



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาราช

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

SUKHOTHAI THAMMATHIRAT OPEN UNIVERSITY

ปีที่ 6 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม - มิถุนายน 2569



ISBN 2773-9600 (Online)



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

Journal of Science and Technology Sukhothai Thammathirat Open University



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

ปีที่ 6 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2569

Journal of Science and Technology Sukhothai Thammathirat Open University

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูมิ เจือศิริภักดี

ประธานกรรมการประจำสาขาวิชา

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

บรรณาธิการ

อาจารย์ ดร.ชุตระกุล ศิริไพบูลย์

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐากร พงศ์พันธุ์เลิศ

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ปราการเจริญ

มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เปรมพร เขมาวุฒม์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฏฐพงศ์ จตุรัส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.วชิราภรณ์ ร่มสายหยุด

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนกฤต โชติภาววิศ

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิทธิเดช มูลมั่งมี

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐากร พงศ์พันธุ์เลิศ

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

รายนามคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) ประจำฉบับ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรรณพ หมั่นสกุล	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชินฉัตร อารีประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุภาวดี อีธรรมมาร	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จีรฐิฏกุล คาหะน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐากร พฤกษ์วันประเสริฐ	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย วลีธรรมพิสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลทิมา เชาว์ชาญชัยกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลนิดา เทพทิม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.แววบุญ แยมแสงสังข์	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
อาจารย์ ดร.ปิยะนุช มีธรรม	มหาวิทยาลัยสยาม
อาจารย์ ดร.ณัชชา ฐานิพานิชสกุล	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
อาจารย์ ดร.อภิขญา นิ่มคุ้มภัย	สถาบันเทคโนโลยีไทย – ญี่ปุ่น

ฝ่ายบริหารจัดการประจำฉบับ

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

9/9 หมู่ 9 ถ.แจ้งวัฒนะ ต.บางพูด อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120

โทรศัพท์ : 02-504 8192

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่ผลงานการวิจัยและผลงานวิชาการให้ทันสมัยและเป็นไปอย่างต่อเนื่อง
2. เพื่อเป็นสื่อกลางและแลกเปลี่ยนความคิดเห็นทางวิชาการให้เกิดความก้าวหน้าทางวิชาการ
3. เพื่อส่งเสริมและพัฒนาศักยภาพทางวิชาการของบุคลากรทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย

กำหนดการออกวารสาร

ปีละ 2 ฉบับ (มกราคม – มิถุนายน, กรกฎาคม – ธันวาคม) ของทุกปี

ลักษณะของบทความ

1. ครอบคลุมในหัวเรื่องวิชาการและวิจัย
2. บทความที่นำเสนอต้องมีแนวทางสร้างสรรค์ ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการพัฒนาความเจริญก้าวหน้าของการศึกษา เศรษฐกิจ และสังคมโดยรวม
3. บทความที่นำเสนอต้องไม่เคยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการอื่นใดมาก่อน
4. ผู้เขียนจะต้องรับผิดชอบในข้อเขียน ข้อคิดเห็นของผู้เขียนต่อข้อกฎหมายใดๆ ที่อาจเกิดขึ้นต่อบทความนั้น

บทบรรณาธิการ

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ฉบับนี้เป็นปีที่ 6 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – มิถุนายน 2569 ซึ่งเป็นฉบับที่สองของปีที่ 6 ของสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีวัตถุประสงค์สำคัญคือการเป็นพื้นที่ในการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ รวมถึงเป็นเวทีในการแลกเปลี่ยนแนวคิดให้กับ คณาจารย์และนักวิชาการทั่วไป เพื่อส่งเสริมและพัฒนาศักยภาพทางวิชาการ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยฉบับนี้ได้มีการเผยแพร่ผลงานทางวิจัยจำนวนทั้งสิ้น 5 บทความ ซึ่งบทความได้ผ่านการประเมิน คุณภาพ อย่างเข้มข้นจากผู้ทรงคุณวุฒิตามศาสตร์สาขาที่เกี่ยวข้องจากหลากหลายสถาบัน ทำให้มั่นใจได้ว่า ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่นี้มีคุณภาพสามารถนำไปศึกษาค้นคว้า อ้างอิง รวมถึง นำไปใช้ประโยชน์ในทางปฏิบัติได้ต่อไป

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิจากหลากหลายสถาบัน ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าในการประเมินคุณภาพของบทความเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ ขอขอบคุณนักวิชาการที่ให้ความไว้วางใจส่งผลงานเข้ารับการเผยแพร่ หวังเป็นอย่างยิ่งว่า วารสารฉบับนี้จะเป็นเวทีทางวิชาการที่จะกระตุ้นความคิดและการแลกเปลี่ยนเรียนรู้อันจะนำมาซึ่งกระบวนการทางความคิด รวมถึงให้องค์ความรู้ดังกล่าวทำหน้าที่ในการพัฒนาสังคมและประเทศชาติต่อไป

อาจารย์ ดร.ชูตระกูล ศิริไพบูลย์

บรรณาธิการ



สารบัญ

หน้า

1. การประเมินการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตตัวดูดซับ
คาร์บอนไดออกไซด์จากเศษคาร์บอนเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าชีวมวล..... 1
ตุลาการ เกตุวงศ์ และชินันต์ อารีประเสริฐ
2. การออกแบบและพัฒนาระบบการวิเคราะห์เชิงทำนายและการแสดงภาพโดยใช้โมเดลการ
เรียนรู้ของเครื่องแบบบูรณาการในแดชบอร์ด **Power BI**: กรณีศึกษาข้อมูลการรับเข้าคณะ
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี..... 10
ชาญชัย ศุภอรรถกร และสุลักษณ์ นามแสง
3. การพัฒนาแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม โดยใช้แนวคิดการปฏิสัมพันธ์
ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์..... 27
ทิพย์มณฑา ผกาแก้ว และสมใจ จิตคำนึ่งสุข
4. ผลของการให้ความร้อนต่อการปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอล
ที่ปนเปื้อนเครื่องดื่ม..... 46
อรทัย เขียวพุ่ม หฤทัย พันธุ์แสง ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง และพชรพร ศรีสุวรรณ
5. การประยุกต์ใช้กระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเส้นใยฟางข้าว
ผสมกับกระดาษรีไซเคิลเพื่อชะลอการสุกของกล้วย..... 56
แววบุญ แยมแสงสังข์

การประเมินการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จากเศษคาร์บอนเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าชีวมวล

CARBON DIOXIDE EMISSIONS ESTIMATION FROM CARBON DIOXIDE ADSORBENT PRODUCTION USING UNBURNED CARBON RESIDUES FROM BIOMASS POWER PLANT

ตุลาการ เกตุวงศ์¹ และ ชินนัทย์ อารีประเสริฐ²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, fengcta@ku.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, tulakarn.ke@ku.th

Tulakarn Ketwong¹ and Chinnathan Areeprasert²

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, fengcta@ku.ac.th

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, tulakarn.ke@ku.th

วันที่รับบทความ 26 ธันวาคม 2568

วันแก้ไขบทความ 6 มกราคม 2569

วันที่ตอบรับบทความ 30 มกราคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และศักยภาพการลดคาร์บอนสุทธิของวัสดุดูดซับ CO₂ ที่ผลิตจากคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ซึ่งเป็นของเสียจากโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยวัสดุถูกกระตุ้นด้วยสองวิธี ได้แก่ การกระตุ้นด้วยไอน้ำและการกระตุ้นทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ สมบัติเชิงกายภาพ โครงสร้างรูพรุน และความสามารถในการดูดซับ CO₂ ที่อุณหภูมิ 298 K และความดัน 1 bar ถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกับการประเมินการปล่อยคาร์บอนจากกระบวนการผลิตแบบ gate-to-gate ผลการศึกษาพบว่าการกระตุ้นทางเคมีให้วัสดุที่มีพื้นที่ผิวและความสามารถในการดูดซับ CO₂ สูงสุด โดยมีค่าการดูดซับเท่ากับ 0.089 kgCO₂/kg ขณะที่การกระตุ้นด้วยไอน้ำให้สมรรถนะต่ำกว่า แม้ว่าการกระตุ้นทางเคมีจะมีการปล่อยคาร์บอนจากการใช้สารเคมีเพิ่มเติม แต่จำนวนรอบการคืนคาร์บอนของวัสดุที่ได้ต่ำกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าการประเมินวัสดุดูดซับ CO₂ ควรพิจารณาทั้งสมรรถนะการดูดซับและการปล่อยคาร์บอนแฝงจากกระบวนการผลิตควบคู่กัน เพื่อให้สามารถเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมและสนับสนุนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างแท้จริงในเชิงระบบ

คำสำคัญ: การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์, ถ่านกัมมันต์, การปล่อยคาร์บอนแฝง, ความคุ้มค่าทางคาร์บอน

ABSTRACT

This study evaluates the carbon dioxide (CO₂) emissions and net carbon reduction potential of CO₂ adsorbents produced from unburned carbon residues generated by a biomass power plant. Two activation methods—steam activation and chemical activation using potassium hydroxide—were investigated. The physical properties, pore structure, and CO₂ adsorption performance at 298 K and 1 bar were analyzed in conjunction with a gate-to-gate carbon emission assessment of the production process. The results demonstrate that chemical activation yields adsorbents with the highest specific surface area and CO₂ adsorption capacity, reaching 0.089 kgCO₂/kg, whereas steam-activated materials exhibit comparatively lower performance. Although chemical activation involves additional carbon emissions associated with chemical consumption, the resulting adsorbent requires a significantly lower number of carbon payback cycles than the steam-activated counterpart. These findings indicate that the evaluation of CO₂ adsorbents

should simultaneously consider adsorption performance and embodied carbon emissions from the production process, enabling the selection of technologies that genuinely contribute to greenhouse gas mitigation from a system-level perspective.

