ค่า pH จะเพิ่มขึ้นเป็น 4.54 แบบใช้เครื่อง และมีค่า pH 4 แบบใช้กระดาษ; ค่า ACC 200 ppm ทั้ง (USA.) และ (China); ค่า ORP +995 mV เมื่อทำการวิเคราะห์ค่า pH และค่า ACC ที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่าง ๆ ตามรูปที่ 4 จ. และ ฉ. พบว่าต้องใช้เวลาอย่างน้อย 30 นาที ได้ค่า ACC 200 ppm ขณะที่ค่า pH ในระบบจะได้ 100%ACC ในรูป HOCl ทั้งหมด สำหรับค่า ORP ยังมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค แต่มีค่าแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

จากผลที่ได้ตามรูปที่ 4 การใช้เกลือ NaCl 1%w/v และ 2%w/v ให้ค่า ACC 200 ppm ที่ต้องการ ขณะที่เกลือ NaCl 0.5%w/v ได้ค่า ACC เพียง 50 ppm น้อยกว่าค่าที่ต้องการ ซึ่งเป็นไปตามหลักการของการเกิด HOCl ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ Cl^- ในระบบจากปริมาณเกลือ NaCl ที่ใช้ [21-22] (เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Cl^- ที่ขั้วแอโนดได้ Cl_2(g) และ Cl_2(g) ทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น HOCl) และค่า pH < 4 ในระบบสารละลายมี %ACC ในรูป HOCl และ Cl_2 ผสมอยู่ [5] สำหรับค่า ACC ของเกลือ NaCl 1%w/v และ 2%w/v พบว่า มีผลเป็นไปตามหลักการความเข้มข้นของ Cl^-(aq) จากปริมาณเกลือที่ใช้มากขึ้นเช่นเดียวกัน รวมถึงค่า ORP ที่ได้จากการใช้ปริมาณเกลือมากขึ้น พบว่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดได้ค่ามากกว่าเช่นกัน

สำหรับปริมาณเกลือ NaCl ที่ใช้ระหว่าง 2%w/v และ 1%w/v พบว่าถ้าพิจารณาเวลาที่ใช้ในการผลิตสารละลาย ทั้ง 2 ความเข้มข้น ให้ค่า ACC 200 ppm เหมือนกัน แต่เวลาที่ใช้ต่างกัน 5 นาที (ที่เวลา 35 และ 30 นาที ตามลำดับ) ซึ่งไม่มีความแตกต่างสำหรับเวลาที่ใช้ในการผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส กรณีนี้ผู้วิจัยเลือกปริมาณเกลือที่น้อยกว่า คือ เกลือ NaCl 1%w/v (เวลาที่ใช้ในการผลิตอย่างน้อย 35 นาที) เป็นปริมาณเกลือที่ใช้ในสูตรการผลิต



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของค่า pH กับ **(ก)** ค่า ACC และ **(ข)** ค่า ORP ที่ใช้ NaCl 0.5%w/v; **(ค)** ค่า ACC และ **(ง)** ค่า ORP ที่ใช้ NaCl 1%w/v; **(จ)** ค่า ACC และ **(ฉ)** ค่า ORP ที่ใช้ NaCl 2%w/v; ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 และ 40 นาที เมื่อใช้น้ำส้มสายชู 0.3%v/v เพื่อเป็นบัฟเฟอร์ในการควบคุมค่า pH

6.2.3 สูตรที่เหมาะสมในการผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัส

ผลการศึกษาปริมาณน้ำส้มสายที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นบัฟเฟอร์ในการควบคุมค่า pH 6.2.1 คือ น้ำส้มสายชู (5%v/v กรดแอซิติก) 0.3%v/v และผลการศึกษาปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสมจากข้อ 6.2.2 คือ ปริมาณเกลือ NaCl 1%w/v เมื่อเตรียมสารละลายในน้ำประปา เคมี สกศ.รร.จปร. ปริมาตร 10 ลิตร แล้วให้ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นเวลาอย่างน้อย 35 นาที ได้ผลที่ยอมรับได้ตามการรายงาน [5,8,22] คือ ค่า pH 4.51 แบบใช้เครื่อง และมีค่า pH 4 แบบใช้กระดาษ เกิด 100%ACC ในรูป HOCl ทั้งหมด (ช่วงค่า pH ระหว่าง 4–5.33); ค่า ACC 200 ppm ทั้ง (USA.) และ (China) (กำหนดที่ 200 ppm); ค่า ORP +934 mV ซึ่งเป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรค (ค่า ORP < +848 mV)

ดังนั้นสูตรที่เหมาะสมในการผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัสจากชุดอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นใช้เอง ที่ผู้วิจัยเลือกมีรายละเอียดดังนี้

1) การเตรียมสารที่ใช้ประกอบด้วย (1) น้ำประปา เคมี สกศ.รร.จปร. ปริมาตร 10 ลิตร จากขนาดถังที่ความจุ 12 ลิตร (2) เกลือ NaCl 1%w/v และ (3) น้ำส้มสายชู (5% กรดแอซิติก) 0.3%v/v

2) การทำงานโดยการให้ไฟฟ้ากระแสตรง 12V, 5A เป็นเวลาอย่างน้อย 35 นาที (เมื่อต้องการเวลาที่ใช้ในการผลิตให้น้อยที่สุด)

7. สรุป

งานวิจัยนี้รายงานขั้นตอนการประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์ผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัสที่ประดิษฐ์ขึ้นใช้เองเพื่อการฆ่าเชื้อโรคสำหรับใช้ภายใน รร.จปร. และแสดงความคุ้มค่าทั้งปริมาตรในการเตรียมสารละลายและราคาต้นทุนที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรและราคาจากตัวอย่างของชุดอุปกรณ์ที่มีขายในท้องตลาด สำหรับการหาสูตรผลิตที่เหมาะสมในการผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัสปริมาตร 10 ลิตร จากชุดอุปกรณ์ มีขั้นตอนการเตรียมสารและขั้นตอนการทำงานดังนี้ สารที่ใช้ประกอบด้วย (1) น้ำประปา รร.จปร. (2) เกลือ NaCl 1%w/v และ (3) น้ำส้มสายชู (5% กรดแอซิติก) 0.3%v/v และการทำงานโดยการให้ไฟฟ้ากระแสตรง 12V, 5A เป็นเวลาอย่างน้อย 35 นาที

8. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคได้มาจากการศึกษางานวิจัยที่เคยรายงานมาแล้ว ดั้งนั้นเพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือของการผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัสจากสูตรที่รายงานในครั้งนี้ ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงประสิทธิภาพของสารละลายกรดไฮโปคลอรัสในการฆ่าหรือแสดงฤทธิ์การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อโรคที่ผลิตได้จากชุดอุปกรณ์นี้อีกครั้ง

9. กิตติกรรมประกาศ

การประดิษฐ์ชุดอุปกรณ์และการหาสูตรผลิตสารละลายกรดไฮโปคลอรัสเพื่อการฆ่าเชื้อโรคสำหรับใช้ภายใน รร.จปร. สำเร็จลุล่วงด้วยดีนั้นต้องขอขอบคุณ กองทุนพัฒนา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (กทพ.รร.จปร.) ที่สนับสนุนทุนวิจัย ซึ่งเป็นไปตามนโยบายของผู้บังคับบัญชาที่ส่งเสริมและสนับสนุนให้ รร.จปร. ผลิตสารฆ่าเชื้อโรคใช้เอง; พ.อ. ผศ.ดร.กนกเจริญชัยประกิจ และ ผศ.ดร.ปิ่วย อุ่นใจ สำหรับการให้คำปรึกษาแนะนำในการเตรียมชุดอุปกรณ์และแนวคิดการหาสูตรผลิต

10. เอกสารอ้างอิง

[1] World Health Organization. (2020). Cleaning and disinfection of environmental surfaces in the context of COVID-19: Interim guidance 15 May 2020. Retrieved on Jun 20, 2021, from https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1277966/retrieve

[2] Rahman, S. M. E., Khan, I., & Oh D.-H. (2016). Electrolyzed Water as a Novel Sanitizer in the Food Industry: Current Trends and Future Perspectives. Compr. Rev. *Food Sci. Food Saf.*, 15: 471–490.

[3] นวลใย ญารักษา, ชัดชัย แก้วตา, ศุภาวีร์ มากดี และ ธีระ สาธุพันธ์. (2564). ประสิทธิภาพของน้ำอิเล็กโทรไลต์ชนิดกรดในการฆ่าเชื้อโรค. *วารสารเกษตรพระวรุณ*. 18(2): 41–48.

[4] Stevenson, S.M.L., Cook, S.R., Bach, S.J., and Mcallister, T.A. (2004). Effects of Water Source, Dilution, Storage, and Bacterial and Fecal Loads on the Efficacy of Electrolyzed Oxidizing Water for the Control of *Escherichia coli* O157:H7. *J. Food Prot.*, 67(7): 1377–1383.

[5] World Health Organization. (2020). Hypochlorous Acid (HOCl) for disinfection, antisepsis, and wound care in. Core Categories 15.1, 15.2, and 13. Retrieved on Jun 20, 2021, from https://cdn.who.int/media/docs/default-source/essential-medicines/2021-eml-expert-committee/applications-for-addition-of-newmedicines/a.18_hypochlorous-acid.pdf?sfvrsn=35222172_4

[6] McKenna, S.M., Davies, K.J.A. (1988) The inhibition of bacterial growth by hypochlorous acid. *Biochem. J.*, 254: 685–692.

[7] วิยดา กวานเหียน, ดลฤดี ตวงสิน และ สุนิษา ฐานะภักดี. (2562). คุณสมบัติการฆ่าเชื้อก่อโรคของน้ำออกซิไดซ์. *วารสารพิษวิทยาไทย*. 34(1): 53–69.

[8] Block, M. S., & Rowan, B. G. (2020). Hypochlorous Acid: A Review. *J. Oral Maxillofac. Surg.*, 78: 1461–1466.

[9] HydroVoltage. (2021). ผลิตน้ำไฮโปคลอรัสเอซิดเองที่บ้านต่อสู้โควิด19. Retrieved on Jun 20, 2021, from https://fliphtml5.com/ th/libqk/vwmk/basic

[10] มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, คณะวิทยาศาสตร์. (2564). นักวิจัย ม.อ. ผลิตน้ำยาฆ่าเชื้อโควิด-19 พร้อมถ่ายทอดองค์ความรู้สู่ชุมชน [ข่าวในสื่อ]. สืบค้น 20 มิ.ย. 2564, จาก https://www.sci.psu.ac.th/wp-content/uploads/2021/05/นักวิจัยม-อ-ผลิตน้ำยาฆ่าเชื้อโควิด-19-พร้อมถ่ายทอดองค์ความรู้สู่ชุมชน-.pdf

[11] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์. (2564). คณะศิลปะศาสตร์และวิทยาศาสตร์ผลิตน้ำยาฆ่าเชื้อโรคจากกรดไฮโปคลอรัส (HYPOCHLOROUS ACID) ใช้แทนแอลกอฮอล์ [ข่าววิทยาเขต]. สืบค้น 20 มิ.ย. 2564, จาก https://kps.ku.ac.th/v8/index.php/th/news-all/kps-news/1515-คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์-ผลิตน้ำยาฆ่าเชื้อโรคจากกรดไฮโปคลอรัส-hypochlorous-acid-ใช้แทนใช้แทนแอล

[12] คลอรินี่อกซ์. (ม.ป.ป.). เครื่องผลิตน้ำยาฆ่าเชื้อโรค HOCl ฆ่าเชื้อโควิด-19 ได้ 99.5%. สืบค้น 20 มิ.ย. 2564, จาก https://chlorinox.co/products/

[13] มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี. (ม.ป.ป.). ระบบทำน้ำยาฆ่าเชื้อโรคด้วยกรดไฮโปคลอรัสเข้มข้นจากน้ำเกลือด้วยกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส [ข่าวสาร]. สืบค้น 20 มิ.ย. 2564, จาก https://www.pbru.ac.th/pbru/news/15290

[14] Hypo Source. (2021). NEW Hypo 7.5 Hypochlorous Acid Generator. Make 2 gallons HOCl in 8 minutes. Retrieved on Jun 20, 2021, from https://hyposource.com/collections/hypochlorous-acid-generators/products/hypo-7-5

[15] YouTube, เผือกไปกับช่าง Channel. (2563). สอนทำน้ำไฮโปคลอรัสฆ่าเชื้อโควิด-19 ตายใน 10 วินาที ผ่านแท่งแกรไฟต์. สืบค้น 20 มิ.ย. 2564, จาก https://www.youtube.com/watch?v=qNtOUkAeRBs&t=20s

[16] Sukwaree, J., Srisungwan, P., Sirivej, T., Thongsri, S., & Khongton, N. (2021). Hypochlorous Acid Solution Generator Prototype for Disinfection. (Cadets' Research Project Report, Chulachomklao Royal Military Academy).

[17] Pawongjit, K., Sathaworn, K., Rittidech, T., & Wilailoy, N. (2022). Using Acids to Control pH for Producing Hypochlorous Acids Solution. (Cadets' Research Project Report, Chulachomklao Royal Military Academy).

[18] Farah, R. I., & Al-Haj Ali, S. N. (2021). Electrolyzed Water Generated On-Site as a Promising Disinfectant in the Dental Office During the COVID-19 Pandemic. *Front. Public Health*, 9: 1–5.

[19] Takeda, Y., Matsuda, S., Jamsransuren, D., & Ogawa, H. (2021). Comparison of the SARS-CoV-2-Inactivating Activities of the Differently Manufactured Hypochlorous Acid Water Products with Various pH. *J. Water Health.*, 19(3): 448–456.

[20] Agricultural Marketing Service. (2015). Hypochlorous Acid Petition [Unpublished Manuscript]. Retrieved on Jun 20, 2021, from https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/Hypochlorous%20Acid%20Petition.pdf

[21] Al-Haq, M. I., Sugiyama, J., & Isobe S. (2005). Applications of Electrolyzed Water in Agriculture and Food Industries. *Food Sci. Technol. Res.*, 11(2): 135–150.

[22] Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2010). Toxicological Profile for Chlorine: 4. Chemical and Physical Information. Retrieved on Jun 20, 2021, from https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp172-c4.pdf

[23] Guentzel, J. L., Lam, K. L., Callan, M. A., Emmons, S. A. & Dunham, V.L. (2008). Reduction of bacteria on spinach, lettuce, and surfaces in food service areas using neutral electrolyzed oxidizing water. *Food Microbiol.*, 25: 36–41.

[24] Wang, L., Bassiri, M., Najafi, R., Najafi, K., Yang, J., Khosrovi, B., Hwong, W., Barati, E., Belisle, B., Celeri, C., & Robson M. C. (2007). Hypochlorous Acid as a Potential Wound Care Agent: Part I. Stabilized Hypochlorous Acid: A Component of the Inorganic Armamentarium of Innate Immunity. *J. Burns Wounds*. 11; 65–79.