KEYWORDS: Carbon dioxide capture, Activated carbon, Embodied carbon emissions, Carbon payback cycles

1. บทนำ

การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเป้าหมายสำคัญของการพัฒนาระบบพลังงานและอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน โดยเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอน (Carbon Capture Technologies) (Dubey & Arora, 2022) ถือเป็นเครื่องมือหนึ่งที่ช่วยลดการปล่อย CO₂ จากแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่ เช่น โรงไฟฟ้าและกระบวนการอุตสาหกรรม วัสดุดูดซับคาร์บอนมีบทบาทสำคัญในเทคโนโลยีดังกล่าว (Abd, Othman, & Kim, 2021) เนื่องจากเป็นตัวกลางหลักในการแยกและกักเก็บ CO₂ จากก๊าซไอเสีย สมรรถนะของวัสดุดูดซับ เช่น ความสามารถในการดูดซับ ความจำเพาะต่อ CO₂ และความสามารถในการนำกลับมาใช้ซ้ำ มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของระบบ อย่างไรก็ตาม แนวโน้มการพัฒนาในปัจจุบันไม่ได้มุ่งเน้นเพียงการเพิ่มสมรรถนะการดูดซับเท่านั้น แต่ยังให้ความสำคัญกับการเลือกใช้วัสดุที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ มีต้นทุนเหมาะสม และสามารถสนับสนุนเป้าหมายการลดคาร์บอนในภาพรวมได้อย่างแท้จริง (Ketwong, Cholvattanatanakorn, Ding, Wibowo, & Areeprasert, 2023; Serafin & Dziejarski, 2024)

การพัฒนาวัสดุดูดซับคาร์บอนในปัจจุบันมุ่งเน้นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับและความจำเพาะต่อ CO₂ ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างรูพรุนและสมบัติทางเคมีของพื้นผิว (Foorginezhad, Zerafat, Asadnia, & Rezvannasab, 2024) อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตวัสดุดูดซับเหล่านี้มักเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานและทรัพยากรในระดับที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานโดยรวมของกระบวนการ การออกแบบกระบวนการผลิตที่ใช้พลังงานต่ำ ใช้สารเคมีน้อย หรืออาศัยวัตถุดิบเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม จึงเป็นแนวทางสำคัญในการลดคาร์บอนแฝงของวัสดุดูดซับ และช่วยเพิ่มความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงในระบบการดักจับคาร์บอนเชิงอุตสาหกรรม

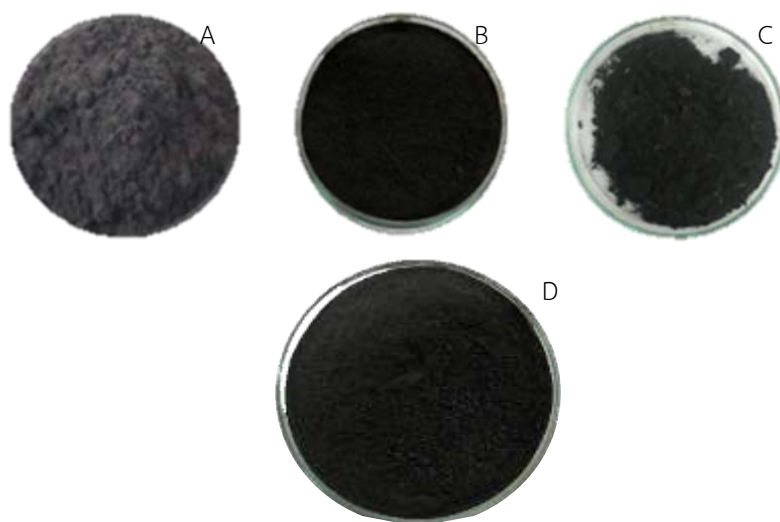
การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวัสดุดูดซับไม่ควรพิจารณาเพียงสมรรถนะการดูดซับในขั้นตอนการใช้งานเท่านั้น แต่จำเป็นต้องคำนึงถึง “การปล่อยคาร์บอนแฝง” (embodied carbon emissions) ที่เกิดขึ้นตลอดกระบวนการผลิตวัสดุดูดซับด้วย (Shah, Amin, Pepe, Mancusi, & Fareed, 2025; Usama et al., 2025) โดยเฉพาะในกรณีของวัสดุที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นเชิงเคมีหรือกระบวนการที่ใช้พลังงานสูง การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้สารเคมี พลังงานความร้อน และการจัดการของเสียอาจมีปริมาณสูงจนลดทอนประโยชน์สุทธิของการดักจับ CO₂ ในภาพรวม ดังนั้น การประเมินเทคโนโลยีดักจับคาร์บอนจึงควรพิจารณาในเชิงระบบตลอดวัฏจักรชีวิต โดยเปรียบเทียบปริมาณ CO₂ ที่สามารถดักจับได้กับปริมาณการปล่อยคาร์บอนที่เกิดขึ้นจากการผลิตวัสดุ เพื่อสะท้อนศักยภาพที่แท้จริงของวัสดุดูดซับในการสนับสนุนเป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างยั่งยืน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบด้านการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตวัสดุดูดซับคาร์บอนจากของเสียโรงไฟฟ้าชีวมวล และเพื่อประเมินศักยภาพการลดคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิของระบบดักจับคาร์บอนดังกล่าว โดยพิจารณาทั้งปริมาณ CO₂ ที่ถูกดักจับได้และปริมาณ CO₂ ที่ปล่อยออกมาในขั้นตอนการผลิตวัสดุ แนวคิดของงานมุ่งเน้นการประเมินเชิงสมดุลอย่างง่าย (carbon balance) เพื่อชี้ให้เห็นว่าวัสดุดูดซับที่มีสมรรถนะการดูดซับสูงอาจไม่จำเป็นต้องเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด หากมีการปล่อยคาร์บอนแฝงสูง ในขณะที่วัสดุที่ผลิตจากของเสียและใช้กระบวนการผลิตที่ใช้พลังงานต่ำอาจให้ผลการลดคาร์บอนสุทธิที่ดีกว่า และมีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงในบริบทของการพัฒนาอย่างยั่งยืน

2. ระเบียบวิธีวิจัย (Methodology)

2.1 กระบวนการผลิตตัวดูดซับ

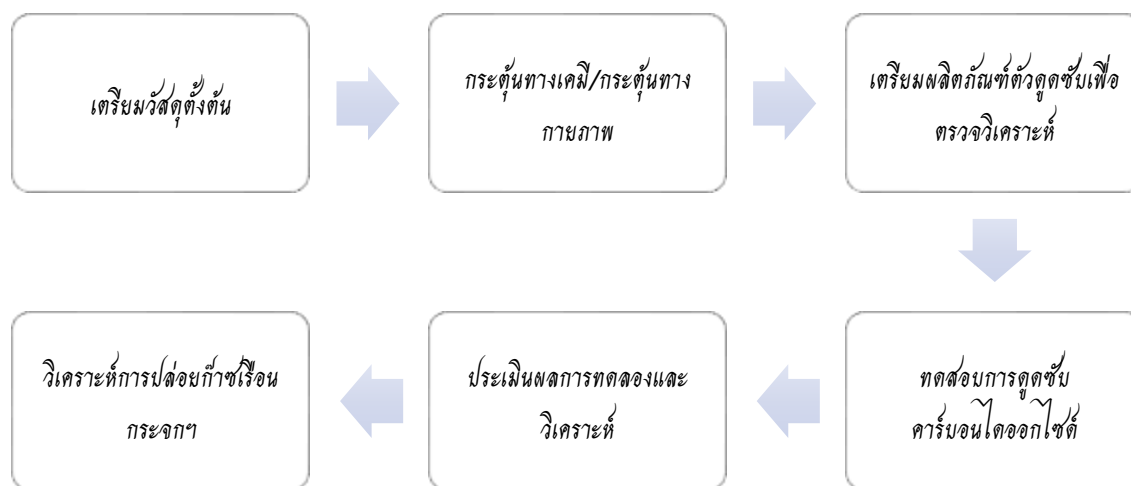
ของเสียของแข็งผสม (compound solid residue) แสดงในรูปที่ 1 ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้รับจากโรงไฟฟ้าชีวมวลของบริษัทมิตรผล ตั้งอยู่ในอำเภอนองเรือ จังหวัดขอนแก่น ประเทศไทย โดยของเสียของแข็งดังกล่าวประกอบด้วยคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ (unburned carbon: UC) ซึ่งถูกแยกออกจากเถ้าลอยด้วยวิธีอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่น (gravity separation method) ขั้นตอนเริ่มจากการนำของเสียของแข็งในรูปผงใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตรที่บรรจุน้ำกลั่น จากนั้นทำการกวนสารละลายอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 10 นาที และปล่อยให้ตกเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้อนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงกว่าคือ เถ้าตกตะกอนลงสู่ด้านล่างของบีกเกอร์ ขณะที่อนุภาค UC ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่าจะลอยอยู่บริเวณผิวน้ำ หลังจากนั้นทำการแยก UC ออกจากระบบและนำไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง เพื่อปรับปรุงคุณภาพวัตถุดิบก่อนกระบวนการกระตุ้น ตัวอย่าง UC ที่แยกได้ถูกนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น โดยใช้ตัวอย่างมวล 0.2 กิโลกรัม ผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:10 จากนั้นกวนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที และทำการแยกน้ำออกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและสารที่ละลายน้ำได้ซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติของตัวดูดซับ หลังจากการล้าง ตัวอย่างถูกนำไปอบแห้งในตู้อบก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการกระตุ้น



รูปที่ 1 วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย (A) Solid compound; (B) Fly ash; (C) Unburned carbon; (D) Adsorbent product

กระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมี (chemical activation) เริ่มจากการนำตัวอย่าง UC ที่ผ่านการเตรียมแล้วจำนวน 100 กรัม มาผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ความเข้มข้น 3 โมลาร์ ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:2 โดยเลือกเงื่อนไขดังกล่าวจากผลการทดลองเบื้องต้นและรายงานในวรรณกรรมที่แสดงว่าสามารถพัฒนาโครงสร้างรูพรุนได้ดีโดยไม่ก่อให้เกิดการสูญเสียวัสดุสูงเกินไป สารผสมถูกกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้สารกระตุ้นกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ หลังจากนั้นทำการแยกของแข็งออกจากของเหลวด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง และนำของแข็งไปอบแห้งในตู้อบ ตัวอย่างที่แห้งแล้วถูกนำเข้าเตาเผาไฟฟ้าที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบ PID พร้อมป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ระบบในอัตรา 100 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อุณหภูมิของเตาถูกเพิ่มจากอุณหภูมิห้องจนถึง 800 °C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 °C ต่อนาที และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ ตัวอย่างถูกปล่อยให้เย็นตัวลงตามธรรมชาติจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการล้างและปรับสภาพด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 3 โมลาร์ และน้ำดีไอออนซ์ เพื่อกำจัดสารตกค้างจาก KOH ที่อาจอุดตันรูพรุนของตัวดูดซับ ก่อนนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C ตัวอย่างที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่า เถ้าลอยและคาร์บอนที่ถูกกระตุ้นด้วยสารเคมี (AUC-C ตามลำดับ) สำหรับกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (steam activation) ใช้อุปกรณ์และขั้นตอนพื้นฐานเดียวกับกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมี แต่ไม่ใช้สารละลาย KOH โดยไอน้ำถูกผลิตจากเครื่องกำเนิดไอน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 120–127 °C และถูกป้อนเข้าสู่ระบบในระหว่างการให้ความร้อนในเตาเผา เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นเชิงกายภาพ ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการนี้เรียกว่า เถ้าลอยและคาร์บอนที่ถูกกระตุ้นด้วยไอน้ำ (AUC-S ตามลำดับ) หลังจากได้ผลิตภัณฑ์ตัวดูดซับแล้วจึงนำไปตรวจ

วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีด้วยวิธี Proximate analysis, Ultimate analysis, X-Ray Fluorescence analysis, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ BET surface analysis ทั้งนี้ กระบวนการกระตุ้นเชิงเคมีและเชิงกายภาพที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถอ้างอิงจากงานวิจัย (Ketwong, Cholatthanatanakorn, & Areeprasert, 2025) ขั้นตอนการวิจัยแสดงรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนและกระบวนการศึกษาในงานวิจัย

2.2 กรอบแนวคิดการคำนวณก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตตัวดูดซับ

ในการศึกษานี้ การประเมินการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตตัวดูดซับดำเนินการในขอบเขตแบบ gate-to-gate โดยพิจารณาตั้งแต่ขั้นตอนการรับวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการผลิตจนถึงการได้ตัวดูดซับพร้อมใช้งาน ขอบเขตการคำนวณครอบคลุมการใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการ ได้แก่ การเตรียมวัตถุดิบ การให้ความร้อนในกระบวนการกระตุ้น (activation) และกระบวนการทำให้วัสดุมีเสถียรภาพก่อนใช้งาน โดยการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ถูกคำนวณจากปริมาณพลังงานที่ใช้จริงคูณกับค่าปัจจัยการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (emission factor) ที่สอดคล้องกับแหล่งพลังงานนั้น ๆ สำหรับกรณีการใช้วัตถุดิบซึ่งเป็นของเสียจากโรงไฟฟ้าชีวมวล จะไม่พิจารณาการปล่อยคาร์บอนจากการผลิตวัตถุดิบต้นทาง เพื่อลดการนับซ้ำของการปล่อยคาร์บอนในระบบ ผลลัพธ์ของการประเมินจะแสดงในรูปของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยต่อหน่วยมวลของวัสดุตัวดูดซับที่ผลิตได้ ($\text{kg CO}_2/\text{kg adsorbent}$) ซึ่งสามารถนำไปใช้เปรียบเทียบกับศักยภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุนั้นเพื่อประเมินความสามารถในการลดการปล่อยคาร์บอนสุทธิของระบบโดยรวม

การคำนวณการปล่อย CO_2 แบบ gate-to-gate ในงานนี้กำหนดขอบเขตตั้งแต่จุดรับวัตถุดิบเข้าสู่โรงงานผลิตตัวดูดซับจนถึงได้ผลิตภัณฑ์ตัวดูดซับพร้อมใช้งาน โดยรวมการใช้พลังงานไฟฟ้า ความร้อน/ไอน้ำ เชื้อเพลิงสำหรับเตา/หม้อไอน้ำ (ถ้ามี) น้ำ และสารเคมีในขั้นตอนล้าง/ปรับสภาพ/activation รวมถึงการจัดการของเสียภายในโรงงาน จากนั้นคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกด้วยสมการผลคูณระหว่างปริมาณกิจกรรม (Activity Data) และค่าปัจจัยการปล่อย (Emission Factor) ของแต่ละรายการ แล้วรวมผลทั้งหมดและปรับด้วยอัตราผลได้ (yield) เพื่อรายงานเป็นคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่อหน่วยตัวดูดซับ ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kg-adsorbent}$) ก่อนนำไปเทียบกับศักยภาพการดักจับ CO_2 ของตัวดูดซับเพื่อประเมินการลด CO_2 สุทธิ

2.3 ขั้นตอนการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตและตัวชี้วัดต่างๆ

การประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตตัวดูดซับในงานวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้ขอบเขตการประเมินแบบ gate-to-gate ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การรับวัตถุดิบเข้าสู่โรงงาน การแปรรูป และการผลิตจนได้ตัวดูดซับที่พร้อมใช้งาน โดยไม่รวมการปล่อยคาร์บอนจากการขนส่งวัตถุดิบนอกโรงงาน การใช้งานตัวดูดซับ และการจัดการเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งาน การคำนวณการปล่อยคาร์บอนแฝง (embodied carbon) พิจารณาจากแหล่งการปล่อยหลัก ได้แก่ การใช้พลังงานไฟฟ้า การใช้พลังงานความร้อน และการใช้สารเคมีในกระบวนการกระตุ้นตัวดูดซับ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมจากกระบวนการผลิต ($\text{CO}_2 \text{ emission, total}$) คำนวณจากผลรวมของการปล่อยจากแต่ละกิจกรรมตามสมการดังนี้

$$CO_2 \text{ emission}_{total} = \sum(E_i \times EF_i) \quad (1)$$

โดยที่ E_i คือปริมาณการใช้ทรัพยากรหรือพลังงานในกระบวนการที่ i (เช่น kWh ของไฟฟ้า หรือ MJ ของพลังงานความร้อน) และ EF_i คือค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (emission factor) ที่สอดคล้องกับทรัพยากรนั้น

สำหรับการใช้พลังงานไฟฟ้า การปล่อยคาร์บอนคำนวณจาก

$$CO_2 \text{ electricity} = E_{elec} \times EF_{elec} \quad (2)$$

โดยที่ E_{elec} คือปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต (kWh) และ EF_{elec} คือค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยของระบบไฟฟ้า ซึ่งอ้างอิงจากค่าเฉลี่ยของโครงข่ายไฟฟ้า (0.399 kgCO₂/kg) โดยกระบวนการที่ใช้ไฟฟ้าและนำมาคำนวณคือ การใช้ไฟฟ้าจากการกระตุ้นทางเคมีและทางกายภาพ และการใช้ไฟฟ้าจากกระบวนการบัด

การใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตคือ KOH ใช้ในกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมี การปล่อยคาร์บอนคำนวณจาก

$$CO_2 \text{ chemical} = m_{chem} \times EF_{chem} \quad (3)$$

โดยที่ m_{chem} คือมวลของสารเคมีที่ใช้ (kg) และ EF_{chem} คือค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยของสารเคมีเท่ากับ 1.4 kgCO₂/kgKOH ดัชนีความคุ้มค่าทางคาร์บอนระบุจำนวนรอบน้อยที่สุดที่ต้องใช้ตัวดูดซับซ้ำเพื่อให้เกิดความคุ้มค่า (Carbon Payback Cycles) จากการผลิต คำนวณจากสมการ

$$N_{payback} = CO_2 \text{ footprint prod} / CO_2 \text{ adsorbed} \quad (4)$$

การประเมินนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า ข้อมูลการใช้พลังงานและวัตถุดิบเป็นค่าเฉลี่ยของกระบวนการในระดับห้องปฏิบัติการซึ่งอาจให้ค่าสูงเกินค่าเฉลี่ยของระบบในอุตสาหกรรม การใช้เตาไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อนในห้องปฏิบัติการแตกต่างจากระบบอุตสาหกรรมที่ให้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทำให้มีอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำกว่า คิดอัตราการใช้ไฟฟ้าสำหรับการผลิตอยู่ที่ร้อยละ 40 ของกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าไม่ได้ใช้งานตลอดเวลา นอกจากนั้นยังไม่คิดอัตราการสูญเสียในกระบวนการผลิต และกระบวนการผลิตคิดเต็มประสิทธิภาพของขนาดเตา (300 กรัมต่อครั้ง)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการผลิตตัวดูดซับและคุณสมบัติ