[25] Aquaox. (2019). Welcome to the Next Generation of Infection Control. Retrieved on Jun 20, 2021, from https://www.aquaox.com/wp-content/uploads/2019/03/Aquaox-ICS-Introduction.pdf

[26] ประกาศกรมอนามัย. (2543). เรื่อง เกณฑ์คุณภาพน้ำประปา. สืบค้น 20 มิ.ย. 2564, จาก https://www.metlaboratory.com/album/law/pdf/76ed7168141b2288e444611cd52d0114.pdf

การพัฒนาเส้นด้ายบัวหลวงด้วยเทคนิคการย้อมสีธรรมชาติ
DEVELOPMENT OF LOTUS YARN USING NATURAL DYEING TECHNIQYE

[1#]รับโชค ทองเจริญ, [2#]วิวัฒน์ หิรัญพฤกษ์, [3#]อนุสร หงส์สัจจากุล, [4#]อุษณกร ปัญญาวชิร, [5#]พิชาธร นวลได้ศรี, [6#]นารีรัตน์ บุญลักษณ์, [7#]ปิยะพงษ์ ยงเพชร และ [8*]ณรัช พรนิธิบุญ

[1,2]สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ

[3]บริษัทโซลเวย์ เพอรอกซิไทย

[4]บริษัทเฟอร์ไทล์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด

[5]นักวิจัยอิสระ

[6]คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

[7,8]คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

Received: May 10,2024

Revised: July 14,2024

Accepted: October 10,2024

[1#]Rabchok ThongCharoen, [2#] Wiwat Hiranphruek, [3#]Anusorn Hongsajjakul, [4#]Usanakorn Panyawachira, [5#]Phichatorn Nuandaisri, [6#]Nareerat Boonluck, [7#]Piyaphong Yongphet and [8*]Narat Pornnitiboun

[1,2]Thailand Textile Institute

[3]Solvay asking more from chemistry

[4]Fertile corporation company limited

[5]Researcher Independent

[68]Faculty of Science and Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University

[7,8]Faculty of Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage

[1#]Rabchok@gmail.com, [2#] hirunpruk@gmail.com, [3#]mr.anusorn@gmail.com, [4#]usanakorn.panyavachira@gmail.com, [5#]nampichatorn@gmail.com, [6#]Nareerat@gmail.com, [7#]Piyaphong.yong@vru.ac.th [8*]Narat.porn@vru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เพื่อการพัฒนาเส้นด้ายบัวหลวงด้วยเทคนิคการย้อมสีธรรมชาติ เพื่อการพัฒนาเส้นด้ายบัวหลวงด้านด้วยเทคนิคการย้อมสีธรรมชาติจาก ครั่ง เปลือกมะพูด คราม โดยแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ระดับความเข้มข้นของเฉดสี แบ่งได้ 3 ระดับ 0.5, 1, 2 กิโลกรัมต่อเส้นด้ายบัว 1 กิโลกรัม เป็นต้นแบบเทคนิคการย้อมสีธรรมชาติเส้นด้ายบัวหลวงซึ่งกระบวนการดังกล่าวยังส่งผลไปถึง การทดสอบคุณภาพการติดสีของเส้นด้ายบัวหลวง คุณสมบัติทางเคมี พบว่าค่าความคงทนของสีต่อการซัก เมื่อเทียบกับหลักเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. ซึ่งกำหนดค่าความคงทนของสีต่อการซักของสีธรรมชาติให้มีค่าไม่ต่ำกว่าระดับ 2-3 เต็ม 5 ผลการทดสอบพบว่าเป็นไปตามหลักเกณฑ์ของมาตรฐาน และค่าความคงทนของสีต่อเหงื่อ ทั้งในสภาวะเหงื่อที่เป็นกรดและด่าง เมื่อเทียบกับหลักเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. ซึ่งกำหนดค่าความคงทนของสีต่อการซักของสีธรรมชาติให้มีค่าไม่ต่ำกว่าระดับ 2-3 เต็ม 5 ผลการทดสอบพบว่าเป็นไปตามหลักเกณฑ์ของมาตรฐาน

คำสำคัญ: เส้นด้ายบัวหลวง, ย้อมสีธรรมชาติ, เทคนิคย้อมเส้นด้าย

Abstract

This study aims to develop lotus yarn using natural dyeing technique and natural dyes such as lac, garcinia skin, and indigo, in four steps, with three shades (0.5, 1 and 2 kilograms) per one kilogram of lotus yarn. This model natural lotus yarn dyeing technique influences the dye adhesion quality of lotus yarns, as well as their chemical properties. It was found that the dye adhesion against washing, compared to the Community Product Standard that required at least 2-3 out of 5 in terms of natural dye washing resistance, met the standard. The dye resistance against sweat, in both acidic and basic conditions, was compared to that of the Community Product Standard, that required at least 2-3 out of 5 in terms of natural dye washing resistance. The test results were found to be in accordance with the standard criteria.

Keywords: Lotus Yarn, Natural Dyeing, Natural Dyeing Technique

1. บทนำ

การย้อมเส้นด้ายใยบัวหลวงถือว่าเป็นกระบวนการต้นน้ำที่สำคัญ เพื่อนำไปสู่กระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ต่อไป เส้นใยบัวหลวงมีความละเอียดอ่อนมากและควรเห็นควรที่จะพัฒนาเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์เชิงอัตลักษณ์ต่อนโยบาย Soft Power เป็นกลไกแม่ที่ดึงดูดคนทั่วโลกให้เข้ามาเที่ยว สัมผัสผลิตภัณฑ์ของไทย การดำเนินการให้วัตถุดิบเส้นด้ายใยบัวหลวงนั้นเป็นส่วนหนึ่งของ Soft Power ด้านแฟชั่น คุณภาพถือว่าเป็นเรื่องสำคัญอย่างมาก โดยแบ่งได้ 2 ส่วน คือคุณภาพเส้นด้าย และคุณภาพการย้อมสี เพื่อไม่ให้ส่งผลต่อคุณภาพรวมของผลิตภัณฑ์ ถ้าตัววัตถุดิบเส้นด้ายบัวหลวงไม่ผ่านคุณภาพส่งผลให้สีตก หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงในทางกายภาพของเส้นด้าย แม้ผลิตภัณฑ์จะออกแบบมาสวยเป็นที่ยอมรับของลูกค้า แต่ถ้าไม่ผ่านมาตรฐานความคงทนของสีต่อการซัก และการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ [1] ซึ่งเป็นข้อกำหนดหลักของแต่ละมาตรฐานผลิตภัณฑ์สิ่งทอ เช่น มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ดังนั้นกระบวนการย้อมสีธรรมชาติบนเส้นด้ายบัวหลวงนั้น จึงต้องมีมาตรฐานไปพร้อมกับคุณสมบัติของเส้นใยบัวที่มีคุณสมบัติพิเศษ น้ำหนักเบา สัมผัสนุ่ม ระบายอากาศได้ เหมือนกับเส้นใยแก้ว [2] เส้นใยบัวหลวงมีลักษณะทางกายภาพของความยาวชนิดเส้นใยสั้นแข็งแรง และมีคุณสมบัติต้านแบคทีเรีย [3] ทดสอบด้วยการนำแบคทีเรีย 3-4 โคโลนีจากอาหาร NA มาเพาะเลี้ยงในอาหาร Mueller Hinton broth เพื่อทดสอบ เมื่อนำมาผสมกับเส้นใยฝ้ายเพื่อผลิตมาเป็นเส้นด้ายใยบัวหลวง จะเป็นการเพิ่มศักยภาพและมูลค่าของผลิตภัณฑ์จากบัวหลวง แล้วยังเป็นทางเลือกในวงการอุตสาหกรรมแฟชั่นสิ่งทอต่อไป

2. ขอบเขตงานวิจัย

เพื่อการพัฒนาเส้นด้ายบัวหลวงด้านด้วยเทคนิคการย้อมสีธรรมชาติ สีแดงจากครั่ง สีเหลืองจากเปลือกมะพูด และสีน้ำเงินจากคราม และทดสอบคุณสมบัติการติดสีทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีของเส้นด้ายบัวหลวงด้วยมาตรฐานความคงทนของสีต่อการซัก ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-C01 : 2006 (E) METHOD A(1) (40 องศาเซลเซียส , 30 นาที) และการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-E04 : 2013 (E) Colour

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 มาตรฐาน ISO 105-C01: 2006 (E) METHOD A (1) [4]

การทดสอบความคงทนของสีต่อกระบวนการแบบเปียกมีต้นกำเนิดมาจากการเปรียบเทียบสีที่ผ่านกระบวนการแบบเปียกกับสีบนวัสดุที่ไม่ผ่านกระบวนการนี้ เมื่อมองเห็นความเปลี่ยนแปลง จะต้องมีมาตรฐานเปรียบเทียบ ซึ่งจำเป็นต้องใช้เกรย์สเกล มาตรฐานในการเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงนั้นกับสีบนเกรย์สเกล เพื่ออธิบายเหตุผลว่าเพราะถ้าเป็นสี อื่น เช่น แดง เหลือง เขียว น้ำเงิน ฯลฯ ต้องเปรียบเทียบกับสีแต่ละสี จะต้องใช้เกรย์สเกลที่มีสีแต่ละสีตามเนื้อสี ไม่ว่าจะเป็นสีได้มากน้อยเพียงใด การใช้เกรย์สเกลทำให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบว่าสีได้รับการเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเท่าใด ซึ่งมีเหตุผลอันควรในการใช้สีเท่านี้เป็นตัวอย่าง แทนที่จะใช้วัสดุอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องที่อาจจะทำให้กระบวนการนั้นมีความซับซ้อนมากขึ้น

3.2 ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-E04 : 2013 (E) Colour [5]

วิเคราะห์ด้วยผู้เชี่ยวชาญที่ในห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน ISO 105-E04 : 2013 มีบทบาทสำคัญในการให้บริการทดสอบ ISO 105-E04 : 2013 ส่วนนี้ระบุวิธีการกำหนดความต้านทานของสีต่อเหงื่อของมนุษย์ ในสิ่งทอทุกประเภทและทุกรูปทรง เมื่อสิ่งทอตัวอย่างสัมผัสกับผ้าที่อยู่ติดกัน จะถูกทดสอบในสารละลายสองชนิดที่วางไว้ระหว่างแผ่นสองแผ่นภายใต้แรงดันที่กำหนดในอุปกรณ์ทดสอบ ตัวอย่างและผ้าที่อยู่ติดกันจะถูกทำให้แห้งแยกกัน การเปลี่ยนแปลงของสีของแต่ละตัวอย่างและการย้อมสีของผ้าที่อยู่ติดกันนั้นจะถูกประเมินโดยใช้เครื่องมือหรือโดยเปรียบเทียบกับระดับสีเทา เครื่องทดสอบแต่ละเครื่องประกอบด้วยโครงสเตนเลสสตีลซึ่งมีชิ้นน้ำหนักประมาณ 5 กิโลกรัม และฐานขนาด 60 มิลลิเมตร × 115 มิลลิเมตรถูกติดไว้ เพื่อให้มีแรงดัน (12.5 ± 0.9) kPa บนพื้นที่ประมาณ 60 มิลลิเมตร× 115 มิลลิเมตร ใช้กับชิ้นงานทดสอบขนาด (115 ± 1.5) มิลลิเมตร × (40 ± 2) มิลลิเมตร วางระหว่างแผ่นแก้วหรือแผ่นเรซินอะคริลิกขนาด 100 มิลลิเมตร × 2 มิลลิเมตร เครื่องทดสอบควรสร้างให้มีลักษณะที่ความดันยังคงเสถียรไม่เปลี่ยนแปลง หากชิ้นส่วนของตุ้มน้ำหนักถูกถอดออกในระหว่างการทดสอบ ในหลายกรณีของเส้นใยเซลลูโลสที่ถูกย้อมหลังการทดสอบด้วยสีย้อมโดยตรงที่มีทองแดงหรือเกลือของคอปเปอร์ การทดสอบตามที่กำหนดและการระบายเหงื่อตามธรรมชาติสามารถขจัดทองแดงออกจากสีย้อมได้ ซึ่งอาจทำให้ความคงทนของสีต่อแสง เหงื่อ หรือการซักเปลี่ยนไปอย่างมาก

3.3 สารจากวัตถุวัสดุธรรมชาติที่สามารถละลายน้ำได้ สกัดได้ จากพืชและสัตว์ โดยกรรมวิธีการหมัก การต้ม หรือกรรมวิธีทางเคมี และสามารถให้สีบนเส้นใยได้ [6] สีจากธรรมชาติที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์เพื่อใช้ย้อมผ้ามีมานานกว่า 2,000 ปี รายงานครั้งแรกในการใช้ครามในประเทศจีนมีอายุมากกว่า 6,000 สีธรรมชาติที่ใช้ในประเทศไทยมีหลายสีมี หลากหลาย เพราะมาจากแหล่งวัตถุธรรมชาติที่แตกต่างกัน เช่น จากพืช จากสัตว์ และจากแร่ธาตุ แต่อย่างไรก็ ตามการใช้สีจากพืชต่าง ๆ ก็เริ่มได้รับความนิยมน้อยลงเนื่องจากความไม่คงทนของสีที่ได้บางครั้งไม่สดใสเท่าที่ควรเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สีย้อมสังเคราะห์ ดังนั้นในอุตสาหกรรมสิ่งทอจึงนิยมใช้สีย้อม จากการสังเคราะห์ ปัญหานี้นับว่ามีผลกระทบต่อชาวบ้านด้วย เพราะมีกลุ่มทอผ้าจะเลือกย้อมผ้าด้วยสี สังเคราะห์ด้วย ทำให้ในช่วงเวลาหนึ่งหรืออาจจะเป็นยุคหนึ่งที่อาจ กล่าวได้ว่าคนไทยเองมีการใช้สีจากพืช ธรรมชาติลดลงเปลี่ยน ทัศนคติมาใช้สีย้อมแบบสีสังเคราะห์ เมื่อมีการใช้สีชนิดสังเคราะห์มากขึ้นก็พบว่ามีผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามสีสังเคราะห์ส่วนใหญ่มีโครงสร้างทางเคมีเป็น สารที่มีอันตรายต่อสุขภาพมักพบว่าการใช้สีสังเคราะห์ย้อมผ้าก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยโดย มีอาการคอแห้ง ไอบ่อย หายใจเหนื่อยหอย น้ำตาไหล แสบตา ตาบวม น้ำลายมีสีติดออกมา มือเท้าแตก ขอบเล็บกร่อน และเวียนศีรษะจากกลิ่นสี นอกจากนี้สารเหลือจากการย้อมผ้ายังก่อให้เกิด มลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 การพัฒนาเส้นด้ายบัวหลวงด้วยเทคนิคการย้อมสีธรรมชาติ จำนวน 3 สี ได้แก่ การย้อมเส้นด้ายบัวหลวงด้วยสีแดงจากครั่ง การย้อมเส้นด้ายบัวหลวงด้วยสีเหลืองจากมะพูด และการย้อมเส้นด้ายบัวหลวงด้วยสีน้ำเงินจากครามธรรมชาติ มีกระบวนการพัฒนา 4 ขั้นตอนดังนี้ 1) การเตรียมเส้นด้ายบัวหลวงปรับประจุบวกบนผิวเส้นใย เพราะเส้นใยเซลลูโลสจะมีประจุลบ สีที่ย้อมธรรมชาติก็จะมีประจุลบ ทำให้กระบวนการย้อมสีธรรมชาติจำเป็นต้อง เติมประจุบวกให้กับเส้นใยด้วยวิธีการ (Cationization process) กระบวนการเติมประจุบวก 2) อัตราส่วนและกระบวนการสกัดสีธรรมชาติ 3) การย้อมเส้นด้ายบัวหลวงด้วยสีแดงจากครั่ง สีเหลืองจากเปลือกมะพูด สีน้ำเงินจากครามธรรมชาติ และ 4) กระบวนการผลึกสีธรรมชาติบนเส้นด้ายใยบัวหลวง

4.1.1 การเตรียมเส้นด้ายบัวหลวงปรับประจุบวกบนผิวเส้นใย (Cationization process)

การปรับประจุบวกบนผิวเส้นใย (Cationization process) [7] โดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1) ชั่งสารช่วยย้อม สารประจุบวก Starcat PD หรือ Polyethylene Polyamine ช่วยเกิดผลลัพธ์ให้มีความสามารถในการดูดติดสีย้อมจากธรรมชาติให้ได้สีย้อมที่แท้จริงของสีธรรมชาตินั้น ๆ โดยจะทำให้สีติดเส้นใยได้เข้มมากขึ้นโดยไม่ต้องใช้สารมอร์แดนท์ ที่ความเข้มข้น 10 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร

2) ต้มสารละลายประจุบวกที่เตรียมไว้ให้ได้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