จากข้อมูลคุณสมบัติเชิงกายภาพและเคมีของตัวอย่าง UC, AUC-S และ AUC-C สามารถอธิบายพฤติกรรมของผลได้และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้นโดยแสดงในตารางที่ 1 จากผล proximate analysis พบว่า UC หลังการล้างมีปริมาณเถ้าลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 19.30 wt% (Unwashed-UC) เหลือ 15.02 wt% ขณะที่ปริมาณ fixed carbon เพิ่มขึ้นจาก 52.90 เป็น 61.71 wt% สะท้อนว่าการล้างสามารถกำจัดสิ่งเจือปนอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ออกไปบางส่วน ส่งผลให้สัดส่วนคาร์บอนเพิ่มขึ้น ในด้าน ultimate analysis UC มีปริมาณคาร์บอนสูง (~51 wt%) และออกซิเจนสูง (~32 wt%) ซึ่งทำให้โครงสร้างคาร์บอนมีความไวต่อกระบวนการกระตุ้น โดยเฉพาะการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ในกรณีของ AUC-S การกระตุ้นเชิงกายภาพส่งผลให้เกิดการแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของคาร์บอน (carbon burn-off) ส่งผลให้สูญเสียมวลและคาร์บอนมากกว่า จึงสอดคล้องกับผลได้ที่ต่ำกว่าการกระตุ้นทางเคมี

เมื่อพิจารณา องค์ประกอบอินทรีย์ พบว่า UC มี CaO และ SiO₂ เป็นองค์ประกอบหลัก การกระตุ้นด้วยไอน้ำ (AUC-S) ทำให้ปริมาณ SiO₂ และ CaO ลดลงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนเฟส การละลายบางส่วน หรือการเกิด

โครงสร้างอณูพื้นฐาน ขณะที่ยังคงมี CaO ในระดับค่อนข้างสูง (11.50%) ซึ่งอาจส่งผลต่อความเสถียรเชิงโครงสร้างของวัสดุในทางตรงกันข้าม การกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH (AUC-C) ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบอินทรีย์อย่างเด่นชัด โดยเฉพาะการลดลงของ CaO (จาก 6.45% ใน UC เหลือ 3.93%) และ SO_3 ขณะเดียวกันพบว่า K_2O เพิ่มขึ้นเป็น 2.20% ซึ่งบ่งชี้ถึงการแทรกตัวหรือคั่งค้างของโพแทสเซียมจากสารกระตุ้น นอกจากนี้ ปฏิกิริยาระหว่าง KOH กับ SiO_2 ทำให้เกิดสารประกอบที่ละลายน้ำได้และถูกชะล้างออก ส่งผลให้โครงสร้างแร่ถูกกำจัดบางส่วนโดยไม่ทำลายโครงสร้างคาร์บอนหลักมากนัก ดังนั้น ผลได้ที่สูงกว่าของ AUC-C เมื่อเทียบกับ AUC-S จึงสอดคล้องกับข้อมูลเชิงองค์ประกอบที่แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นทางเคมีสามารถพัฒนาโครงสร้างรูพรุนในระดับไมโครพอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยลดการสูญเสียคาร์บอนและมวลรวม ในขณะที่ยังสามารถกำจัดเฟสอินทรีย์ที่ไม่ต้องการออกจากโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเศษคาร์บอนเหลือทิ้งและตัวดูดซับที่ผลิตได้

Item	Proximate Analysis (wt%)				Ultimate Analysis (wt%)				
	Moisture	Volatile Matter	Fixed Carbon	Ash	C	H	O	N	
Unwashed- UC	11.10	16.70	52.90	19.30	49.88	1.52	28.90	0.45	
UC	10.25	13.02	61.71	15.02	51.35	1.35	31.95	0.46	
Item	Inorganic Composition (%)								
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO
Unwashed- UC	1.26	14.40	1.34	1.48	1.97	13.90	2.91	1.77	0.22
UC	2.45	15.65	0.85	1.45	0.89	6.45	2.97	1.01	0.21
AUC-S	1.42	11.40	1.20	1.48	0.92	11.50	2.52	1.71	0.15
AUC-C	3.93	15.80	0.66	0.16	2.20	3.93	1.15	0.34	0.06

3.2 คุณสมบัติเชิงโครงสร้างรูพรุนและความสามารถในการดูดซับ

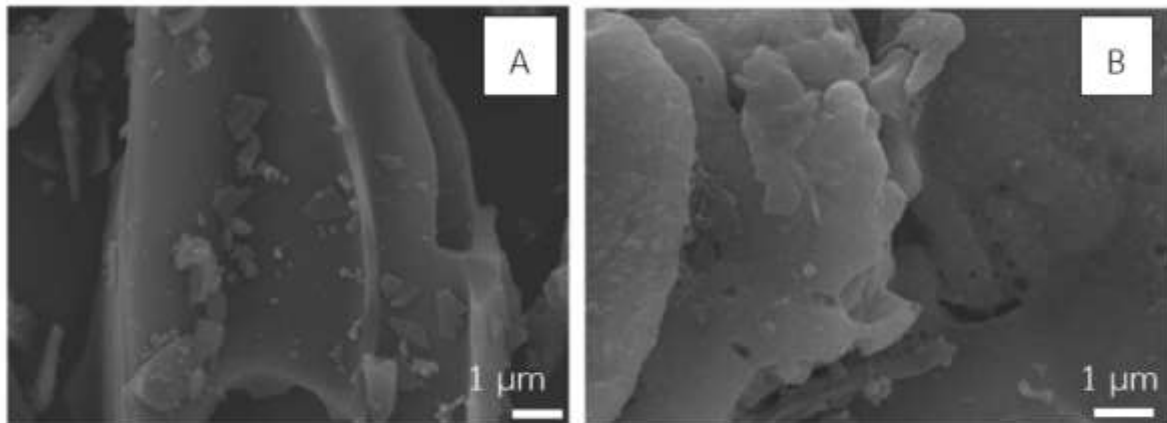
จากข้อมูลคุณสมบัติเชิงโครงสร้างรูพรุนของตัวอย่าง UC, AUC-S และ AUC-C สามารถอธิบายผลของกระบวนการกระตุ้นต่อการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนได้อย่างชัดเจนดังแสดงในตารางที่ 2 ตัวอย่าง UC แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะค่อนข้างสูงที่ 275.21 m^2/g โดยมีสัดส่วนพื้นที่ไมโครพอร์สูงถึง 222.45 m^2/g คิดเป็นสัดส่วนหลักของพื้นที่ผิวทั้งหมด สะท้อนว่าโครงสร้างของ UC หลังการล้างมีลักษณะเด่นเป็นรูพรุนขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 3 เหมาะสมต่อการดูดซับโมเลกุลขนาดเล็ก อย่างไรก็ตาม ปริมาตรรูพรุนรวมยังอยู่ในระดับปานกลาง (0.136 cm^3/g) และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 1.97 nm ซึ่งอยู่ในช่วงไมโครพอร์ถึงเมโซพอร์ขนาดเล็ก สำหรับ AUC-S การกระตุ้นด้วยไอน้ำส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 330.49 m^2/g และพื้นที่ไมโครพอร์เพิ่มขึ้นเป็น 279.35 m^2/g แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นเชิงกายภาพสามารถพัฒนาไมโครพอร์เพิ่มเติมได้

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของปริมาตรรูพรุนรวมมีเพียงเล็กน้อย (0.143 cm^3/g) ขณะที่เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยลดลงเหลือ 1.74 nm บ่งชี้ว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำเน้นการสร้างรูพรุนขนาดเล็กเป็นหลัก พร้อมกับการเกิด carbon burn-off บางส่วน ซึ่งสอดคล้องกับการสูญเสียมวลที่สูงกว่า ในทางตรงกันข้าม AUC-C ซึ่งผ่านการกระตุ้นทางเคมี แสดงการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนอย่างเด่นชัด โดยพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นอย่างมากเป็น 511.63 m^2/g และพื้นที่ไมโครพอร์สูงถึง 402.98 m^2/g ขณะเดียวกัน ปริมาตรรูพรุนรวมเพิ่มขึ้นมากกว่าเท่าตัวเป็น 0.311 cm^3/g และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยขยายเป็น 2.43 nm ผลดังกล่าวสะท้อนว่าการกระตุ้นด้วย KOH ไม่เพียงแต่สร้างไมโครพอร์จำนวนมาก แต่ยังช่วยขยายบางส่วนของไมโครพอร์ไปสู่เมโซพอร์ ส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนมีความหลากหลายและเปิดโล่งมากขึ้น กล่าวโดยสรุปการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (AUC-S) ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและไมโครพอร์ในระดับจำกัด ขณะที่การกระตุ้นทางเคมี (AUC-C) มีประสิทธิภาพสูงกว่าอย่างชัดเจนในการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนทั้งในด้านพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และการกระจายขนาดรูพรุน ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติการดูดซับที่คาดว่าจะสูงกว่า และสอดคล้องกับผลได้ที่ยังคงอยู่ในระดับสูงเมื่อเทียบกับการกระตุ้นเชิงกายภาพ