3) นำเส้นด้ายบัวหลวงลงแช่ให้เปียกอย่างสม่ำเสมอ ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที แล้วนำเส้นด้ายมากระตุกให้แห้งหมาด

4.1.2 อัตราส่วนและกระบวนการสกัดสีธรรมชาติ (คิดปริมาณที่เส้นด้ายบัวหลวง 1 กิโลกรัม น้ำสีย้อม 30 ลิตร) แบ่งได้เป็น 3 ตัวอย่าง ได้แก่ สีแดงจากครั่ง สีเหลืองจากเปลือกมะพูด และสีน้ำเงินจากคราม โดยมีรายละเอียดดังนี้

กระบวนการสกัดสีธรรมชาติสีแดงจากครั่ง และสีเหลืองจากเปลือกมะพูด โดยมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) นำวัตถุดิบมาชั่งปริมาณ 3 ระดับ 0.5, 1, 2 กิโลกรัม ตามความเข้มเฉดสีจากนั้นมาตำหรือบดให้ละเอียด

2) ตวงน้ำ 30 ลิตร ลงในภาชนะสเตนเลส

3) นำผ้าขาวบางมัดวัตถุดิบและต้มน้ำเดือดประมาณ 1 ชั่วโมง

4) นำพักไว้และกรองน้ำสีธรรมชาติ เติมน้ำให้ครบ 30 ลิตร กรณีน้ำแห้งไม่ครบจำนวน

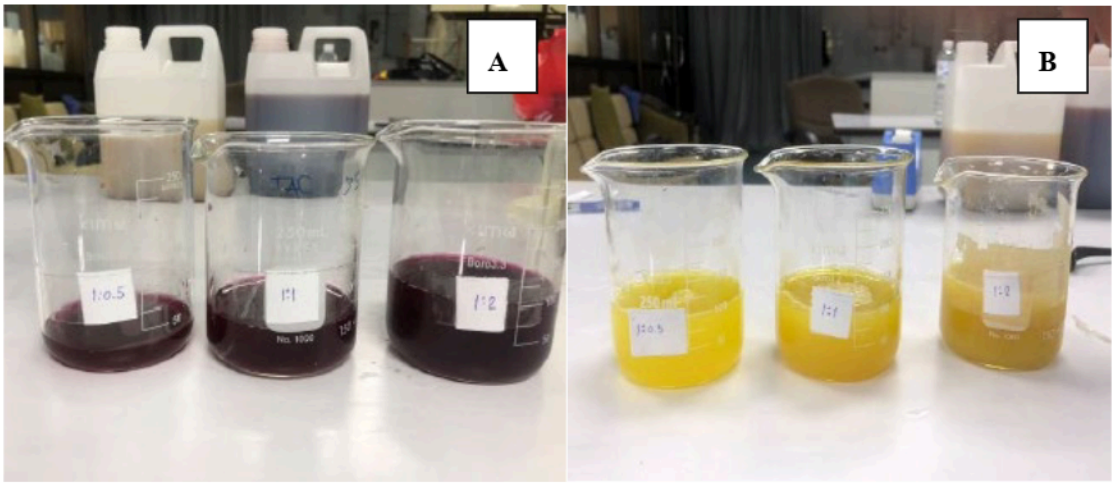
5) เติมสารส้ม (Potassium aluminum sulfate) เติมสารส้มไปช่วยให้สีและของเส้นด้ายดูสดใสและสว่างขึ้น มักใช้กับการย้อมสีน้ำตาล เหลือง และเขียว โดยใช้ปริมาณ 5 กรัมต่อน้ำย้อม 1 ลิตร

6) นำน้ำสกัดสีธรรมชาติที่ใส่สารส้ม ไปย้อมเส้นด้ายบัวหลวง

ตารางที่ 1 อัตราส่วนการสกัดสีธรรมชาติ

ที่	วัตถุดิบ	ปริมาณ
1	เส้นด้ายบัวหลวง	1 กิโลกรัม
2	น้ำสีธรรมชาติ (สีแดงจากครั่ง/ สีเหลืองจากเปลือกมะพูด)อัตราส่วนของครั่ง/ เปลือกมะพูด (กิโลกรัม) : น้ำ (ลิตร)	30 ลิตร
		0.5 กิโลกรัม/ น้ำ 30 ลิตร
		1 กิโลกรัม/ น้ำ 30 ลิตร
		2 กิโลกรัม/ น้ำ 30 ลิตร
3	สารส้ม	150 กรัม/ ลิตร

จากตารางที่ 1 อัตราส่วนการสกัดสีธรรมชาติ สีแดงจากครั่ง เทียบกับน้ำหนักเส้นด้ายบัว 1 กิโลกรัม คือการสกัดสีแดงออกมาจากครั่งดิบ 30 ลิตร ด้วยความเข้มข้นครั่งดิบ 0.5, 1, 2 กิโลกรัม ตามความเข้มเฉดสี และเติมสารส้ม 150 กรัมต่อลิตร สอดคล้องการย้อมสีฝ้ายให้มีสีแดงโดยการย้อมจากครั่ง หน้า 27 – 28 [7] และการสกัดสีเหลืองจากเปลือกมะพูดด้วยความเข้มข้นครั่งดิบ 0.5, 1, 2 กิโลกรัม ตามความเข้มเฉดสี และเติมสารส้ม 150 กรัมต่อลิตร [7] เมื่อเตรียมเสร็จจะได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงในรูป (A) การเตรียมวัตถุดิบสำหรับสกัดสีแดงจากครั่ง และ รูป (B) การเตรียมวัตถุดิบสำหรับสกัดสีเหลืองจากเปลือกมะพูด

การเตรียมน้ำย้อม (ก่อหม้อคราม) คิดปริมาณที่เส้นด้ายบัวหลวง 1 กิโลกรัม น้ำสีย้อม 30 ลิตร) [7] โดยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ชั่งครามเปียกที่ความเข้มข้น 50, 100, 200 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร

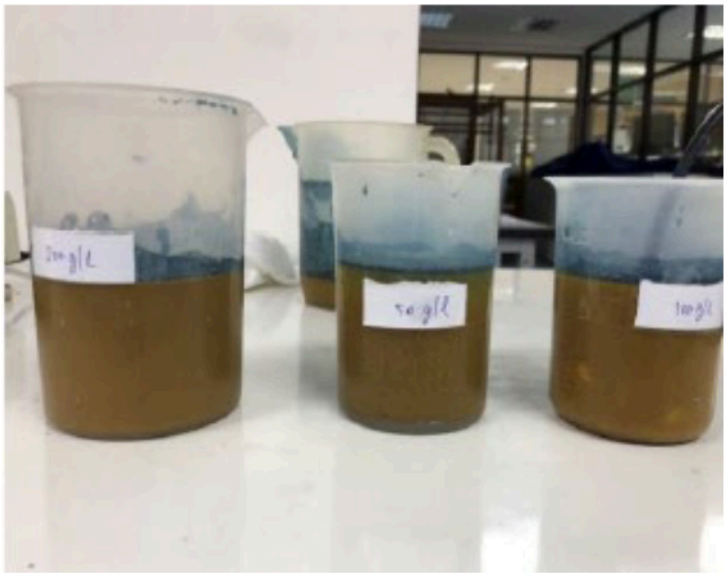
2) ชั่งสารโธโอยูเรียไดออกไซด์ เพื่อเพิ่มความเป็นด่างและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นเพื่อเกิดความกระด้าง ที่ความเข้มข้น 60 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร

3) กวนสารละลายให้เข้ากัน แล้วทิ้งไว้ 15-20 นาที จนน้ำย้อมเปลี่ยนเป็นสีเหลืองทอง เพื่อที่จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเมื่อเจอกับ ออกซิเจนในอากาศ O_2 หรือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นจึงสามารถนำไปย้อมได้

ตาราง 2 อัตราส่วนการสกัดสีน้ำเงินจากคราม

ปริมาณเส้นด้าย / ส่วนผสม	เส้นด้ายบัว 1 กิโลกรัม
ครามเปียก	50 กรัม/ลิตร 100 กรัม/ลิตร 200 กรัม/ลิตร
ไธโอยูเรีย	60 กรัม/ลิตร

จากตาราง 2 อัตราส่วนการสกัดสีน้ำเงินจากครามโดยแบ่งตามความเข้มเฉดสี 3 ระดับ 0.5, 1, 2 กิโลกรัม เทียบกับน้ำหนักเส้นด้ายบัว 1 กิโลกรัม และเติมไธโอยูเรีย 60 กรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเตรียมวัตถุดิบสำหรับสกัดสีน้ำเงินจากคราม

4.1.3 การย้อมเส้นด้ายบัวหลวงด้วยสีแดงจากครั่ง สีเหลืองจากเปลือกมะพูด สีน้ำเงินจากครามธรรมชาติ

การย้อมเส้นด้ายบัวหลวงด้วยสีแดงจากครั่ง และสีเหลืองจากเปลือกมะพูด ด้วยกระบวนการย้อมเส้นด้ายบัวหลวงด้วยเครื่องย้อมแบบอินฟราเรด (Infra-Red (IR) Dyeing machine) [8] โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ตวงน้ำสีตามปริมาณที่ต้องการ ใส่ลงในกระบอกย้อม IR

2) ใส่เส้นด้ายบัวหลวงลงในกระบอกย้อม IR

3) จากนั้นนำเข้าเครื่องย้อม IR ปรับตั้งอุณหภูมิ ที่ 90 องศาเซลเซียส เวลา 30นาที

4) เสร็จจากกระบวนการย้อม นำออกมาล้างน้ำด้วยน้ำเปล่าให้สะอาด แล้วทำการปรับ pH 5-6 ในสภาวะเป็นกรดอ่อนนำเส้นด้ายไปสลัดหมาด ผึ่งให้แห้ง

จากอัตราส่วนและสภาวะการย้อมเส้นด้ายบัวหลวงด้วยสีแดงจากครั่ง และสีเหลืองจากเปลือกมะพูดอัตราส่วนและสภาวะการย้อมเส้นด้ายบัวหลวงด้วยสีแดงจากครั่ง และสีเหลืองจากเปลือกมะพูด โดยแบ่งตามความเข้มเฉดสี 3 ระดับ 0.5 , 1 , 2 กิโลกรัม สภาวะในกระบวนการเตรียมน้ำย้อมอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ด้วยเครื่องย้อมแบบอินฟราเรด (Infra-Red (IR) Dyeing machine) รูปที่ 3

รูปที่ 3 กระบวนการย้อมเส้นด้ายบัวหลวงด้วยเครื่องย้อมแบบอินฟราเรด (Infra-Red (IR) Dyeing machine) ยี่ห้อ Starlet - 3

การย้อมสีน้ำเงินด้วยอัตราส่วนและสภาวะในกระบวนการย้อมสีน้ำเงินจากคราม [7] โดยมีรายละเอียดดังนี้

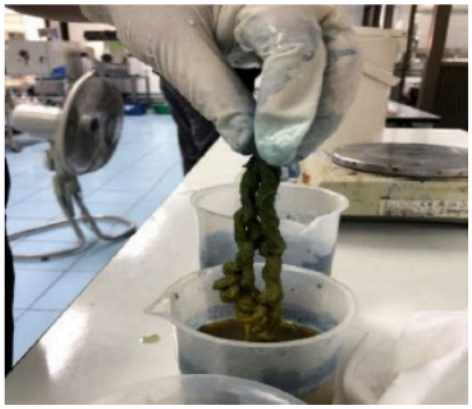
1) ชั่งสารช่วยเปียก Three wet R30 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเส้นด้ายให้มีการดูดซึมของเหลวที่ความเข้มข้น 5-10 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ลงในน้ำย้อมครามที่เตรียมไว้ละลายสารให้เข้ากัน

2) นำเส้นด้ายบัวหลวง ลงมาคลุกเคล้าในน้ำย้อมประมาณ 10-20 นาที จนติดสีอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นนำมาล้างน้ำเปล่าให้สะอาด

3) นำเส้นด้ายบัวหลวง มาแช่ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ H_2O_2 ที่ความเข้มข้น 10 กรัม/ลิตร

4) นำเส้นด้ายบัวหลวง มาล้างด้วยน้ำเปล่าให้สะอาด แล้วทำการปรับ pH 5-6 โดยอยู่ในสภาวะกรดนำเส้นด้ายไปสลัดหมาด ผึ่งให้แห้ง

จากอัตราส่วนและสภาวะในกระบวนการเตรียมน้ำย้อมสีน้ำเงินจากครามอัตราส่วนและสภาวะในกระบวนการเตรียมน้ำย้อมสีน้ำเงินจากคราม โดยเติมสารช่วยเปียก three wet R30 ปริมาณ 5-10 กรัมต่อลิตร ด้วยสภาวะในกระบวนการเตรียมน้ำย้อม อุณหภูมิห้องเวลา 10 - 20 นาที ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การย้อมสีน้ำเงินด้วยอัตราส่วนและสภาวะในกระบวนการย้อมสีน้ำเงินจากคราม

4.1.4 กระบวนการผลึกสีธรรมชาติบนเส้นด้ายใยบัวหลวง โดยมีกระบวนการดังต่อไปนี้ ชั่งสารผนึกสี Fix Lamefix RD เพื่อเพิ่มความคงทนต่อการติดสี และเพิ่มประสิทธิภาพความคงทนต่อการซักในมาตรฐาน ตามมาตรฐาน

ISO 105-C01: 2006 (E) METHOD A (1) (40 องศาเซลเซียส, 30 นาที) ที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร และนำเส้นด้ายบัวหลวง แช่เป็น 10 นาที แล้วทำการสลัดหมาด แล้วผึ่งให้แห้ง ดังรูปที่ 5

รูปที่ 5 กระบวนการผลึกสีธรรมชาติบนเส้นด้ายใยบัวหลวง

4.1.5 วิธีการทดสอบคุณภาพและทางเคมี การติดสีของเส้นด้ายบัวหลวง

ความคงทนของสีต่อการซัก ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-C01: 2006 (E) METHOD A(1) (40 องศาเซลเซียส, 30 นาที) [4]

การทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-E04 : 2013 (E) Colour [4], [5]

5. ผลการวิจัย

ผลการพัฒนาเส้นด้ายบัวหลวงด้านด้วยเทคนิคการย้อมสีธรรมชาติ สีแดงจากครั่ง สีเหลืองจากเปลือกมะพูด และน้ำเงินจากคราม ส่งผลให้การพัฒนาเส้นด้ายบัวหลวงด้านด้วยเทคนิคการย้อมสี แบ่งความเข้มข้นของเฉดสีความเข้มเฉดสี 3 ระดับ 0.5 , 1 , 2 กิโลกรัม ต่อเส้นด้ายบัว 1 กิโลกรัม ดังรูปที่ 6 โดยมีกระบวนการพัฒนา 4 ขั้นตอนดังนี้ 1) การเตรียมเส้นด้ายบัวหลวงปรับประจุบวกบนผิวเส้นด้าย (Cationization process) ส่งผลให้เส้นด้ายมีประจุบวกในการยึดติดสีได้ดีและส่งผลต่อความคงทนของสีต่อการซักได้สูงกว่า เส้นด้ายถ้าไม่มีการปรับประจุบนผิวเส้นด้ายก่อนย้อม [7] 2) อัตราส่วนและกระบวนการสกัดสีธรรมชาติ ส่งผลให้เส้นด้ายมีเฉดสีแต่งต่างตามลำดับดังรูปที่ 6 3) การย้อมเส้นด้ายบัวหลวงด้วยสีแดงจากครั่ง สีเหลืองจากเปลือกมะพูด ด้วยเครื่องย้อมแบบอินฟราเรด (Infra-Red (IR) Dyeing machine) ส่งผลให้เทคนิคการย้อมเส้นด้ายบัวหลวงมีมาตรฐาน [9] สีน้ำเงินจากครามธรรมชาติที่ใช้เทคนิคการย้อมใน สภาวะอุณหภูมิห้อง [8] และ 4) กระบวนการผลึกสีธรรมชาติบนเส้นด้ายใยบัวหลวงรูปที่ 6

รูปที่ 6 ผลการพัฒนาเส้นด้ายด้วยเทคนิคการย้อมสีธรรมชาติ

5.1 ผลการทดสอบคุณภาพและทางเคมี การติดสีของเส้นด้ายบัวหลวง

5.1.1 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก ด้วยมาตรฐาน ISO 105-C01: 2006 (E) METHOD A(1) (40 องศาเซลเซียส, 30 นาที) ตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก

ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซัก	สีแดงจากครั่ง	สีเหลือจากเปลือกมะพูด	สีน้ำเงินจากคราม
สีเปลี่ยนจากเดิม (ระดับ)	4	2	4
สีตกติดผ้าขาว (ระดับ)			
ACETAT	4-5	4-5	4
COTTON	4-5	4	4-5
NYLON	4-5	4-5	3
POLYESTER	4-5	4-5	4-5
ACRYLIC	4-5	4-5	4-5
WOOL	4-5	4-5	4-5

หมายเหตุ ความหมายของผลการทดสอบ ระดับที่ 1 คือ แย่ที่สุด ระดับ 1- 2 คือ แย่ – แย่ที่สุด ระดับ 2 คือ แย่ ระดับที่ 2- 3 คือ แย่ถึงปานกลาง ระดับที่ 3 ปานกลาง ระดับที่ 3-4 คือ ปานกลางถึงดี ระดับที่ 4 คือ ดี ระดับที่ 4-5 คือ ดีถึงดีมาก ระดับที่ 5 คือ ดีมาก

จากผลการทดสอบผลการทดสอบความคงทนของสีต่อการซักตารางที่ 3 พบว่า สีแดงจากครั่ง ค่าความคงทนของสีต่อการซัก เมื่อเทียบกับหลักเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ซึ่งกำหนดค่าความคงทนของสีต่อการซักของสีธรรมชาติให้มีค่าไม่ต่ำกว่าระดับ 2-3 เต็ม 5 ผลการทดสอบผ่านตามมาตรฐาน ซึ่งได้ค่าผลการทดสอบอยู่ที่ระดับ 4-5 ซึ่งเป็นระดับค่าความคงทนของสีต่อการซักที่สูงและดีมาก และค่าการเปลี่ยนสีจากเดิมอยู่ในระดับ 4 ซึ่งผลการทดสอบทุกค่าผ่านมาตามมาตรฐานผลิจภัณฑ์ชุมชน (มผช.) สีเหลือจากเปลือกมะพูด ค่าความคงทนของสีต่อการซัก เมื่อเทียบกับหลักเกณฑ์

ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ซึ่งกำหนดค่าความคงทนของสีต่อการซักของสีธรรมชาติให้มีค่าไม่ต่ำกว่าระดับ 2 - 3 เต็ม 5 ผลการทดสอบค่าความคงทนของสีต่อการซักส่วนใหญ่อยู่ที่ระดับ 4 - 5 ยกเว้นเส้นใย COTTON อยู่ในระดับ 4 ซึ่งเป็นระดับค่าความคงทนของสีต่อการซักที่สูงและดีมาก แต่ค่าการเปลี่ยนสีจากเดิมอยู่ในระดับ 2 ซึ่งอาจต้องใช้สารป้องกันสีตกใส่เข้าช่วยเพื่อทำให้สีมีแรงยึดเหนี่ยวกับเส้นใยได้มากขึ้น สีน้ำเงินจากคราม ค่าความคงทนของสีต่อการซัก เมื่อเทียบกับหลักเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ซึ่งกำหนดค่าความคงทนของสีต่อการซักของสีธรรมชาติให้มีค่าไม่ต่ำกว่าระดับ 2-3 เต็ม 5 ผลการทดสอบค่าความคงทนของสีต่อการซักส่วนใหญ่อยู่ที่ระดับ 4-5 ซึ่งเป็นระดับค่าความคงทนของสีต่อการซักที่สูงและดีมาก ยกเว้นการตกติดเส้นใย ACETAT ได้ระดับ 4 และการตกติดเส้นใย NYLON ได้ระดับ 3 และค่าการเปลี่ยนสีจากเดิมอยู่ในระดับ 4 ซึ่งผลการทดสอบทุกค่าผ่านมาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช.828/2558 มาตรฐานผลิตภัณฑ์ผ้าทอมือ ข้อที่ 5.10 หน้า 3 ที่กล่าวไว้ว่า ความคงทนของสีต่อการซักต้องไม่น้อยกว่าเกรย์สเกลระดับ 2-3 ทั้งการเปลี่ยนสีและการเปื้อนสี ของการย้อมสีธรรมชาติ [10]

5.1.2 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 105-E04: 2013 (E) ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ

ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ	สีแดงจากครั่ง	สีเหลือจากเปลือกมะพูด	สีน้ำเงินจากคราม
สภาวะกรด (pH)	5-6	5-6	5-6
สีเปลี่ยนจากเดิม (ระดับ)	4-5	4-5	4-5
สีตกติดผ้าขาว (ระดับ)			
ACETAT	4-5	4-5	4-5
COTTON	4-5	4-5	4-5
NYLON	4-5	4-5	4-5
POLYESTER	4-5	4-5	4-5
ACRYLIC	4-5	4-5	4-5
WOOL	4-5	4-5	4-5
สภาวะด่าง (pH)	8-9	8-9	8-9
สีเปลี่ยนจากเดิม (ระดับ)	4-5	4-5	4-5
สีตกติดผ้าขาว (ระดับ)			
ACETAT	4-5	4-5	4-5
COTTON	4-5	4-5	4-5
NYLON	4-5	4-5	4-5
POLYESTER	4-5	4-5	4-5
ACRYLIC	4-5	4-5	4-5

ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ	สีแดงจากครั่ง	สีเหลืองจากเปลือกมะพูด	สีน้ำเงินจากคราม
WOOL	4-5	4-5	4-5

หมายเหตุ ความหมายของผลการทดสอบ ระดับที่ 1 คือ แย่ที่สุด ระดับ 1- 2 คือ แย่ – แย่ที่สุด ระดับ 2 คือ แย่ ระดับที่ 2- 3 คือ แย่ถึงปานกลาง ระดับที่ 3 ปานกลาง ระดับที่ 3-4 คือ ปานกลางถึงดี ระดับที่ 4 คือ ดี ระดับที่ 4-5 คือ ดีถึงดีมาก ระดับที่ 5 คือ ดีมาก

จากผลการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ พบว่า สีแดงจากครั่ง ค่าความคงทนของสีต่อเหงื่อ ทั้งในสภาวะเหงื่อที่เป็นกรดและด่าง เมื่อเทียบกับหลักเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ซึ่งกำหนดค่าความคงทนของสีต่อการซักของสีธรรมชาติให้มีค่าไม่ต่ำกว่าระดับ 2-3 เต็ม 5 ผลการทดสอบผ่านตามมาตรฐาน ซึ่งได้ค่าผลการทดสอบต่างๆอยู่ที่ระดับ 4-5 เต็ม 5 ซึ่งเป็นระดับค่าความคงทนของสีต่อเหงื่อและการเปลี่ยนแปลงของสีที่อยู่ในระดับสูงและดีมาก สีเหลืองจากเปลือกมะพูด ค่าความคงทนของสีต่อเหงื่อ ทั้งในสภาวะเหงื่อที่เป็นกรดและด่าง เมื่อเทียบกับหลักเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ซึ่งกำหนดค่าความคงทนของสีต่อการซักของสีธรรมชาติให้มีค่าไม่ต่ำกว่าระดับ 2-3 เต็ม 5 ผลการทดสอบผ่านตามมาตรฐาน ซึ่งได้ค่าผลการทดสอบต่างๆอยู่ที่ระดับ 4-5 เต็ม 5 ซึ่งเป็นระดับค่าความคงทนของสีต่อเหงื่อและการเปลี่ยนแปลงของสีที่อยู่ในระดับสูงและดีมาก สีน้ำเงินจากคราม ค่าความคงทนของสีต่อเหงื่อ ทั้งในสภาวะเหงื่อที่เป็นกรดและด่าง เมื่อเทียบกับหลักเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ซึ่งกำหนดค่าความคงทนของสีต่อการซักของสีธรรมชาติให้มีค่าไม่ต่ำกว่าระดับ 2-3 เต็ม 5 ผลการทดสอบผ่านตามมาตรฐาน ซึ่งได้ค่าผลการทดสอบต่างๆอยู่ที่ระดับ 4-5 เต็ม 5 ซึ่งเป็นระดับค่าความคงทนของสีต่อเหงื่อและการเปลี่ยนแปลงของสีที่อยู่ในระดับสูงและดีมาก

6. สรุป

ผลการพัฒนาเส้นด้ายบัวหลวงด้านด้วยเทคนิคการย้อมสีธรรมชาติ ครั่ง มะพูด และคราม พบว่ากระบวนการพัฒนามีกระบวนการพัฒนาแบ่ง 4 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมเส้นด้ายบัวหลวงปรับประจุบวกบนผิวเส้นใย (Cationization process) อัตราส่วนและกระบวนการสกัดสีธรรมชาติ การย้อมเส้นด้ายบัวหลวงด้วยสีแดงจากครั่ง สีเหลืองจากเปลือกมะพูด สีน้ำเงินจากครามธรรมชาติ และกระบวนการผลึกสีธรรมชาติบนเส้นด้ายใยบัวหลวง ผลการทดสอบคุณภาพการติดสีของเส้นด้ายบัวหลวง พบว่าสีแดงจากครั่ง เมื่อเทียบกับหลักเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ความคงทนของสีต่อการซักค่าความคงทนของสีต่อการซักของสีธรรมชาติให้มี ผลการทดสอบผ่านตามมาตรฐาน อยู่ในระดับค่าความคงทนของสีต่อการซักที่สูงและดีมาก ค่าการเปลี่ยนสีจากทุกค่าผ่านมาตามมาตรฐานผลิจภัณฑ์ชุมชน (มผช.) สีเหลืองจากเปลือกมะพูดเมื่อเทียบกับหลักเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ผลสรุปของค่าความคงทนของสีต่อการซัก ส่วนใหญ่อยู่ที่ระดับดีมาก ยกเว้นเส้นใย COTTON อยู่ในระดับดี ซึ่งเป็นระดับค่าความคงทนของสีต่อการซักที่สูงและดีมาก ดังนั้นสอดคล้องกับหลักการติดสีที่ดีและไม่ตกสีซึ่งเส้นใยจะต้องมีคุณสมบัติดูดซึมน้ำได้ดี และโมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับผิวภายนอกเส้นใยก่อนความชื้น ความร้อน จะส่งผลกระทบให้เส้นใยพองตัว และจะให้สีวิ่งเข้าไปในช่องว่างเพื่อไปเชื่อมโยงกับโมเลกุลภายในของเส้นใย แต่ค่าการเปลี่ยนสีจากเดิมอยู่ในระดับแย่ ซึ่งอาจเป็นผลจากการใช้สารป้องกันสีตกในปริมาณน้อย การใส่สารป้องกันสีตก เพื่อผลึกสีธรรมชาติบนเส้นด้ายใยบัวหลวง โดยใช้สารผนึกสี Fix Lamefix RD เข้าในปริมาณที่มากกว่าเดิมเพื่อทำให้สีมีแรงยึดเหนี่ยวกับเส้นใยได้มากขึ้น สีน้ำเงินจากคราม เมื่อเทียบกับหลักเกณฑ์ของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ค่าความคงทนของสีต่อการซัก ส่วนใหญ่อยู่ที่ระดับดีถึงดีมาก ยกเว้นการตกติดเส้นใย ACETAT ได้ระดับดี และการตกติดเส้นใย NYLON ได้ระดับปานกลาง และค่าการเปลี่ยนสีจากเดิมอยู่ในระดับดี ซึ่งเมื่อเทียบกับมาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) ผลการทดสอบทุกค่าผ่าน

7. ข้อเสนอแนะ

การวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทดสอบการพัฒนาเส้นด้ายบัวหลวงด้านด้วยเทคนิคการย้อมสีธรรมชาติ สีแดงจากครั่ง สีเหลืองจากเปลือกมะพูด และสีน้ำเงินจากคราม และทดสอบคุณสมบัติการติดสีทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีของเส้นด้ายบัวหลวงด้วยมาตรฐานความคงทนของสีต่อการซัก และการทดสอบความคงทนของสีต่อเหงื่อ ควรเพิ่มการทดสอบการทนต่อแสง UV เพื่อดูคุณสมบัติของสีธรรมชาติต่อการย้อมเส้นด้าย

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Vuthiganond, N., Chitichotpanya, P., Nakpathom, M., and Mongkholrattanasit, R. (2022). Ecological dyeing of acrylic yarn with colorant derived from natural lac dye. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, *32*(4), 71-78.

[2] กิตติศรี นุชศาสตร์ (2018). โครงสร้างและสมบัติวัสดุเสริมแรงเส้นใยแก้วสำหรับสร้างชิ้นส่วนอากาศยานไร้นักบิน. วารสารนายเรืออากาศวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 14, 20-24.

[3] Guan, Q. F., Han, Z. M., Zhu, Y., Xu, W. L., Yang, H. B., Ling, Z. and Yu, S. H. (2021). Bio-inspired lotus-fiber-like spiral hydrogel bacterial cellulose fibers. *Nano letters*, *21*(2), 952-958.

[4] Institute, I. S. (2024, January 15). *Industrial Standards Institute*. Retrieved from www.tisi.go.th

[5] Mahamasuhaimi Masae, P. J. (2017). Fastness and UV Protection of Silk Dyed With Tea . *Srinakharinwirot University (Journal of Science and Technology)* , 76-79.

[6] กนกพรรณ ศักดิ์สุริยา. (2549). ผลของอุณหภูมิและภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ต่อการดูดติดของสีรีแอคทีฟโดยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. ในวิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, *สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม* (หน้า 65-58). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

[7] Mongkholrattanasit, R. (2022). *Bleaching, dyeing, printing, designing and creating handwoven cotton products*. Bangkok.

[8] Khwanhathai Aonfak1 Nittaya Kanakiat, P. U. (2016). Dyeing Polyester Fabrics with Curcumin using Infrared Dyeing Machine. *Burapha Science Journal*, 25-26.