ในบรรดาดตัวอย่าง UC, AUC-C ให้สมรรถนะสูงสุด โดยมีค่าการดูดซับ CO_2 ที่ความดัน 1 bar เท่ากับ 2.03 mmol/g ซึ่งสะท้อนถึงการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนอย่างมีประสิทธิภาพจากการกระตุ้นทางเคมี โดยเฉพาะการเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน รวมถึงการขยายไมโครพอร์บางส่วนไปสู่เมโซพอร์ ส่งผลให้มีตำแหน่งดูดซับ CO_2 มากขึ้น นอกจากนี้ อาจมีการเกิดหรือคงอยู่ของหมู่ฟังก์ชันบนผิวคาร์บอนที่เอื้อต่อการยึดจับ CO_2 สำหรับ UC ในสภาพหลังการล้าง พบว่ามีค่าการดูดซับ CO_2 เท่ากับ 1.34 mmol/g ที่ 1 bar ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุมีศักยภาพในการดูดซับ CO_2 ได้ดีแม้ยังไม่ผ่านการกระตุ้น เนื่องจาก UC มีโครงสร้างคาร์บอนที่มีความพรุนตามธรรมชาติจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดโครงข่ายของไมโครพอร์และเมโซพอร์จำนวนมาก รวมถึงมีปริมาณคาร์บอนสูงและมีสิ่งเจือปนอินทรีย์ต่ำ ส่งผลให้พื้นผิวเหมาะสมต่อการดูดซับ CO_2 ผ่านแรงแวนเดอร์วาลส์ เมื่อผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (AUC-S) สมรรถนะการดูดซับ CO_2 เพิ่มขึ้นเป็น 1.50 mmol/g แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นเชิงกายภาพสามารถช่วยพัฒนาไมโครพอร์เพิ่มเติมและเพิ่มพื้นที่ผิวได้ แม้ว่าการเพิ่มขึ้นจะไม่เด่นชัดเท่าการกระตุ้นทางเคมี เนื่องจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำยังคงทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนบางส่วนจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยสรุป ลำดับสมรรถนะการดูดซับ CO_2 ของตัวอย่าง UC-based คือ $\text{AUC-C} > \text{AUC-S} > \text{UC}$ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการกระตุ้นทางเคมีเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มศักยภาพการดูดซับ CO_2 ของ UC ขณะที่ UC เองก็มีความสามารถในการดูดซับ CO_2 ในระดับที่ดีอยู่แล้วจากโครงสร้างคาร์บอนและความพรุนตามธรรมชาติของวัสดุ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเชิงโครงสร้างรูพรุน

Material	Surface Area (m^2/g)	Micropore Area (m^2/g)	Pore Volume (cm^3/g)	Average Pore Diameter (nm)
UC	275.21	222.45	0.136	1.97
AUC-S	330.49	279.35	0.143	1.74
AUC-C	511.63	402.98	0.311	2.43



ภาพที่ 3 SEM images (A) UC-based Adsorbent; (B) FA-based Adsorbent

ตารางที่ 3 คุณสมบัติการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

Sample	Experimental conditions	Evaluation method	S_{BET} (m^2/g)	Adsorption capacity (mmol/g)	Adsorption capacity (kgCO_2/kg)
UC	298 K, 1 bar	Micromeritics 3Flex	275.2	1.34	0.059
AUC-S	298 K, 1 bar	Micromeritics 3Flex	330.5	1.50	0.066
AUC-C	298 K, 1 bar	Micromeritics 3Flex	511.5	2.03	0.089

3.3 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความคุ้มค่าทางคาร์บอน

ในด้าน การปล่อยคาร์บอนจากกระบวนการผลิต พบว่า AUC-S มีการปล่อยคาร์บอนรวมสูงกว่า AUC-C โดยมีค่าเท่ากับ 10.0267 $\text{kg CO}_2/\text{kg}$ ซึ่งมาจากการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก ขณะที่ AUC-C มีการปล่อยคาร์บอนรวม 9.3667 $\text{kg CO}_2/\text{kg}$

โดยแม้จะมีการปล่อยคาร์บอนเพิ่มเติมจากการใช้สารเคมี (KOH และ HCl) เท่ากับ 0.7000 kg CO₂/kg แต่การปล่อยคาร์บอนจากไฟฟ้ากลับต่ำกว่า AUC-S อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้การปล่อยคาร์บอนรวมของ AUC-C ต่ำกว่าโดยรวม สะท้อนว่าการกระตุ้นทางเคมีสามารถออกแบบกระบวนการให้มีประสิทธิภาพด้านพลังงานได้ดีกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม หากเทียบกับการปล่อยคาร์บอนจากกระบวนการผลิตด้วยวัตถุดิบมาตรฐาน (ถ่านหิน) ซึ่งอยู่ที่ 9.5 kg CO₂/kg ถือว่ามีค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน แต่สูงกว่าการปล่อยคาร์บอนจากกระบวนการผลิตที่ใช้ชีวมวลอื่นๆ (Vilén, Laurell, & Vahala, 2022) เมื่อพิจารณา สมรรถนะการดูดซับ CO₂ พบว่า AUC-C แสดงความสามารถในการดูดซับสูงกว่าชัดเจน โดยมีค่า adsorption capacity เท่ากับ 0.089 kg CO₂/kg เทียบกับ 0.066 kg CO₂/kg ของ AUC-S ความแตกต่างนี้สอดคล้องกับการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนที่เด่นชัดกว่าจากการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่มีบทบาทสำคัญต่อการดูดซับก๊าซ CO₂ การประเมิน Carbon Payback Cycles ซึ่งสะท้อนจำนวนรอบการใช้งานที่วัสดุดูดซับต้องผ่านเพื่อชดเชยการปล่อยคาร์บอนจากกระบวนการผลิต พบว่า AUC-C ต้องการเพียง 106 รอบ ในขณะที่ AUC-S ต้องการสูงถึง 152 รอบ ค่า Carbon Payback Cycles ที่ต่ำกว่าของ AUC-C บ่งชี้ถึงความได้เปรียบเชิงสิ่งแวดล้อมในระยะยาว เนื่องจากสามารถคืนคาร์บอนได้เร็วกว่าและมีศักยภาพในการใช้งานเชิงพาณิชย์มากกว่า โดยสรุป แม้ AUC-C จะมีการปล่อยคาร์บอนจากการใช้สารเคมีเพิ่มเติม แต่ด้วยสมรรถนะการดูดซับ CO₂ ที่สูงกว่าและจำนวนรอบ Carbon Payback Cycles ที่ต่ำกว่า ทำให้ AUC-C แสดงศักยภาพที่เหนือกว่า AUC-S ทั้งในด้านประสิทธิภาพการใช้งานและความยั่งยืนเชิงสิ่งแวดล้อม ผลการวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นว่าการเลือกเทคนิคการกระตุ้นที่เหมาะสมมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนา activated carbon สำหรับการดักจับ CO₂ ในบริบทของการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของวัสดุ

โดยทั่วไป activated carbon สำหรับการดักจับ CO₂ แบบ physical adsorption สามารถนำกลับมาใช้งานซ้ำได้หลายรอบ ทั้งนี้จำนวนรอบการใช้งานขึ้นอยู่กับโครงสร้างรูพรุน วิธีการฟื้นฟูสมบัติ (regeneration) และความรุนแรงของสภาวะใช้งาน จากรายงานในวรรณกรรม วัสดุ activated carbon ที่ได้จากชีวมวลหรือของเสียและผ่านการกระตุ้นด้วย KOH มักสามารถใช้งานได้ประมาณ 80–120 รอบการดูดซับ-คายซับ (adsorption-desorption cycles) โดยยังคงสมรรถนะการดูดซับ CO₂ มากกว่า 80–90% ของค่าเริ่มต้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการดูดซับแบบแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นหลัก และเหมาะสมต่อการใช้งานระยะยาวในระบบดักจับคาร์บอนเชิงอุตสาหกรรม

ตารางที่ 3 คุณสมบัติการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

Sample	Carbon Emission from Electricity (kgCO ₂ /kg)	Carbon Emission from Chemicals (kgCO ₂ /kg)	Total Carbon Emission (kgCO ₂ /kg)	Adsorption capacity (kgCO ₂ /kg)	Carbon Payback Cycles (Times)
AUC-S	10.0267	-	10.0267	0.066	152
AUC-C	8.6667	0.7000	9.3667	0.089	106

4. สรุปผลการวิจัย (Conclusion)

งานวิจัยนี้ได้ประเมินศักยภาพของการผลิตวัสดุดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากคาร์บอนที่ยังไม่เผาไหม้ (UC) ซึ่งเป็นของเสียจากโรงไฟฟ้าชีวมวล โดยเปรียบเทียบผลของการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (AUC-S) และการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH (AUC-C) ทั้งในด้านสมบัติเชิงโครงสร้าง ความสามารถในการดูดซับ CO₂ และการปล่อยคาร์บอนจากกระบวนการผลิต ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการกระตุ้นทางเคมีสามารถพัฒนาโครงสร้างรูพรุนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ส่งผลให้ AUC-C มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และความสามารถในการดูดซับ CO₂ สูงกว่า UC และ AUC-S อย่างชัดเจน แม้กระบวนการกระตุ้นทางเคมีจะมีการปล่อยคาร์บอนเพิ่มเติมจากการใช้สารเคมี แต่เมื่อพิจารณาพร้อมกับสมรรถนะการดูดซับ CO₂ พบว่า AUC-C มีจำนวนรอบการคืนคาร์บอน (Carbon Payback Cycles) ต่ำกว่า แสดงถึงความได้เปรียบด้านการลดคาร์บอนสุทธิในระยะยาว งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าการเลือกเทคนิคการกระตุ้นที่เหมาะสมมีบทบาทสำคัญต่อทั้งประสิทธิภาพการดักจับ CO₂ และความยั่งยืนเชิงสิ่งแวดล้อมของวัสดุดูดซับ โดยการนำของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับการออกแบบกระบวนการผลิตที่คำนึงถึงคาร์บอนแฝง สามารถเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการสนับสนุนเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตาม

ตามการเลือกใช้วัสดุแต่ละชนิดควรพิจารณาพร้อมกับต้นทุนการผลิตและบริบทของการใช้งานจริง เพื่อให้เกิดความเหมาะสมทั้งด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์เพิ่มเติมด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ / Acknowledgements

ตุลาการ เกตุวงศ์ รับทุนสนับสนุนจากภาคีวิชาชีพวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. เอกสารอ้างอิง