[9] Sontisombat, P. C. (2019). An Application of Polycationic Agent to Improve the Dyeing Behaviourof Direct Dyes on Cotton Fabric. *Journal of Engineering, RMUTT*, 13 – 14

[10] Thai Community Product Standard. (2015). Products Made from Hand Woven Fabrics. Retrieved on January 15,2024, from https://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0828_58

Sci & Tech.J.NKRAFA.[2024] 20(2), 110-125

ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการบริโภคอาหารภายใต้สถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 สายพันธุ์โอไมครอน

DETERMINING FACTOR INFLUENCING CONSUMER BEHAVIOR DURING THE COVID-19 PANDEMIC: OMICRON VARIANT

Received : 2 April, 2024
Revised : 12 September , 2024
Accepted : 11 November, 2024

[1#]พุฒิพงษ์ ธนวีระกุล, [2*]ธนธร ชื่นยินดี[*], [3#]ณัฐกิตต์ อยู่ด้วง

[1]คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

[2]ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการการบินกองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

[3]คณะบริหารธุรกิจ สถาบันเทคโนโลยีแห่งสุวรรณภูมิ

[1#]Puthipong Tanaveerakul [2*] Thanatorn Chuenyindee[*], [3#]Nattakit Yuduang

[1] Business School, University of The Thai Chamber of Commerce

[2] Industrial Engineering and Aviation management, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

[3]Faculty of Business Administration, Suvarnabhumi Institute of Technology

[#]Puthipong_tan@utcc.ac.th, [*]thanatorn_chu@rtaf.mi.th, [#]Nuttakit33@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการบริโภคอาหารของคนไทยภายใต้สถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 สายพันธุ์โอไมครอน โดยใช้หลักการวิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้างเพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเหตุผลที่ส่งผลกระทบต่อการตัดสินใจในการบริโภคอาหารของคนไทย แบบสอบถามจำนวน 45 ข้อได้ถูกรวบรวมจากคนไทยที่อาศัยอยู่ในจังหวัดกรุงเทพมหานคร และปริมณฑลจำนวนทั้งสิ้น 400 คนผ่านช่องทางออนไลน์ภายใต้มาตรการควบคุมการแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 สายพันธุ์โอไมครอนอย่างเคร่งครัด ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าตัวเลือกอาหารส่งผลโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการบริโภคของผู้บริโภคในช่วงการแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 โดยความสะดวกสบายส่งผลทางตรงอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวเลือกอาหารมากที่สุด ตามมาด้วย ความอยากอาหาร การรับรู้ถึงภัยอันตราย การรับรู้ถึงความเปราะบาง และ เงื่อนไขสุขภาพ อย่างไรก็ตามผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นว่า งบประมาณไม่ส่งผลโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวเลือกอาหารในช่วงการแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 การศึกษานี้เป็นการศึกษาแรกที่ผนวกรวมแนวคิดทฤษฎีแรงจูงใจในการป้องกันโรค และทฤษฎีพฤติกรรมตามแผนเข้าด้วยกัน อนึ่งงานวิจัยนี้อาจนำไปใช้เพื่อเป็นโมเดลต้นแบบในการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจของคนไทยภายใต้สถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 เพื่อเป็นแนวทางและประโยชน์กับทางภาครัฐในการบรรเทา และลดความเสี่ยงจากโรคระบาดได้อย่างเป็นรูปธรรม

คำสำคัญ: โมเดลสมการโครงสร้าง, พฤติกรรมการบริโภค, สถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019

Abstract

This research aimed to determining factors affecting consumer behavior refer to Thai people during the COVID-19 pandemic, especially Omicron variant. Structural Equation Modeling was utilized to find casual relationships under the behavioral decision of Thai people. Total of 400 Thais around Bangkok and metropolitan provinces were participated and filled 45 online questionnaires under strictly prevention and control of COVID-19. The research findings indicate that food choices had a direct and significant impact on consumer eating behaviors during the COVID-19 pandemic. Convenience had the strongest direct effect on food choices, followed by appetite, risk perception, vulnerability perception, and health conditions. However, the research also showed that budget constraints did not have a significant direct impact on food choices during the pandemic. This study is a very first study that integrated the Protection Motivation Theory and Theory of Planned Behavior together. In addition, this research could be substantial findings that can be used as a preliminary model for other decision-making of Thai people during COVID-19 pandemic for beneficial and pandemic mitigation as well.

Keywords: Structural equation modeling, Consumer behavior, COVID-19 pandemic

1. บทนำ

จากสถานการการณ์แพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 ซึ่งทวีคูณความรุนแรงมาตั้งแต่เดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2562 แสดงให้เห็นถึงความร้ายแรงที่เกิดขึ้นจากโรคระบาดดังกล่าว จากข้อมูล ณ เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2567 มีผู้ติดเชื้อจากการระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 เป็นจำนวนทั้งสิ้น 776,798,873 คน รวมถึงมีผู้คนเสียชีวิตจำนวน 67,074,400 คนจากทั่วโลก และปัจจุบันมีผู้ได้รับวัคซีนป้องกันโรคแล้วจำนวน 13,644,673,610 โดส [1] โดยทางรัฐบาล เจ้าหน้าที่ทางการแพทย์ รวมถึงประชาชนชาวไทยทุกคนต่างก็เป็นส่วนหนึ่งที่ได้รับผลกระทบ และมีส่วนรวมเพื่อบรรเทาเยียวยา รวมถึงลดความเสี่ยง จากการติดเชื้อโควิด 2019 การสูญเสียชีวิต หรือแม้กระทั่งการสูญเสียทางด้านเศรษฐกิจอันเนื่องมาจากโรคระบายร้ายแรงครั้งนี้

จากสถานการณ์ปัจจุบัน เป็นไปไม่ได้เลยที่ภาคเศรษฐกิจจะไม่ได้รับผลกระทบจากสถานการณ์การแพร่ระบาดครั้งนี้ ธุรกิจต่าง ๆ ได้รับผลกระทบจากสภาวะนี้ทั้งสิ้นไม่มากก็น้อย ธุรกิจท่องเที่ยวในประเทศดูซบเซาลง เนื่องจากประเทศไทยไม่สามารถรับนักท่องเที่ยวเป็นจำนวนมากได้ภายใต้มาตรการควบคุมการระบาดของโรค ทำให้ธุรกิจต่าง ๆ ได้รับผลกระทบต่อกันเป็นลูกโซ่ ซึ่งธุรกิจร้านอาหารก็เป็นธุรกิจหนึ่งที่ได้รับผลกระทบอย่างหนักจากสถานการณ์การแพร่ระบาดครั้งนี้

อันเนื่องมาจากการที่ร้านอาหารไม่สามารถเปิดให้บริการภายในร้าน (Dine in) ได้ จึงเหลือเพียงแค่ตัวเลือกในการสั่งกลับบ้านและการส่งเท่านั้น [2] รวมถึงการที่รัฐบาลได้ออกมาตรการเพื่อลดการแพร่ระบาดของไวรัส ให้มีการเว้นระยะห่างทางกายภาพ (Physical Distancing) ทั้งยังมีการรณรงค์ให้ภาครัฐและเอกชนต่างทำงานจากที่บ้าน (Work from Home) หรือสลับกันทำงานระหว่างบ้านกับที่ทำงาน (Hybrid WFH) และการให้นักเรียนหรือนักศึกษาเรียนออนไลน์ระยะไกล (Online) นั้นทำให้ประชาชนชาวไทยต่างตระหนักถึงความรุนแรงและความเสี่ยงในการติดเชื้อ ส่งผลให้ประชาชนต่างอยู่บ้านกันมากขึ้นและต่างมีพฤติกรรมการบริโภคอาหารที่แตกต่างออกไปจากเดิม คือการนิยมสั่งอาหารมารับประทานทานที่บ้านผ่านทางแอปพลิเคชันสั่งอาหารออนไลน์ (Food delivery)

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการบริโภคอาหาร และการตัดสินใจเลือกซื้ออาหารภายใต้สถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 โดยการเก็บข้อมูลจากผู้บริโภคชาวไทยในจังหวัดกรุงเทพมหานครและปริมณฑล และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เชิงสถิติ

2. เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเหตุและผล (Casual relationship) ให้ได้มาซึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผู้บริโภคโดยตรง ถือได้ว่างานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยกลุ่มแรกๆที่ได้ศึกษาพฤติกรรมของผู้บริโภคผ่านการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเหตุและผลเพื่อเป็นประโยชน์ต่อรัฐบาลในการออกมาตรการเยียวยา และเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการร้านอาหาร หรือผู้ให้บริการแอปพลิเคชันสั่งอาหารออนไลน์ในการดำเนินธุรกิจจนมีความสามารถในการแข่งขัน (Competitive advantage) กับรายอื่น ๆ ได้อย่างยั่งยืน

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีแรงจูงใจในการป้องกันโรค

ทฤษฎีแรงจูงใจในการป้องกันโรค (Protection motivation theory) หรือ The PMT model ถูกนำมาใช้ในการประเมินความเข้าใจหรือประเมินความกลัวในด้านของการรับรู้ข้อมูลข่าวสารต่าง ๆ รวมถึงประสบการณ์ด้านสุขภาพต่าง ๆ ที่เคยได้รับ เช่น การเป็นโรครุนแรงหรือการติดเชื้อ ทฤษฎีนี้อาจรวมถึงการประเมินปัจจัยต่าง ๆ ที่อาจส่งผลต่อความน่าจะเป็นในการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของการตอบสนองต่อสิ่งเร้าของบุคคลในด้านสุขภาพ [3] แนวคิดที่สำคัญของทฤษฎีนี้คือ การสร้างแรงจูงใจหรือแรงขับเคลื่อนในตัวบุคคลเพื่อต่อต้านสิ่งที่เห็นว่าอาจจะก่อให้เกิดอันตรายต่อตัวเองและการควบคุมตนเองได้ เช่น การรักษาระยะห่างทางสังคม การไม่เข้าใกล้ผู้ป่วยโรคอีสุกอีใส การหวาดระแวงผู้ป่วยที่ติดเชื้อ HIV ทั้ง ๆ ที่ผู้ป่วยไม่สามารถแพร่เชื้อได้โดยการสัมผัส และการบริโภคอาหารและการออกกำลังกายของผู้ป่วยเบาหวาน เป็นต้น [4]

ในเบื้องต้นผู้วิจัยได้นำองค์ประกอบของทฤษฎีแรงจูงใจในการป้องกันโรคมาเป็นโมเดลเพื่อใช้สำหรับการสร้างสมมติฐาน ได้แก่ 1) การรับรู้ถึงความรุนแรงของโรคหรือภัยคุกคาม (Perceived Severity) เช่น การรับรู้ถึงความรุนแรงของไวรัสโคโรนา 2019 2) การรับรู้ถึงความเปราะบางของตัวบุคคล (Perceived Vulnerability) เช่น การที่เรารู้สึกกังวลเมื่อคนรอบตัวอาจจะติดไวรัสโคโรนา 2019 และ 3) พฤติกรรม (Behavior) ที่เกิดจากการระวังตัวหรือการป้องกันตนเองในสภาวะการแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 [5] เป็นปัจจัยเชิงสาเหตุของพฤติกรรมการบริโภคอาหาร

3.2 ทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน

ทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน (Theory of Planned Behavior: TPB) เป็นทฤษฎีเชิงจิตวิทยาที่ต่อยอดมาจากทฤษฎีการกระทำด้วยเหตุผล ซึ่งถูกแสดงออกมาจากเจตนาที่แท้จริงของมนุษย์ [6] โดยเพิ่มเติมข้อจำกัดในด้านของพฤติกรรมบุคคลในการควบคุมพฤติกรรมที่ไม่ได้แสดงออกจากการกระทำด้วยเหตุผล ประกอบไปด้วย ทัศนคติต่อพฤติกรรม การคล้อยตามกลุ่มตัวอย่าง และการรับรู้ความสามารถของตนเองในการควบคุมพฤติกรรม [7] จากงานวิจัยของ Prasetyo, et. al., 2020 [8] ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความพึงพอใจของลูกค้าและความจงรักภักดีต่อแบรนด์ในบริการส่งอาหารออนไลน์ภายใต้สถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคโควิด 19 โดยใช้ทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน ผลจากการวิจัยพบว่าแรงจูงใจเชิงรุกส่งผลสูงสุดต่อความพึงพอใจของลูกค้าในการใช้บริการแอปพลิเคชันสั่งอาหารออนไลน์ อีกทั้งยังส่งผลต่อพฤติกรรมของผู้บริโภคอีกด้วย ในเบื้องต้นผู้วิจัยได้นำองค์ประกอบของทฤษฎีพฤติกรรมตามแผนมาเป็นโมเดลเพื่อใช้สำหรับการสร้างสมมติฐานในด้านของพฤติกรรมการบริโภค (Consumer Behavior) นั่นเอง

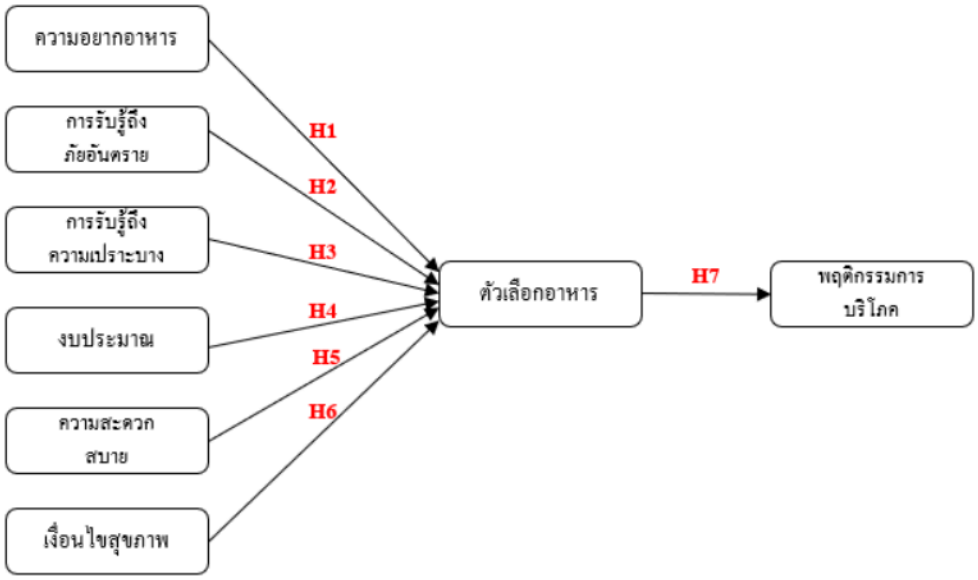
3.3 แบบจำลองโมเดลสมการโครงสร้าง

แบบจำลองโมเดลสมการโครงสร้าง (Structural Equation Modeling, SEM) เป็นเทคนิคทางสถิติขั้นสูงที่ใช้สำหรับศึกษาและวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเหตุและผลระหว่างตัวแปรแฝงต่าง ๆ ที่มีความสัมพันธ์กันต่อเนื่องหลายตัวแปร โดยทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของโมเดลทุกตัวพร้อมกันด้วยระบบสมการ (Simultaneous equation) เป็นเทคนิคที่นิยม

ใช้ในงานวิจัยที่มีกรอบแนวความคิดหรือทฤษฎีต่าง ๆ รองรับ ส่วนมากมักจะใช้ในการยืนยันทดสอบปัจจัยหรือสมมติฐาน (Confirmatory analysis) ปัจจุบันถือว่าเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในประเทศไทยและต่างประเทศ [9]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเห็นได้ว่าแบบจำลองโมเดลสมการโครงสร้างถูกประยุกต์เพื่อใช้ในการประเมินพฤติกรรมของมนุษย์ในด้านของการยอมรับ ความตั้งใจ การบริโภคและอุปโภค [10] [11] [12] [13] [14] และ [15]ได้ศึกษาแบบจำลองโมเดลสมการโครงสร้างเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้โมบายแอปพลิเคชันในการสั่งอาหารของผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานครในสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 นอกจากนี้ นลินี และคณะ, 2564 [2] ยังได้ศึกษาแบบจำลองโมเดลสมการโครงสร้างเกี่ยวกับพฤติกรรมการซื้ออาหารเดลิเวอรี่ออนไลน์ในสถานการณ์โควิด 19 อีกด้วย จึงเห็นได้ว่าแบบจำลองโมเดลสมการโครงสร้างสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเหตุและผลในการยอมรับการใช้งานแอปพลิเคชัน รวมถึงพฤติกรรมการจับจ่ายใช้สอยได้เป็นอย่างดี

4. กรอบแนวคิดงานวิจัย



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดในงานวิจัย

5. สมมติฐานในงานวิจัย

อันเนื่องมาจากมาตรการการเว้นระยะห่างทางกายภาพ (Physical distancing) ที่ทางรัฐบาลกำหนดให้มีการเว้นระยะห่างอย่างน้อย 1 เมตร หรือแม้แต่การรณรงค์ให้มีการทำงานที่บ้าน การเรียนการสอนออนไลน์ จึงส่งผลให้คนไทยมีความตระหนักรู้ถึงความอันตรายและความรุนแรงของโรค [16] พฤติกรรมการบริโภคของคนไทยจึงเปลี่ยนไปให้สอดคล้องกับมาตรการที่ทางรัฐบาลกำหนดไว้ จากงานวิจัยของ อกนิษฐ์ [17] ยังกล่าวไว้ว่าตัวเลือกรายการอาหารและงบประมาณมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ จึงเป็นที่มาของการตั้งสมมติฐานต่าง ๆ เหล่านี้