- Abd, A. A., Othman, M. R., & Kim, J. (2021). A review on application of activated carbons for carbon dioxide capture: present performance, preparation, and surface modification for further improvement. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 43329-43364.
- Dubey, A., & Arora, A. (2022). Advancements in carbon capture technologies: A review. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133932.
- Foorginezhad, S., Zerafat, M., Asadnia, M., & Rezvannasab, G. (2024). Activated porous carbon derived from sawdust for CO₂ capture. *Materials Chemistry and Physics*, 317, 129177.
- Ketwong, T., Cholatthanatanakorn, N., & Areeprasert, C. (2025). Investigation on low-cost CO₂ absorbents from bagasse fly ash and unburned carbon residues from biomass power plant. *Biomass Futures*, 100006.
- Ketwong, T., Cholatthanatanakorn, N., Ding, L., Wibowo, H., & Areeprasert, C. (2023). Utilization of bagasse fly ash for the production of low-cost ammonia adsorbents in poultry farm. *Waste management*, 172, 347-357.
- Serafin, J., & Dziejarski, B. (2024). Activated carbons—preparation, characterization and their application in CO₂ capture: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(28), 40008-40062.
- Shah, H. H., Amin, M., Pepe, F., Mancusi, E., & Fareed, A. G. (2025). Overview of environmental and economic viability of activated carbons derived from waste biomass for adsorptive water treatment applications. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(32), 19084-19109.
- Usama, M., Khan, H., Khan, M. I., Hamid, A., Tariq, R., Bibi, A., . . . Hussain, S. (2025). Waste plastic derived activated carbon for simultaneous removal of hazardous antibiotics: Multiscale modelling and life cycle analysis. *Separation and Purification Technology*, 364, 132487.
- Vilén, A., Laurell, P., & Vahala, R. (2022). Comparative life cycle assessment of activated carbon production from various raw materials. *Journal of Environmental Management*, 324, 116356.

การออกแบบและพัฒนาระบบการวิเคราะห์เชิงทำนายและการแสดงภาพโดยใช้โมเดลการ
เรียนรู้ของเครื่องแบบบูรณาการในแดชบอร์ด Power BI: กรณีศึกษาข้อมูลการรับเข้า
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A PREDICTIVE ANALYTICS AND VISUALIZATION SYSTEM ON A
POWER BI DASHBOARD USING AN INTEGRATED MACHINE LEARNING MODEL: A CASE STUDY OF
ADMISSIONS DATA, FACULTY OF SCIENCE, UBON RATCHATHANI UNIVERSITY

ชาญชัย ศุภอรธกร¹ และ สุวลักษณ์ นามแสง²

¹ภาควิชาคณิตศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, chanchai.s@ubu.ac.th

²หลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, suvalak.na.65@ubu.ac.th

Chanchai Supaartagorn¹ and Suvalak Namsaeng²

¹Department of Mathematics and Digital Technology, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University,
chanchai.s@ubu.ac.th

²Information Communication and Technology Program, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University,
Suvalak.na.65@ubu.ac.th

วันที่รับบทความ 10 ธันวาคม 2568
วันแก้ไขบทความ 25 ธันวาคม 2568
วันตอบรับบทความ 18 กุมภาพันธ์ 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบการวิเคราะห์เชิงทำนายและการแสดงภาพโดยใช้โมเดลการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูรณาการในแดชบอร์ด Power BI และเพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ที่มีต่อระบบดังกล่าว ผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำเสนอผ่านแดชบอร์ด Power BI แบบโต้ตอบและไดนามิก ซึ่งประกอบด้วย 6 ส่วนหลัก ได้แก่ สถิติการรับสมัคร การยืนยันสิทธิ์ แผนการรับเปรียบเทียบกับจำนวนผู้สมัคร การกระจายผู้ยืนยันสิทธิ์ตามภูมิภาค รวมถึงการทำนายแนวโน้มจำนวนผู้สมัครโดยใช้โมเดลการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) และการวิเคราะห์การเลือกสาขาของผู้สมัครโดยใช้โมเดลป่าสุ่ม (Random Forest) จุดเด่นของระบบ คือ การผลานการวิเคราะห์เชิงพยากรณ์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องเข้ากับแดชบอร์ดเชิงโต้ตอบเพื่อการรับทราบตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ ผลการประเมินความพึงพอใจโดยรวมของผู้ใช้ต่อระบบแดชบอร์ดนี้อยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจ เท่ากับ 4.38 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.58 แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้เห็นประโยชน์และความเหมาะสมของระบบดังกล่าวเป็นอย่างดี นอกจากนี้ ผลการประเมินประสิทธิภาพโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องพบว่า โมเดลการถดถอยเชิงเส้นสำหรับพยากรณ์จำนวนรับเข้าศึกษา มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) รวมเท่ากับ 1.11 คน และโมเดลป่าสุ่ม สำหรับจำแนกสาขาวิชา มีความถูกต้อง (Accuracy) ร้อยละ 71.8 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: แดชบอร์ด Power BI, การเรียนรู้ของเครื่อง, การวิเคราะห์เชิงทำนาย, การแสดงภาพ

ABSTRACT

This research aimed to design and develop a predictive analytics and data visualization system on a Power BI dashboard using an integrated machine learning model, and to investigate user satisfaction with the system. The resulting system consists of six interactive and dynamic dashboards: admissions statistics, admission confirmations, planned versus actual applications, regional distribution of confirmed applicants,

trend forecasting using a linear regression model, and analysis of major selection using a random forest model. A key feature of the system is its integration of predictive analytics through machine learning with interactive dashboards to support strategic decision-making. The overall user satisfaction was rated as high, with a mean score of 4.38 and a standard deviation of 0.58, indicating that users found the system both beneficial and appropriate. Furthermore, the performance evaluation of the machine learning models revealed that the linear regression model for forecasting admission numbers achieved an overall Mean Absolute Error (MAE) of 1.11 persons. Meanwhile, the random forest model for major classification achieved an accuracy of 71.8%. These results demonstrate the system's potential to effectively support strategic decision-making.

KEYWORDS: Power BI Dashboard, Machine Learning, Predictive analytics, Visualization

1. บทนำ

ในยุคดิจิทัลข้อมูลคือกุญแจสำคัญแห่งความสำเร็จขององค์กรสมัยใหม่ การนำข้อมูลที่มีอยู่มาวิเคราะห์อย่างชาญฉลาดเพื่อให้ได้สารสนเทศที่มีประโยชน์ต่อองค์กร ไม่เพียงช่วยในการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์แต่ยังสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันและเหนือคู่แข่ง ส่งผลให้ทุกองค์กรต้องปรับตัวด้วยการพัฒนากระบวนการทำงานและใช้สารสนเทศที่มีค่าให้เกิดประโยชน์สูงสุด ในส่วนงานของสถาบันการศึกษาในระดับอุดมศึกษา หนึ่งในงานที่สำคัญและจำเป็นเร่งด่วน คือ งานรับเข้าศึกษา (Admissions) เนื่องจากปัจจุบันมหาวิทยาลัยต่าง ๆ กำลังเผชิญกับความเปลี่ยนแปลงแบบดิสรัปชัน (Disruption) ที่ส่งผลให้จำนวนนักศึกษาใหม่ลดลงอย่างต่อเนื่องอย่างน่าวิตก ปัจจัยเชิงโครงสร้างที่สำคัญคืออัตราการเกิดของประเทศไทยที่ลดลงอย่างมากและการก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุเต็มรูปแบบ ทำให้จำนวนนักเรียนที่จบการศึกษาชั้นมัธยมและเข้าสู่มหาวิทยาลัยหดตัวลงกว่าครึ่งเมื่อเทียบกับช่วงสามทศวรรษก่อนหน้า (สำนักข่าวอินโฟเควสท์, 2566) ผลคือมหาวิทยาลัยส่วนใหญ่ไม่สามารถรับนักศึกษาใหม่ได้เต็มตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ แม้จะเปิดรับสมัครถึง 3-5 รอบ ก็ยังได้จำนวนนักศึกษาไม่ครบตามที่ต้องการ สถานการณ์ดังกล่าวทำให้ทุกมหาวิทยาลัยจำเป็นต้องเร่งปรับตัว หากสถาบันใดไม่สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการดำเนินงานให้สอดคล้องกับบริบทที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างเหมาะสมอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดำเนินงานและความสามารถในการแข่งขันลดลง ซึ่งในระยะยาวอาจนำไปสู่การควมรวบกิจการหรือการยุติการดำเนินงาน นอกจากนี้ ในภาวะที่ที่นั่งในมหาวิทยาลัยมีมากกว่าจำนวนผู้เรียนอย่างที่เป็นอยู่ การแข่งขันเพื่อแย่งชิงนักศึกษาได้ทวีความรุนแรงยิ่งขึ้น โดยสถาบันที่ปรับตัวได้ทันจะสามารถอยู่รอดต่อไป ส่วนสถาบันที่ปรับตัวไม่ได้ย่อมสูญเสียความสามารถในการดำรงอยู่ท่ามกลางวิกฤตอุดมศึกษาครั้งนี้

ในอดีตการวิเคราะห์ข้อมูลการรับเข้าเรียนมักใช้เครื่องมือสถิติเบื้องต้นหรือโปรแกรมสำเร็จรูป เช่น SPSS หรือ Excel โดยเน้นการคำนวณค่าทางสถิติพื้นฐาน การสร้างตารางและกราฟอย่างง่าย และการวิเคราะห์แนวโน้มจากการเปรียบเทียบปีต่อปี แม้ว่าวิธีเหล่านี้จะสามารถสื่อสารข้อมูลเบื้องต้นได้ดีในบางระดับ แต่กลับพบข้อจำกัดสำคัญ ได้แก่ การไม่สามารถเชื่อมโยงตัวแปรที่มีความซับซ้อนร่วมกันได้ ขาดความสามารถในการวิเคราะห์เชิงทำนาย (Predictive Analytics) และไม่สามารถปรับให้เหมาะสมกับรูปแบบข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น จำนวนผู้สมัครจากแต่ละภูมิภาคในแต่ละปี หรือกลุ่มนักเรียนที่มีคุณสมบัติเฉพาะด้าน เป็นต้น

ปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ได้เปิดโอกาสให้เกิดการพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ที่สามารถบูรณาการการวิเคราะห์เชิงทำนายเข้ากับการแสดงผลข้อมูลเชิงโต้ตอบอย่างมีประสิทธิภาพ หนึ่งในเครื่องมือที่ได้รับความนิยมคือ Power BI ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มการวิเคราะห์และแสดงภาพข้อมูลของ Microsoft ที่สามารถเชื่อมต่อกับแหล่งข้อมูลหลายรูปแบบ เช่น SQL Server, Excel, Google Sheets และ Web APIs พร้อมรองรับการฝังโมเดล Machine Learning ที่สร้างขึ้น ซึ่งทำให้ผู้ใช้สามารถฝึกโมเดลทำนาย เช่น การจัดกลุ่มผู้สมัครที่มีแนวโน้มสอบผ่าน หรือการประเมินโอกาสการลงทะเบียนเรียนตามปัจจัยด้านภูมิศาสตร์ ผลการเรียนรู้หรือประเภทโรงเรียนเดิม เป็นต้น

จากการศึกษาวิจัยในปัจจุบัน พบว่า การผสานเทคโนโลยี Machine Learning เข้ากับแพลตฟอร์มการแสดงผลข้อมูลเชิงโต้ตอบ เช่น Power BI ก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในด้านการวิเคราะห์ข้อมูลด้านการศึกษา โดยเฉพาะในการพยากรณ์ผลสัมฤทธิ์ของนักศึกษา การระบุปัจจัยที่มีผลต่อการลาออก และการแบ่งกลุ่มนักศึกษาอย่างมีประสิทธิภาพ

ตัวอย่างเช่น Ladeira et al. (2022) ได้พัฒนาแดชบอร์ดบน Power BI เพื่อวิเคราะห์สาเหตุของการลาออกจากมหาวิทยาลัย โดยใช้ข้อมูลจากระบบการศึกษาในบราซิล ร่วมกับการประยุกต์ใช้โมเดลการเรียนรู้ของเครื่อง พบว่าเครื่องมือดังกล่าวช่วยให้เจ้าหน้าที่สามารถเข้าถึงข้อมูลเชิงลึกและตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ได้รวดเร็วขึ้น ขณะที่ Vemula และ Moraes (2024) ได้ออกแบบแดชบอร์ดการวิเคราะห์การเรียนรู้สำหรับการให้คำปรึกษาทางวิชาการแก่นักศึกษา และในงานวิจัยยังได้ระบุว่าเครื่องมืออย่าง Power BI มีความสามารถในการรองรับการประมวลผลแบบฝังโมเดล (embedded models) ที่ช่วยให้การวิเคราะห์แนวโน้มและการให้คำปรึกษาเชิงรุกมีประสิทธิภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ ตัวอย่าง จากรายงานวิจัยของ สุกัญญา (2562) พบว่ามหาวิทยาลัยบูรพาได้วิเคราะห์ข้อมูลผู้สมัครเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีด้วยระบบ TCAS กว่า 153,000 รายด้วยเครื่องมือ Microsoft Power BI และนำเสนอผลในรูปแบบแดชบอร์ดและตารางสถิติ ซึ่งช่วยให้ผู้บริหารมองเห็นภาพรวมของการแข่งขันและความนิยมในสาขาวิชาต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น จากงานวิจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มของการใช้ Power BI ร่วมกับ Machine Learning ในการพัฒนาระบบวิเคราะห์ข้อมูลที่ตอบโจทย์อย่างรอบด้าน ดังนั้น งานวิจัยนี้จะทำการออกแบบและพัฒนากระบวนการวิเคราะห์เชิงทำนายและการแสดงภาพโดยใช้โมเดลการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูรณาการในแดชบอร์ด Power BI ซึ่งจะช่วยให้งานรับเข้า คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สามารถวางแผนกลยุทธ์การรับนักศึกษาใหม่ได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น รองรับการตัดสินใจเชิงยุทธศาสตร์ที่เสริมขีดความสามารถในการแข่งขันของคณะท่ามกลางความไม่แน่นอนในยุคดิจิทัลได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องการออกแบบและพัฒนาระบบการวิเคราะห์เชิงทำนายและการแสดงภาพโดยใช้โมเดลการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูรณาการในแดชบอร์ด Power BI: กรณีศึกษาข้อมูลการรับเข้า คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยขอบเขตของแดชบอร์ดแบ่งเป็น 6 ส่วน คือ 1) แดชบอร์ดสถิติการรับสมัคร 2) แดชบอร์ดข้อมูลการยืนยันสิทธิ์ 3) แดชบอร์ดเปรียบเทียบแผนการรับกับจำนวนผู้สมัคร 4) แดชบอร์ดการกระจายตัวผู้ยืนยันสิทธิ์ตามภูมิภาค 5) แดชบอร์ดแสดงแนวโน้มจำนวนผู้สมัครโดยใช้โมเดลการเรียนรู้ของเครื่อง ได้แก่ โมเดลการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) และ 6) แดชบอร์ดวิเคราะห์การเลือกสาขาของผู้สมัครโดยใช้โมเดลการเรียนรู้ของเครื่อง ได้แก่ โมเดลป่าสุ่ม (Random Forest) การพัฒนาระบบดังกล่าวมีเป้าหมายเพื่อเติมเต็มช่องว่างของงานวิจัยด้านการนำการวิเคราะห์เชิงทำนายด้วยโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องมาบูรณาการเข้ากับระบบแดชบอร์ดเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงการจัดการในบริบทของงานรับเข้าศึกษาระดับคณะ โดยเฉพาะ ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมายังมีจำนวนจำกัด ผลการวิจัยที่ได้จึงคาดว่าจะก่อให้เกิดคุณค่าทางวิชาการในการขยายองค์ความรู้ด้านการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลขั้นสูงในระบบธุรกิจอัจฉริยะทางการศึกษา และในเชิงการจัดการสามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการวางแผนกลยุทธ์การรับนักศึกษา การจัดสรรทรัพยากร และการกำหนดนโยบายของคณะและสถาบันอุดมศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นระบบมากยิ่งขึ้น

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบการวิเคราะห์เชิงทำนายและการแสดงภาพโดยใช้โมเดลการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูรณาการในแดชบอร์ด Power BI

2.2 เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ที่มีต่อระบบการวิเคราะห์เชิงทำนายและการแสดงภาพโดยใช้โมเดลการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูรณาการในแดชบอร์ด Power BI

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 แนวคิดการสร้างแดชบอร์ดด้วยโปรแกรม Power BI

การสร้างแดชบอร์ดด้วยโปรแกรม Power BI อยู่บนแนวคิดของระบบธุรกิจอัจฉริยะ (Business Intelligence: BI) ซึ่งมุ่งเน้นการแปลงข้อมูลดิบให้เป็นสารสนเทศเชิงลึกที่สามารถนำไปใช้สนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย Power BI ทำหน้าที่เป็นเครื่องมือที่ช่วยบูรณาการการจัดการข้อมูล การวิเคราะห์ และการแสดงผลข้อมูลไว้ในแพลตฟอร์มเดียว ทำให้ผู้ใช้สามารถติดตามสถานการณ์ วิเคราะห์แนวโน้ม และประเมินผลการดำเนินงานผ่านแดชบอร์ดแบบโต้ตอบและไดนามิกได้อย่างเป็นระบบ แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับการตัดสินใจที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูล (Data-driven Decision Making) ซึ่งเป็นกรอบสำคัญของงานวิจัยนี้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องชี้ให้เห็นว่า การนำ Power BI มาใช้ในบริบทของสถาบันอุดมศึกษาสามารถช่วยยกระดับการบริหารจัดการเชิงข้อมูลได้อย่างเป็นรูปธรรม ตัวอย่างเช่น Lopes (2023) ได้พัฒนาแดชบอร์ดด้วย Power BI เพื่อวิเคราะห์

ข้อมูลนักศึกษาของคณะวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และการศึกษา (FCTE) มหาวิทยาลัย São Paulo State University ซึ่งช่วยให้ผู้บริหารสามารถมองเห็นแนวโน้มการสำเร็จการศึกษาและการเลิกเรียนของนักศึกษา และใช้ข้อมูลดังกล่าวประกอบการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์เพื่อตอบสนองต่อปัญหานักศึกษาที่ลดลง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าวยังมุ่งเน้นการวิเคราะห์เชิงพรรณนาเป็นหลัก

ในทำนองเดียวกัน งานศึกษาทางด้านธุรกิจพบว่า Power BI ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการตัดสินใจผ่านการแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์และการวิเคราะห์แบบโต้ตอบ ซึ่งเอื้อต่อการประเมินผลการดำเนินงานและการกำหนดกลยุทธ์ของผู้บริหาร (Ezhilarasi & S, J. M., 2024) อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ยังขาดการบูรณาการการวิเคราะห์เชิงทำนายด้วยโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องเข้ากับแดชบอร์ด Power BI โดยเฉพาะในบริบทของงานรับเข้าศึกษาระดับคณะในสถาบันอุดมศึกษา

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำแนวคิดการสร้างแดชบอร์ดด้วย Power BI มาใช้เป็นกรอบในการพัฒนาระบบที่ไม่เพียงแสดงผลข้อมูลย้อนหลังหรือสถานการณ์ปัจจุบันเท่านั้น แต่ยังขยายขอบเขตไปสู่การวิเคราะห์เชิงทำนายเพื่อสนับสนุนการวางแผนและการตัดสินใจเชิงการจัดการด้านการรับเข้าศึกษาอย่างเป็นระบบและมีหลักฐานเชิงข้อมูลรองรับ