H1: ความอยากอาหารส่งผลกระทบโดยตรงต่อตัวเลือกเมนู

เนื่องมาจากความอยากอาหารนั้นถูกสั่งการโดยตรงจากระบบประสาทส่วนกลางและระบบประสาทส่วนปลาย การที่ระบบประสาทส่วนกลางได้กระตุ้นความรู้สึกอยากอาหารไปยังประสาทส่วนปลายนั้น ส่งผลทำให้เกิดความอยากอาหารออกมา [18] เมื่อคนเราเห็นเมนูอาหารหรือได้กลิ่น การรับรู้สีและกลิ่นของอาหารจะส่งสัญญาณไปที่สมอง ทำให้สมองเข้าใจว่าอาหารมีรสชาติอร่อย โดยเฉพาะโลโก้ของอาหารที่มีสีแดง รวมถึงการตกแต่งเมนูอาหาร หรือแพ็คเกจอาหารที่มีสีแดง จะทำให้สมองเข้าใจว่าอาหารรสชาติอร่อยทำให้อยากรับประทานอาหารมากยิ่งขึ้น อีกทั้งเมื่อเห็นรูปภาพ

อาหารที่มีการตกแต่งตามลักษณะดังกล่าวก็จะรู้สึกอยากอาหารทันที และเลือกซื้อในที่สุด [19]

H2: การรับรู้ถึงภัยอันตรายส่งผลกระทบโดยตรงต่อตัวเลือกเมนู

การรับรู้ถึงภัยคุกคามและความรุนแรงที่จะเกิดขึ้นส่งผลต่อแรงจูงใจให้เกิดความตระหนักถึงอันตรายของการบริโภคอาหารหรือการเลือกเมนู เช่น การรับรู้ถึงภัยอันตรายจากการรับประทานอาหารประเภทอาหารจานด่วน อาหารตามสั่ง อาหารสำเร็จรูป หรือกึ่งสำเร็จรูป ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเลือกรับประทานอาหารเหล่านี้ [20]

H3: การรับรู้ถึงความเปราะบางส่งผลกระทบโดยตรงต่อตัวเลือกเมนู

ความวิตกกังวลและการรับรู้ความเสี่ยงต่อการติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 มีความสัมพันธ์กับการเลือกเมนูอาหารและการเลือกร้านอาหารข้างนอกบ้านหรือนอกที่ทำงาน

H4: งบประมาณส่งผลกระทบโดยตรงต่อตัวเลือกเมนู

เมื่อมนุษย์มีความกลัวต่อโรคภัยไข้เจ็บ ตามสัญชาติญาณในการเอาตัวรอดของมนุษย์ ก็จะก่อให้เกิดแรงจูงใจในการป้องกันโรคตามมา จึงทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้ชีวิตไปในทางที่ดีขึ้น ระมัดระวังขึ้น และสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น [21] ในขณะเดียวกันในเรื่องของงบประมาณในการอุปโภคบริโภคก็ส่งผลโดยตรงต่อความตั้งใจในการซื้ออาหารอีกด้วย [17] จึงเป็นที่มาของการตั้งสมมติฐานนี้

H5: ความสะดวกสบายส่งผลกระทบโดยตรงต่อตัวเลือกเมนู

เมื่ออยู่ในสภาวะที่เร่งรีบคนไทยมักจะบริโภคอาหารประเภทอาหารจานด่วนหรือฟาสต์ฟู้ดโดยคำนึงถึงความสะดวกสบายเป็นหลัก [22] เป็นผลให้สังคมไทยกำลังเผชิญหน้ากับปัญหาสุขภาพ อันเนื่องมาจากพฤติกรรมการบริโภคอาหารไม่ถูกต้องตามหลักสุขลักษณะ จึงก่อให้เกิดโรคภัยไข้เจ็บมากมายที่มาจากอาหาร เช่น โรคหัวใจ โรคมะเร็ง และโรคเบาหวาน เป็นต้น [24] พฤติกรรมการบริโภคอาหารของคนไทยเน้นความสะดวกสบาย รวดเร็ว แต่ไม่เน้นในเรื่องของคุณค่าทางโภชนาการ [25] นอกจากนี้ความสะดวกสบายส่งผลให้บุคคลรู้สึกว่าอยากรับประทานอาหารในร้านที่อยู่ใกล้บ้านหรือที่ทำงานมากกว่าร้านที่อยู่ไกล และมีแนวโน้มที่จะเลือกสั่งอาหารมาจากบริการส่งอาหารผ่านทาง Application แทนมากขึ้น เพื่อให้เกิดความรู้สึกสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น [12] และ [23]

H6: เงื่อนไขสุขภาพส่งผลกระทบโดยตรงต่อตัวเลือกเมนู

เงื่อนไขสุขภาพ เช่น โรคอ้วน ไขมันในเลือดสูง เบาหวาน เป็นต้น ซึ่งเงื่อนไขเหล่านี้ทำให้บุคคลต้องเลือกทานอาหารเพื่อสุขภาพมากกว่าเลือกจากความสะดวกสบาย เช่น การรับประทานอาหารคลีนมากกว่าอาหารธรรมดาหรืออาหารที่มีน้ำตาลหรือไขมันน้อย อีกทั้งจำเป็นต้องตรวจสอบข้อมูลโภชนาการของอาหารแต่ละชนิดก่อนจะเลือกรับประทาน เป็นต้น [20] และ [22]

H7: ตัวเลือกเมนูส่งผลกระทบโดยตรงต่อพฤติกรรมของผู้บริโภค

ตัวเลือกเมนูส่งผลต่อพฤติกรรมการบริโภคในด้านความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น เช่น การเลือดรับประทานอาหารสำเร็จรูประหว่างการระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 การงดรับประทานอาหารนอกบ้านหรือบางคนเกิดความเครียดและกังวลระหว่างที่มีการแพร่ระบาดของโรค ก็จะมีพฤติกรรมการรับประทานอาหารที่มากขึ้น หรือเบื่ออาหาร บางคนงดการรับประทานอาหารกับคนหมู่มาก อาหารประเภทบุฟเฟต์ หรือเปลี่ยนเป็นการใช้บริการสั่งอาหารออนไลน์ผ่าน Application เป็นต้น [12] [22] และ [23]

6. วิธีดำเนินการวิจัย

6.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

การศึกษาในครั้งนี้ได้รับอนุมัติจาก Ethical Approval of A Research Project From Research Ethics Committee of Mapua University หมายเลขคำขอ FM-RC-22-04 ในการเก็บข้อมูลกลุ่มตัวอย่าง 400 คน ได้ทำการตอบแบบสอบถามด้านปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการบริโภคอาหารภายใต้สถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 โดยได้รับความยินยอมในการเปิดเผยข้อมูลส่วนตัว ในการเก็บข้อมูลกลุ่มตัวอย่าง ผู้ตอบแบบสอบถามอาศัยอยู่ในจังหวัดกรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยเก็บข้อมูลจากบุคคลอายุ 15-64 ปี (ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 25 ปี) และส่วนใหญ่เป็นผู้ที่ไม่ได้ทำประกันสุขภาพไว้

ตารางที่ 1 ลักษณะประชากรศาสตร์ (กลุ่มตัวอย่าง = 400 คน)

ลักษณะประชากรศาสตร์	ประเภท	กลุ่มตัวอย่าง	%
เพศ	ชาย	302	75.5
	หญิง	95	23.8
	ไม่ระบุ	3	0.7
อายุ	15-24 ปี	213	53.2
	25-34 ปี	44	11.0
	35-44 ปี	66	16.5
	45-54 ปี	37	9.3
	55-64 ปี	26	6.5
	มากกว่า 64 ปี	14	3.5
รายได้ต่อเดือน	น้อยกว่า 15,000 บาท	197	49.2
	15,001 - 25,000 บาท	66	16.5
	25,001 - 35,000 บาท	38	9.5
	35,001 - 45,000 บาท	41	10.3
	45,000 บาทขึ้นไป	58	14.5
ประกันสุขภาพ	ทำ	136	34.0
	ไม่ได้ทำ	264	66.0

6.2 เครื่องมือที่ใช้และแบบสอบถาม

ตารางที่ 2 แสดงรายการข้อคำถามและการวัดประเมินในการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการบริโภคอาหารภายใต้สถานการณ์การระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 แบบสอบถามได้ถูกกระจายผ่านทางช่องทางออนไลน์โดยวิธีสุ่ม (Convenience sampling method) โดยใช้ข้อคำถามจากหัวข้อสมมติฐานดังนี้ ความอยากอาหาร (A) ตัวเลือกเมนู (MO) การรับรู้ถึงภัยอันตราย (PS) การรับรู้ถึงความเปราะบาง (PV) งบประมาณ (B) ความสะดวกสบาย (C) เงื่อนไขสุขภาพ (HC) ซึ่งข้อคำถามเหล่านี้ถูกสร้างขึ้นเพื่อกำหนดปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมของผู้บริโภค (BV) ของคนไทย นอกจากนี้ยังใช้มาตรวัดของลิเกิร์ต (Likert rating scales) เพื่อให้ผู้ทำแบบสอบถามได้ให้คะแนน 1-5 (ไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง-เห็นด้วยอย่างยิ่ง) ต่อข้อคำถามในแต่ละข้อ

ตารางที่ 2 แบบสอบถามปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการบริโภค

สมมติฐาน	ประเภท	ข้อคำถาม	งานวิจัยรองรับ
ความอยากอาหาร	A1	เมื่อข้าพเจ้าเห็นรูปภาพอาหารตามสื่อโซเชียล ข้าพเจ้าจะรู้สึกหิวข้าวทันที	[26]
	A2	เมื่อถึงเวลาพักเที่ยงข้าพเจ้าจะรู้สึกหิวข้าวทันที	
	A3	เมื่อข้าพเจ้าได้กลิ่นอาหาร ข้าพเจ้าจะรู้สึกหิวข้าวทันที	[27]
	A4	เมื่อเพื่อนข้าพเจ้าชวนกินข้าว ข้าพเจ้าจะไปด้วยทันที ถึงแม้จะไม่หิวก็ตาม	[28]
ตัวเลือกเมนู	MO1	ข้าพเจ้าคิดว่าอาหารจานด่วน,อาหารตามสั่งเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับข้าพเจ้า	[29]
	MO2	ข้าพเจ้าคิดว่าอาหารสำเร็จรูป, กึ่งสำเร็จรูปเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับข้าพเจ้า	[29]
	MO3	ข้าพเจ้าคิดว่าร้านอาหารใกล้ตัวข้าพเจ้ามีเมนูให้เลือกหลากหลายไม่จำเป็นต้องไปทานไกล ๆ	[29]
	MO4	ข้าพเจ้ารู้สึกว่ารายการอาหารในแอปพลิเคชันสั่งอาหาร มีตัวเลือกมากมายจนเลือกไม่ถูก	[30]
การรับรู้ถึงภัยอันตราย	PS1	ข้าพเจ้ารู้สึกว่าไวรัสโควิด 19 ทำให้ข้าพเจ้าไม่อยากออกไปทานอาหารข้างนอก	[15]
	PS2	ข้าพเจ้ารู้สึกปลอดภัยเมื่อร้านอาหารที่ข้าพเจ้าทานมีมาตรการป้องกันโควิด 19	[31]
	PS3	ข้าพเจ้ารู้สึกไม่ปลอดภัยเมื่อร้านค้าที่ข้าพเจ้าทานอาหารไม่มีพาร์ทิชัน (ที่กั้น) กั้นระหว่างโต๊ะ	[31]
	PS4	ข้าพเจ้ารู้สึกไม่ปลอดภัยเมื่อข้าพเจ้าทราบว่าร้านค้าที่ข้าพเจ้าไปทานอาหารมีคนติดไวรัสโควิด 19	[31]
	PS5	ข้าพเจ้ารู้สึกไม่ปลอดภัยเมื่อข้าพเจ้าสั่งอาหารมาจากบริการส่งอาหารผ่านทางแอปพลิเคชัน	[30]
การรับรู้ถึงความเปราะบาง	PV1	ข้าพเจ้ารู้สึกว่าข้าพเจ้าตกอยู่ในความเสี่ยงเมื่อออกไปทานอาหารข้างนอก	[5], [12], [13]
	PV2	ข้าพเจ้ารู้สึกกังวลเมื่อครอบครัวของข้าพเจ้าออกไปทานอาหารข้างนอก	[5], [12], [13]
	PV3	ข้าพเจ้ารู้สึกกังวลเมื่อเพื่อนร่วมงานของข้าพเจ้าออกไปทานอาหารข้างนอก	[5], [12], [13]
	PV4	ข้าพเจ้ารู้สึกกังวลเมื่อคนรอบตัวข้าพเจ้าติดเชื้อโควิด 19	[5], [12], [13]
งบประมาณ	B1	ข้าพเจ้าคิดว่าราคาอาหารที่แพงเกินไปทำให้ข้าพเจ้ารู้สึกอยากทานน้อยลง	[32]
	B2	ข้าพเจ้าคิดว่าอาหารตามร้านข้างทางมีคุณภาพพอ ๆ กันกับร้านอาหารในห้าง	[32]
	B3	ข้าพเจ้าคิดว่าอาหารเมนูเดียวกันจากร้านที่ราคาแพงกว่า อาจมีรสชาติดีกว่าร้านที่ราคาถูกกว่า	[32]
	B4	ข้าพเจ้าคิดว่าร้านอาหารที่มีชื่อดัง อาจใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพมากกว่าร้านอาหารธรรมดา	[32]
	B5	ข้าพเจ้าคิดว่าราคาอาหารจากแอปพลิเคชันสั่งอาหาร มีราคาแพงกว่าไปสั่งกินเองหน้าร้านอย่างมีนัยสำคัญ	[33]
	B6	หากคนรอบตัวข้าพเจ้าสั่งอาหารจากแอปพลิเคชันสั่งอาหาร ข้าพเจ้ามักจะสั่งด้วย เพื่อเป็นการประหยัดค่าส่ง	[33]
	C1	ข้าพเจ้ารู้สึกว่าอยากทานร้านที่อยู่ใกล้ ๆ ตัวมากกว่าร้านที่อยู่ไกลตัว	[34]

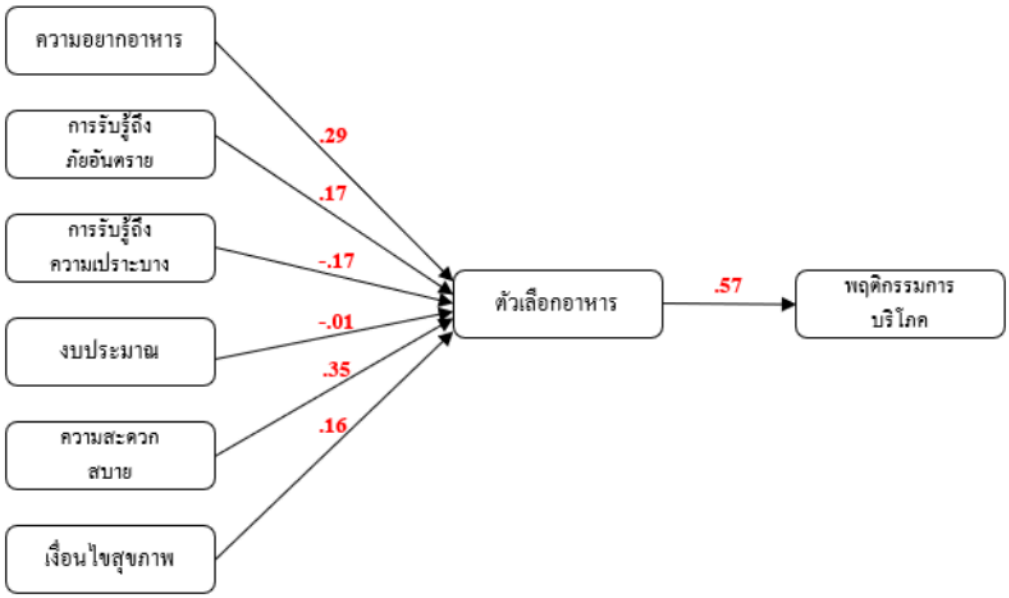
สมมติฐาน	ประเภท	ข้อคำถาม	งานวิจัยรองรับ
ความสะดวกสบาย	C2	ข้าพเจ้าไม่อยากทานอาหารในร้านที่ต้องรอคิวนาน	[34]
	C3	ข้าพเจ้าไม่อยากทานอาหารในร้านที่มีที่จอดรถไม่เพียงพอ	[35]
	C4	เมื่อข้าพเจ้ารีบร้อนข้าพเจ้ามักจะทานอาหารจานด่วน หรืออาหารกึ่งสำเร็จรูป	[23]
	C5	ข้าพเจ้ารู้สึกว่าการสั่งอาหารจากบริการส่งอาหาร เช่น Grab Food, Line Man, Food Panda ทำให้ข้าพเจ้าสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น	[5], [12], [13]
เงื่อนไขสุขภาพ	HC1	ข้าพเจ้าคิดว่าอยากทานอาหารคลีนมากกว่าอาหารธรรมดา	[36]
	HC2	หากข้าพเจ้ากำลังลดน้ำหนัก ข้าพเจ้าจะสั่งอาหารเมนูที่มีน้ำตาล, น้ำมันน้อย ๆ	[36]
	HC3	ข้าพเจ้ามักตรวจสอบข้อมูลโภชนาการของอาหารแต่ละชนิด ก่อนจะทานอาหาร	[37]
	HC4	ข้าพเจ้าคิดว่าการที่ทานอาหารที่ปรุงสุก จะช่วยทำให้ข้าพเจ้าลดความเสี่ยงที่จะเกิดโรคภัย	[38]
พฤติกรรมของผู้บริโภค	BV1	ข้าพเจ้ารู้สึกปลอดภัยเมื่อทำอาหารทานเองที่บ้าน ระหว่างการระบาดของโควิด 19	[5], [12], [13]
	BV2	ข้าพเจ้ามักทานอาหารสำเร็จรูป ระหว่างการระบาดของโควิด 19	[23]
	BV3	ข้าพเจ้ามักออกไปทานอาหารนอกบ้าน ระหว่างการระบาดของโควิด 19	[5], [12], [13]
	BV4	ข้าพเจ้ารู้สึกว่าข้าพเจ้ามีพฤติกรรมการทานอาหารที่มากขึ้น ระหว่างการระบาดของโควิด 19	[39], [40]
	BV5	ข้าพเจ้ารู้สึกว่าข้าพเจ้าเบื่ออาหารง่าย ระหว่างการระบาดของโควิด 19	[41]
	BV6	ข้าพเจ้ารู้สึกกังวล หากต้องนั่งรับประทานอาหารกับคนหมู่มาก ระหว่างการระบาดของโควิด 19	[5], [12], [13]
	BV7	ข้าพเจ้ารู้สึกกังวล หากต้องทานอาหารเป็นกับข้าว (ไม่ใช่อาหารจานเดียว) ร่วมกับผู้อื่น ระหว่างการระบาดของโควิด 19	[5], [12], [13]
	BV8	ข้าพเจ้ารู้สึกกังวล หากต้องทานอาหารประเภทบุฟเฟ่ต์ (เดินตักเอง) ร่วมกับผู้อื่น ระหว่างการระบาดของโควิด 19	[5], [12], [13]
	BV9	ข้าพเจ้ามักใช้บริการ Grab food, Line Food, Food Panda ระหว่างการระบาดของโควิด 19	[5], [12], [13]

7. ผลการวิจัย

ตารางที่ 3 แสดงถึงค่าทดสอบความเหมาะสมของโมเดลสมการโครงสร้าง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ทั้งหมดอยู่ภายใต้ขีดจำกัดของความเหมาะสม ดังแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นแบบจำลองโมเดลของงานวิจัยนี้ จากค่าที่ได้สามารถบ่งชี้ได้ว่าแบบจำลองโมเดลสมการโครงสร้างของงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองที่ยอมรับได้ (Model fit)

ตารางที่ 3 ตารางแสดงค่าทดสอบความเหมาะสม (Model fit)

ค่าทดสอบความเหมาะสมของโมเดลสมการโครงสร้าง	ค่าประมาณพารามิเตอร์	ค่าตัดออก	อ้างอิงจาก
Goodness of Fit Index (GFI)	0.859	> 0.80	[41]
Adjusted Goodness of Fit Index (AGFI)	0.833	> 0.80	[41]
Root Mean Square Error of Approximation (RMSEA)	0.068	< 0.07	[42]
Incremental Fit Index (IFI)	0.923	> 0.90	[42]
Tucker Lewis Index (TLI)	0.925	> 0.90	[42]
Comparative Fit Index (CFI)	0.929	> 0.90	[42]



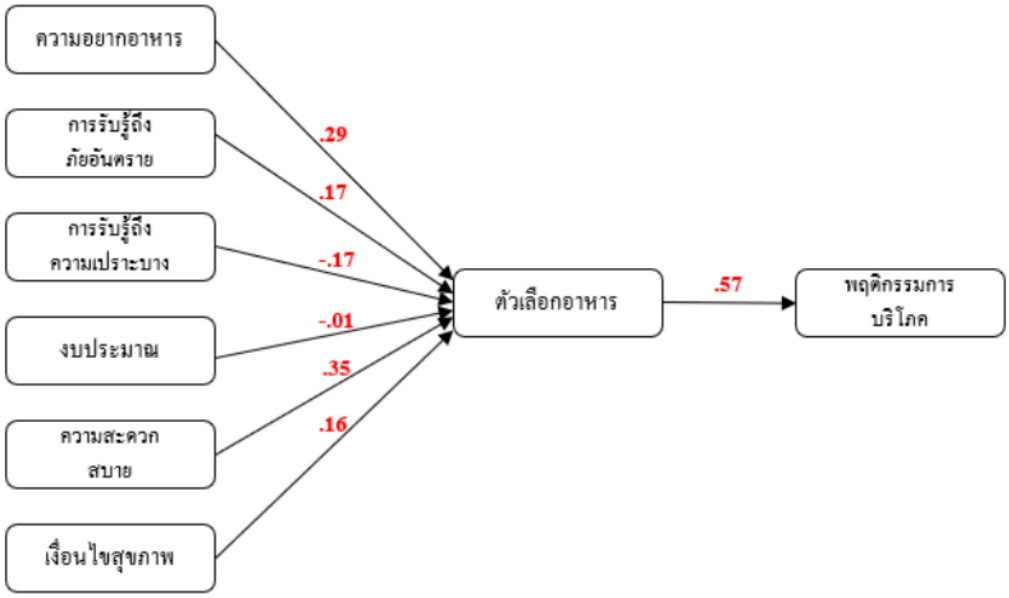
รูปที่ 2 โมเดลเริ่มต้น

ตารางที่ 4 และรูปที่ 3 แสดงตารางค่าพารามิเตอร์และโมเดลสุดท้ายตามลำดับ จากผลลัพธ์ค่าดัชนีวัดระดับความเหมาะสมพอดี (GFI) และ ดัชนีวัดระดับความเหมาะสมพอดีที่ปรับแก้แล้ว (AGFI) มีค่าสูงกว่า 0.8 ซึ่งบ่งชี้ว่าค่าทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองเป็นที่ยอมรับได้ (Model fit) นอกจากนี้ ค่าดัชนีความสอดคล้องที่เพิ่มขึ้น (IFI) ดัชนีวัดระดับความสอดคล้องเปรียบเทียบของ Tucker และ Lewis (TLI) ดัชนีวัดระดับความสอดคล้องเปรียบเทียบ (CFI) ยังสูงกว่า 0.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบโมเดลสุดท้ายเป็นค่าที่เหมาะสมจากการเก็บข้อมูล นอกจากนั้นค่าดัชนีรากที่สองของความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า (RMSEA) มีค่าต่ำกว่า 0.7 [42] และค่าเฉลี่ยความแปรปรวนสกัดได้ (AVE) มากกว่า 0.4 [43] ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบโมเดลนี้มีความเข้ากันได้ดีเช่นกัน

ตารางที่ 4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์

ตัวแปรแฝง	ประเภท	น้ำหนักองค์ประกอบ	สัมประสิทธิ์อัลฟา	ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนสกัดได้ (AVE)	ค่าความเชื่อมั่น (CR)
A	A1	0.55	0.74	0.46	0.76
	A2	0.66			
	A3	0.65			
	A4	0.81			
MO	MO1	0.71	0.76	0.47	0.77
	MO2	0.84			
	MO3	0.63			
	MO4	0.52			
PS	PS1	0.80	0.78	0.62	0.89
	PS2	0.57			
	PS3	0.80			
	PS4	0.85			
	PS5	0.87			
PV	PV1	0.57	0.78	0.48	0.79
	PV2	0.72			
	PV3	0.72			
	PV4	0.75			
B	B1	0.70	0.83	0.67	0.89
	B2	0.76			
	B3	0.85			
	B4	0.93			
	B5	0.85			
	B6	0.79			
C	C1	0.81	0.86	0.68	0.92
	C2	0.85			
	C3	0.76			
	C4	0.92			
	C5	0.80			
HC	HC1	0.70	0.80	0.67	0.89
	HC2	0.95			
	HC3	0.88			
	HC4	0.73			

ตัวแปรแฝง	ประเภท	น้ำหนักองค์ประกอบ	สัมประสิทธิ์อัลฟา	ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนสกัดได้ (AVE)	ค่าความเชื่อมั่น (CR)
BV	BV1	0.89	0.824	0.54	0.81
	BV2	0.71			
	BV3	0.73			
	BV4	0.59			
	BV5	0.64			
	BV6	0.73			
	BV7	0.84			
	BV8	0.73			
	BV9	0.71			



รูปที่ 3 โมเดลสุดท้าย

8. สรุปและอภิปรายผล

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าตัวเลือกอาหารส่งผลโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการบริโภคของผู้บริโภคในช่วงการแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 (β: 0.57; p = 0.001) ผลการวิจัยยืนยันว่าตัวเลือกเมนูส่งผลต่อพฤติกรรมการบริโภคที่ปลอดภัยมากยิ่งขึ้น เช่น การเลือดรับประทานอาหารสำเร็จรูประหว่างการระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 การงดรับประทานอาหารนอกบ้านหรือบางคนเกิดความเครียดและกังวลระหว่างที่มีการแพร่ระบาดของโรค ซึ่งส่งผลต่อปริมาณอาหารที่รับประทาน ความถี่ในรับประทานอาหารนอกบ้านหรือการใช้บริการสั่งอาหารออนไลน์ผ่าน Application เป็นต้น [12] [22] และ [23] ในขณะที่ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าความสะดวกสบายส่งผลโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวเลือกอาหารมากที่สุด (β: 0.35; p = 0.001) ตามมาด้วย ความอยากอาหาร (β: 0.29; p = 0.001) การรับรู้ถึงภัยอันตราย (β: 0.17; p = 0.003) การรับรู้ถึงความเปราะบาง (β: -0.17; p = 0.002) และ เงื่อนไขสุขภาพ (β: 0.16; p = 0.001) อย่างไรก็ตามผลจาก

การวิจัยแสดงให้เห็นว่า งบประมาณไม่ส่งผลโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวเลือกอาหารในช่วงการแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 (β: -0.01; p = 0.841)

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลเชิงบวกของความสะดวกสบายต่อตัวเลือกอาหาร ยิ่งหากอยู่ในสภาวะที่เร่งรีบ ผู้บริโภคมีแนวโน้มที่จะเลือกบริโภคอาหารประเภทอาหารจานด่วนหรือฟาสต์ฟู้ด [23] ซึ่งการมุ่งเน้นความสะดวกสบายเป็นผลให้สังคมไทยกำลังเผชิญหน้ากับปัญหาสุขภาพ อันเนื่องมาจากพฤติกรรมการบริโภคอาหารไม่ถูกต้องตามหลักสุขลักษณะ ขาดโภชนาการที่ดี จึงอาจจะก่อให้เกิดโรคภัยไข้เจ็บ เช่น โรคหัวใจ โรคมะเร็ง และโรคเบาหวาน เป็นต้น [24] อย่างไรก็ตามผู้ประกอบการร้านอาหารเพื่อสุขภายสามารถที่จะส่งมอบความสะดวกสบายผ่านทาง Application แทน เพื่อให้เกิดความรู้สึกสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น [12] และ [22]

ความอยากอาหารส่งผลโดยตรงเชิงบวกต่อตัวเลือกเมนูอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งตัวเลือกเมนูอาหารสะท้อนปฏิกิริยาการตอบสนองต่อระดับความหิว ในขณะที่มีความอยากอาหาร เมื่อได้เห็นเมนูอาหารหรือได้กลิ่น การรับรู้สีและกลิ่นของอาหารจะส่งสัญญาณไปที่สมอง ทำให้สมองเข้าใจว่าอาหารมีรสชาติอร่อย โดยเฉพาะโลโก้ของอาหารที่มีสีแดง รวมถึงการตกแต่งเมนูอาหาร หรือแพ็คเกจอาหารที่มีสีแดง จะทำให้สมองเข้าใจว่าอาหารรสชาติอร่อยทำให้อยากรับประทานอาหารมากยิ่งขึ้น อีกทั้งเมื่อเห็นรูปภาพอาหารที่มีการตกแต่งตามลักษณะดังกล่าวก็จะรู้สึกอยากอาหารทันที และเลือกซื้อในที่สุด [19]

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลเชิงบวกของการรับรู้ถึงภัยอันตรายต่อตัวเลือกอาหาร โดยการรับรู้ถึงภัยอันตรายจากการรับประทานอาหารประเภทอาหารจานด่วน อาหารตามสั่ง อาหารสำเร็จรูป หรือกึ่งสำเร็จรูป ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเลือกรับประทานอาหารเหล่านี้ [20]

การรับรู้ถึงความเปราะบางส่งผลเชิงลบต่อตัวเลือกเมนูอย่างมีนัยสำคัญ ความวิตกกังวลและการรับรู้ความเสี่ยงต่อการติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 มีความสัมพันธ์กับการเลือกเมนูอาหารและการเลือกร้านอาหารข้างนอกบ้านหรือนอกที่ทำงาน ระดับการรับรู้ถึงความเปราะบางที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ผู้บริโภคเลือกรับประทานอาหารข้างนอกบ้านหรือนอกที่ทำงานน้อยลง

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลเชิงบวกของเงื่อนไขสุขภาพต่อตัวเลือกอาหาร ซึ่งยืนยันถึงแนวโน้มการบริโภคของผู้บริโภคในประเทศไทยที่กำลังพุ่งไปในทิศทางด้านการรักษาสุขภาพ หากเลือกได้ผู้บริโภคชาวไทยส่วนใหญ่นิยมรับประทานอาหารจำพวกอาหารคลีน (Clean food) มากกว่าอาหารธรรมดา นอกจากนี้กลุ่มผู้บริโภคที่อยู่ในระหว่างการควบคุมน้ำหนักมักจะเลือกสั่งอาหารที่มีปริมาณน้ำตาล หรือไขมันน้อยกว่าปกติ [36] และนิยมตรวจสอบข้อมูลโภชนาการของอาหารแต่ละชนิดก่อนรับประทานอีกด้วย [37]

อย่างไรก็ตามผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นว่า งบประมาณไม่ส่งผลโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวเลือกอาหารในช่วงการแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 ซึ่งอาจเป็นเพราะเมื่อมนุษย์มีความกลัวต่อโรคภัยไข้เจ็บ ตามสัญชาติญาณในการเอาตัวรอดของมนุษย์ ก็จะก่อให้เกิดแรงจูงใจในการป้องกันโรคตามมา จึงทำให้บางครั้งอาจยอมที่จะจ่ายมากขึ้นเพื่อให้ได้อาหารที่ดีขึ้น มีความปลอดภัยมากขึ้น [21]

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการบริโภคอาหารภายใต้สถานการณ์การระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 ในประเทศไทย นอกจากนี้ยังเป็นการศึกษาแรกที่ผนวกรวมแนวคิดทฤษฎีแรงจูงใจในการป้องกันโรค (Protection Motivation Theory) และทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน (Theory of Planned Behavior: TPB) งานวิจัยนี้อาจนำไปใช้เป็นโมเดลในการศึกษาปัจจัยการตัดสินใจต่าง ๆ ของคนไทยภายใต้สถานการณ์การระบาดของโรคติดต่อโควิด 2019 เพื่อเป็นแนวทางและประโยชน์กับทางภาครัฐในการบรรเทา และลดความเสี่ยงจากโรคระบาดได้อย่างเป็นรูปธรรม

9. ข้อเสนอแนะในเชิงวิชาการ

จากผลการวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าตัวเลือกอาหารส่งผลโดยตรงและมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการบริโภคในช่วงการแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 ข้อเสนอแนะเชิงวิชาการสามารถนำไปใช้เพื่อปรับปรุงการจัดการอาหารและพฤติกรรมการบริโภคในช่วงวิกฤตการณ์ในอนาคตอย่างมีประสิทธิภาพ มีดังนี้:

- ควรมีการพัฒนาเมนูอาหารที่สอดคล้องกับความสะดวกสบายและความต้องการของผู้บริโภคในสถานการณ์การแพร่ระบาด เช่น อาหารสำเร็จรูปที่มีคุณค่าทางโภชนาการและปลอดภัย เพื่อเพิ่มความมั่นใจให้กับผู้บริโภคในการเลือกซื้ออาหาร
- ควรมีการส่งเสริมสุขภาพจิตและการจัดการความเครียดให้กับผู้บริโภค เนื่องจากความเครียดและความกังวลมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการบริโภค
- หน่วยงานทางด้านสาธารณะสุขอาจจัดให้มีคู่มือเพื่อช่วยลดความเครียดที่เกี่ยวข้องกับการเลือกอาหารในช่วงการแพร่ระบาดของโรคระบาดติดต่อ รวมถึงการเสริมสร้างความตระหนักรู้ในเรื่องสุขภาพและความปลอดภัย จะช่วยให้ผู้บริโภคสามารถตัดสินใจเลือกอาหารได้อย่างมีสติ

10. ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

การศึกษาต่อเนื่องในการวิจัยครั้งต่อไป มีข้อเสนอแนะ ดังนี้

- ควรมีการศึกษาความแตกต่างของประชากรแต่ละกลุ่ม เช่น คนวัยต่าง ๆ หรือผู้ที่มีรายได้ที่แตกต่างกัน เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมการบริโภคในช่วงการแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา 2019 ของกลุ่มผู้บริโภคในแต่ละกลุ่มได้อย่างรอบด้านมากขึ้น
- ควรศึกษาเพิ่มเติมถึงปัจจัยอื่น ๆ เช่น ปัจจัยด้านทัศนะคติต่ออาหารประเภทต่างๆ เช่นอาหารสำเร็จรูป อาหารฟาสต์ฟู้ด หรืออาหารเพื่อสุขภาพ เพื่อให้เห็นภาพรวมของพฤติกรรมการเลือกอาหารอย่างเจาะจงมากยิ่งขึ้น
- การศึกษาวิจัยครั้งต่อไปควรใช้ระเบียบวิธีวิจัยที่หลากหลาย เช่นการวิจัยทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการบริโภคของผู้บริโภค

11. เอกสารอ้างอิง

[1] องค์การอนามัยโลก. (19 พฤศจิกายน 2567). *WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard*. https://covid19.who.int.

[2] นลินี พานสายตา, จตุพล จรูญโรจน์ ณ อยุธยา, และ ประวีณา คาไชย. (2023). ปัจจัยเชิงสาเหตุของพฤติกรรมการซื้ออาหาร เดลิเวอรี่ออนไลน์ในสถานการณ์โควิด-19 ของผู้บริโภคเจนเนอเรชันวายและแซดในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. *วารสารวิชาการการตลาดและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 8(2): 17–33.

[3] Julawong, O. (2014). Motivation Prevention and Health Behaviors of the Thai Army Conscripts. *Journal of The Royal Thai Army Nurses*, 15(2): 28-32.

[4] Chamroonsawasdi, K., Chottanapund, S., Pamungkas, R. A., Tunyasitthisundhorn, P., Sornpaisarn, B., & Numpaisan, O. (2021). Protection motivation theory to predict intention of healthy eating and sufficient physical activity to prevent Diabetes Mellitus in Thai population: A path analysis. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews, 15*(1): 121-127.

[5] Prasetyo, Y., Tanto, H., Mariyanto, M., Hanjaya, C., Young, M., Persada, S., Redi, A. A. N. P. (2021). Factors Affecting Customer Satisfaction and Loyalty in Online Food Delivery Service during the COVID-19 Pandemic: Its Relation with Open Innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 7*(1): 76. doi:10.3390/joitmc7010076

[6] วรรัตน์ แขกธูป. (2553). *พฤติกรรมการซื้อซ้ำกะทิสำเร็จรูป [Aroy-D] การประยุกต์ใช้ทฤษฎีพฤติกรรมตามแผน*. มหาวิทยาลัยรามคำแหง/กรุงเทพฯ. doi: 10.14457/RU.the.2010.401

[7] วิวัฒน์ จันทร์กิ่งทอง. (2557). ทฤษฎีพฤติกรรมตามแผนกับความภักดีของนักท่องเที่ยว. *วารสารมหาวิทยาลัยศิลปากร ฉบับภาษาไทย,* 34(2): 131-146.

[8] Prasetyo, Y., & Vallespin, B. (2021). Determining Factors Affecting the Acceptance of Grab Application in the Philippines using UTAUT2 Approach. IEEE 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA). doi: 10.1109/ICIEA52957.2021.9436738

[9] Suksawang, P. (2014). The basics of structural equation modeling. *Princess of Naradhiwas University Journal*, 6(2): 136-145.

[10] Budhathoki, N.K., Paton, D., Lassa, J.A. & Zander, K.K. (2020). Assessing farmers' preparedness to cope with the impacts of multiple climate change-related hazards in the Terai lowlands of Nepal. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 49: 16-56.

[11] Chai, D., Wang, M. & Liu, K. (2020). Driving factors of natural disasters in belt and road countries. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 51, 17-74.

[12] Prasetyo, Y.T., Senoro, D.B., German, J.D., Robielos, R.A.C. & Ney, F.P. (2020). Confirmatory factor analysis of vulnerability to natural hazards: A household Vulnerability Assessment in Marinduque Island, Philippines. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50: 18-31.

[13] Prasetyo, Y.T., Tanto, H., Mariyanto, M., Hanjaya, C., Young, M.N. & Persada, S.F. (2021). Factors affecting customer satisfaction and loyalty in online food delivery service during the COVID-19 pandemic: Its relation with open innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(1): 76.

[14] Ong, A. K., Prasetyo, Y., Libiran, M., Lontoc, Y., Lunaria, J., Manalo, A. & Redi, A. A. N. P. (2021). Consumer Preference Analysis on Attributes of Milk Tea: A Conjoint Analysis Approach. *Foods,* 10(6): 1382. doi:10.3390/foods10061382

[15] สมหญิง จันทร์อบ. (2562). ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจใช้บริการโมบายแอปพลิเคชันในการสั่งอาหารของผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานครในสถานการณ์โควิด–19. https://mmm.ru.ac.th/MMM/IS/twin-8/6114154069.pdf

[16] ชมพูนุท ศรีจันทร์นิล. (2564). การรับมือทางด้านจิตใจกับการเว้นระยะห่างทางสังคมในช่วงการระบาดของโควิด-19: คำบอกเล่าของผู้หญิงบนอินสตาแกรม. *วารสารการวัดผลการศึกษา*, 38(103): 248-259.

[17] อกนิษฐ์ เชยคาดี และชญาทัวร์ กี่อาริโย. (2558). ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการตัดสินใจเลือกใช้บริการร้านอาหารติ่มซำ อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช. *วารสารวิทยาการจัดการ*, 5(1): 39-58.

[18] วิทยา ศรีดามา. (2533). การลดหรือเพิ่มน้ำหนักโดยใช้ยา. *จุฬาลงกรณ์เวชสาร*, 34(2): 154-162.

[19] Spence, C., Okajima, K., Cheok, A. D., Petit, O., & Michel, C. (2016). Eating with our eyes: From visual hunger to digital satiation. *Brain and Cognition.* 110: 53-63. doi: https://doi.org/10.1016/j.bandc.2015.08.006

[20] Chen, M.-F. (2016). Extending the protection motivation theory model to predict public safe food choice behavioral intentions in Taiwan. *Food Control.* 68: 145-152. doi: https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.03.041

[21] Nonthapha, S., & Navicharern, R. (2017). Factors Related to Protection Motivation Theory and Breast Cancer Prevention Behavior among Teachers in Provincial School, Central Region. *Kuakarun Journal of Nursing*, 24(2): 23-35.

[22] พัชรพร เจริญประชา, สุดารัตน์ ศรีมูล, เหมหงส์ อ่อนชื่อจิตร และนิรัตน์ฌา เรืองสินทร. (2559). พฤติกรรมการบริโภคอาหารจานด่วนของนักศึกษาระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จังหวัดพิษณุโลก. ในการประชุมวิชาการระดับชาติสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ครั้งที่ 3 (393 - 402). กำแพงเพชร: มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร.

[23] Prasetyo, Y. T., & Vallespin, B. E. P. (2021). Determining Factors Affecting the Acceptance of Grab Application in the Philippines using UTAUT2 Approach. IEEE 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA) (594-600).

[24] Phanwattana, P. (2019). Food Consumption Behavior of Working Age People in Bangkok. *Journal of the Office of DPC 7 Khon Kaen*, 26(2): 93-103.

[25] อุมาพร สุทัศน์วรวุฒิ, นลินี จงวิริยะพันธุ์, สุภาพรรณ ตันตราชีวธร, ชาญชัย พานทองวิริยะกุล, นงลักษณ์ ตรีกาลนนท์, ประสงค์ เทียนบุญ (2548). **ทันยุคกับโภชนาการในเด็ก**. กรุงเทพฯ:บียอนด์เอ็นเทอร์ไพรซ์.

[26] ปองปรารถน์ สุนทรเภสัช กิติวัฒน์ กิติบุตร และกนกพร เอกกะสินสกุล. (2561). การเล่าเรื่องอาหารท้องถิ่นเพื่อส่งเสริมแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม: กรณีศึกษาน้ำปูแจ้ห่ม. *วารสารวิทยาการจัดการสมัยใหม่*. 11(1): 192-213.

[27] เมธิตา วิวิตรกุล เพ็ญจันทร์ ประดับมุข เชอร์เรอร์ พิมพวัลย์ บุญมงคล และผกามาส ตันวิจิตร. (2563). อัตวิสัย ผัสสะและประสบการณ์ของผู้ป่วยในการใส่สายให้อาหารทางจมูก. *วารสารสหศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล*, 20(2): 71-85.

[28] อรพินท์ สีขาว และคณะ. (2561). พฤติกรรมการสร้างเสริมสุขภาพของนักศึกษาพยาบาลที่มีดัชนีมวลกายเกินมาตรฐาน มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ.*วารสาร มฉก.วิชาการ*, 22(43-44): 1-12.

[29] Jureerat, M. (2019). Fast Food Consumption Behavior of Teenage Student in Urban Area, Chumphon Province. *Journal of Health Sciences Scholarship, 6*(1): 45-56.

[30] จามจุรี เรียงศิลป์ชัย. (2563). การศึกษาพฤติกรรมการใช้บริการสั่งอาหารผ่านแอปพลิเคชั่นของผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานคร กรณีศึกษา: แอปพลิเคชั่นไลน์แมน (Lineman), ฟู้ดแพนด้า (Foodpanda) ,แกร็บฟู้ด (Grabfood). *วารสารรัฐประศาสนศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา*, 3(2): 32-48.

[31] สุภาวดี ธงภักดิ์ และ สันติธร ภูริภักดี. (2564). แนวทางการปรับเปลี่ยนและพัฒนาการบริการของร้านอาหารที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม “ร้านอาหารยามเย็น กรุงเทพมหานคร” ภายใต้สถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด 19. *วารสารศิลปศาสตร์และอุตสาหกรรมบริการ*, 4(2): 761-772.

[32] เพชรินทร์ อยู่เป็นสุข และ เจริญชัย เอกมาไพศาล. (2561). ทัศนคติและพฤติกรรมของผู้บริโภคต่ออาหารประเภทฟู้ดทรัค กรณีศึกษา ในตลาดนัดหัวมุม ถนนเกษตร-นวมินทร์ กรุงเทพมหานคร. *วารสารวิชาการการท่องเที่ยวไทยนานาชาติ*, 14(1): 1-17.

[33] Witchayapai, W., & Phornprapa, K. (2021). Factor Affecting Consumer Behavior in Using Food Order Through Grab Food Application in Ladkrabang*, Bangkok Metropolitan Region.* http://www.mis.ms.su.ac.th/MISMS02/PDF01/1297_20210712_12600077___Wachirada_Wichayapai.pdf

[34] Deesuksaeng, P. & Sonprajuk, P. (2021). Adaptation of Street Food COVID-19 situation period in Pak Nam Pho Subdistrict, Mueang Nakhon Sawan District*, Nakhon Sawan Province*. 114-131. http://www.bec.nu.ac.th/NPSC/files/7%20114-131-A016.pdf.

[35] Stiitchai, K. & Chantuk, T. (2018). Causal Relationship of Factors that Affecting the Customer Loyalty of Healthy

Restaurants in Bangkok, *Veridian E-Journal, Silpakorn University, 11*(1): 65-86.

[36] Kuanra-ngub, S. (2014). Behavior modification program for weight control of Payap University personnel. *Nursing journal*, 41(1): 85-95.

[37] Panya, R., & Chowwanapoonpohn, H. (2014). Effect of provision of nutrition label education on knowledge, behavior and attitude among high school students, Phayao Province, *Naresuan Phayao Journal*, 7(3): 261-274.

[38] Singweratham, N., Nawsuwan, K., Kheonkaew, B. & Laorngnual, L. (2021). Behaviors and risk perception at workplace to COVID19 transmission among radiological technologist. *Disease Control Journal*, 47 (3): 467-478.

[39] Janssen, M., Chang, B., Hristov, H., Pravst, I., Profeta, A. & Millard, J. (2021). Changes in Food Consumption During the COVID-19 Pandemic: Analysis of Consumer Survey Data From the First Lockdown Period in Denmark, Germany, and Slovenia. *Frontiers in nutrition*, 8: 58-59. https://doi.org/10.3389/fnut.2021.635859

[40] Ben Hassen, T., El Bilali, H., Allahyari, M.S., Karabaševic, D., Radosavac, A., Berjan, S., Vaško, Ž., Radanov, P. & Obhođaš, I. (2021). Food Behavior Changes during the COVID-19 Pandemic: Statistical Analysis of Consumer Survey Data from Bosnia and Herzegovina. *Sustainability,* 13: 8617. https://doi.org/10.3390/su13158617

[41] Gefen, D., Straub, D. & Boudreau, M.C. (2000). Structural equation modeling and regression: Guidelines for research practice. *Communications of the association for information systems*, 4(1): 7.

[42] Hair, J.F., Black, W.C., Babin, B.J. & Anderson, R.E. (2010). **Multivariate Data Analysis. Pearson Prentice Hall**. New Jersey.

[43] Fornell, C. & Larcker, D.F. (1981). Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. *Journal of marketing research*, 18(1): 39-50.