3.2 แนวคิดโมเดลการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression)

โมเดลการถดถอยเชิงเส้น เป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้สร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระตั้งแต่หนึ่งตัวขึ้นไป (Shreyas, 2021) รูปแบบนี้เป็นที่นิยมเนื่องจากความสามารถในการทำนายผลลัพธ์ในอนาคตได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการวิเคราะห์เชิงคาดการณ์ โมเดลการถดถอยเชิงเส้น สามารถแสดงความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง $Y = mx + c$ ได้นั้น มีเป้าหมายในการค้นหาน้ำหนัก (weights) ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้เส้นกราฟที่ได้จากแบบจำลองสามารถอธิบายข้อมูลนำเข้าได้ดีที่สุด (Santhosh et al., 2022, p. 107) ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้โมเดลการถดถอยเชิงเส้นบูรณาการร่วมกับโปรแกรม Power BI เช่น การศึกษาที่ใช้ Power BI ร่วมกับแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นในการทำนายยอดขายและนำเสนอข้อมูลเชิงลึกผ่านแดชบอร์ด โดยในงานวิจัยนี้ มีการนำเสนอแดชบอร์ดสามแบบ ได้แก่ แดชบอร์ดประสิทธิภาพการขาย แดชบอร์ดประสิทธิภาพความเสียหาย และแดชบอร์ดการถดถอยเชิงเส้น ซึ่งช่วยให้ผู้บริหารสามารถตัดสินใจเกี่ยวกับการขายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการวิจัยสรุปได้ว่า โมเดลการถดถอยเชิงเส้นสามารถให้ผลลัพธ์การคาดการณ์ที่น่าเชื่อถือ ซึ่งช่วยให้ธุรกิจสามารถวางแผนและปรับกลยุทธ์ได้อย่างเหมาะสม (Hanifah et al., 2022)

3.3 แนวคิดโมเดลป่าสุ่ม (Random Forest)

โมเดลป่าสุ่ม เป็นการรวมกันของต้นไม้ตัดสินใจหลายต้นที่ทำงานร่วมกันเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนาย โดยแต่ละต้นไม้จะวิเคราะห์ข้อมูลบางส่วนและรวมผลลัพธ์เข้าด้วยกันเพื่อการพยากรณ์ขั้นสุดท้าย โมเดลนี้ถูกพัฒนาต่อยอดมาจากวิธีการสุ่มพื้นที่ย่อย (random-subspace method) โดย (Breiman L., 2001) โมเดลป่าสุ่มนี้จัดอยู่ในประเภทอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม (ensemble learning algorithm) ที่สร้างต้นไม้แต่ละต้นจากชุดข้อมูลย่อยแบบสุ่มที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างแบบ Bagging ซึ่งช่วยลดปัญหาการเรียนรู้เกิน (Overfitting) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Schonlau & Zou, 2020) การทำงานของป่าสุ่มจะเริ่มต้นด้วยการสุ่มตัวอย่างข้อมูลพร้อมการแทนที่ (bootstrap sampling) เพื่อสร้างชุดข้อมูลย่อยหลายชุด ซึ่งแต่ละชุดจะถูกใช้ในการสร้างต้นไม้ตัดสินใจที่แตกต่างกัน จากนั้นแต่ละต้นไม้จะถูกฝึกฝนโดยการเลือกคุณลักษณะแบบสุ่มในแต่ละโหนดแยก เพื่อลดความสัมพันธ์ระหว่างต้นไม้แต่ละต้นและเพิ่มความหลากหลายของแบบจำลอง กระบวนการนี้ช่วยให้โมเดลป่าสุ่มสามารถจัดการกับความซับซ้อนของข้อมูลได้ดีขึ้นและให้ผลลัพธ์การพยากรณ์ที่แม่นยำและเสถียรยิ่งขึ้น ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้โมเดลป่าสุ่มในการพยากรณ์ เช่น การคาดการณ์เหตุการณ์ฝนตกหนัก ในพื้นที่บริเวณกรุงเทพฯ ประเทศเกาหลีใต้ (Kim et al., 2019) โดยงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ Random Forest ในการสร้างแบบจำลองคาดการณ์ความน่าจะเป็นของการเกิดความเสียหายจากฝนตกหนัก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถของโมเดลในการจัดการกับข้อมูลที่มีความซับซ้อนและให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูง และแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ Random Forest ในการจัดการกับความแปรปรวนของข้อมูลสภาพอากาศและภูมิประเทศ ผลลัพธ์งานวิจัยช่วยให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถวางแผนรับมือและลดความเสี่ยงจากภัยพิบัติทางธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

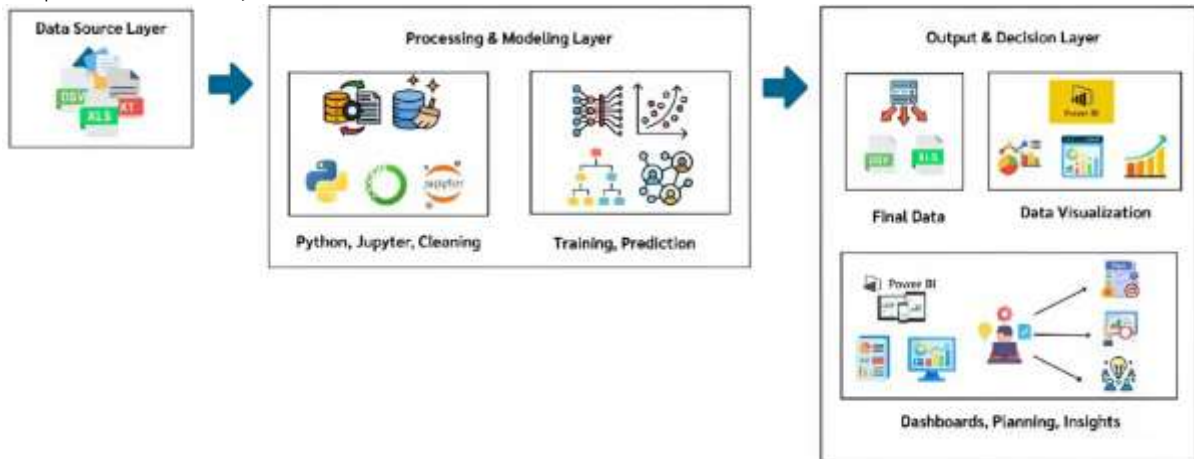
4. วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบและพัฒนาระบบการวิเคราะห์เชิงทำนายและการแสดงภาพโดยใช้โมเดลการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูรณาการในแดชบอร์ด Power BI: กรณีศึกษาข้อมูลการรับเข้า คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี มีวิธีดำเนินการ

วิจัยแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้ ส่วนที่ 1: การกำหนดสถาปัตยกรรมของระบบ ส่วนที่ 2: การกำหนดประชากรและกลุ่มตัวอย่าง และส่วนที่ 3: การกำหนดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและประเมินผล

4.1 การกำหนดสถาปัตยกรรมของระบบ

รูปที่ 1 นี้แสดงสถาปัตยกรรมของระบบ ซึ่งจะแสดงภาพรวมโครงสร้างของระบบ และการเชื่อมต่อระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ โดยมีส่วนประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ 1) Data Source Layer 2) Processing & Modeling Layer และ 3) Output & Decision Layer



รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมของระบบ

4.1.1 Data Source Layer

Data Source Layer เป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการออกแบบและพัฒนาระบบ โดยข้อมูลดิบจะถูกรวบรวมจากไฟล์ประเภทต่าง ๆ เช่น CSV, XLS, TXT ซึ่งอาจมาจากแหล่งข้อมูลภายนอก หรือระบบภายในขององค์กร โดยข้อมูลที่ใช้ คือ ข้อมูลงานรับเข้าของคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ในช่วงปี พ.ศ. 2565-2568 โดยข้อมูลที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยตารางข้อมูลทั้งหมด 7 ตาราง โดยมีการคัดเลือกข้อมูล (Data Selection) เฉพาะระเบียบที่มีข้อมูลครบถ้วนสมบูรณ์ ได้แก่ 1) ตารางข้อมูลผู้สมัคร 2) ตารางข้อมูลผู้ยืนยันสิทธิ์ 3) ตารางข้อมูลแผนการรับในแต่ละรอบ 4) ตารางข้อมูลการกระจายตัวผู้ยืนยันสิทธิ์ตามภูมิภาค 5) ตารางข้อมูลแนวโน้มรายปีคณะวิทยาศาสตร์ 6) ตารางข้อมูลแนวโน้มรายสาขา และ 7) ตารางข้อมูลผลการเรียนตามกลุ่มสาระ

4.1.2 Processing & Modeling Layer

เมื่อได้ข้อมูลดิบจากขั้นตอนที่แล้ว ข้อมูลจะถูกนำมาผ่านกระบวนการประมวลผลและสร้างแบบจำลอง โดยแบ่งขั้นตอนละเอียดดังนี้

1) การเตรียมข้อมูล (Data Preprocessing) ผู้วิจัยใช้ภาษา Python ผ่าน Jupyter Notebook ในการจัดการคุณภาพข้อมูลเพื่อให้เหมาะสมกับแบบจำลองแต่ละประเภท ดังนี้

- การทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleansing): ทำการตรวจสอบและจัดการค่าที่ขาดหาย (Missing Values) โดยการตัดระเบียบที่ไม่สมบูรณ์ออก
- การแปลงข้อมูล (Data Transformation): สำหรับโมเดลการถดถอยเชิงเส้น มีการแปลงข้อมูล "ปีการศึกษา" (Admission Year) จากรูปแบบวันที่ให้เป็นดัชนีตัวเลข (Numerical Index) เพื่อคำนวณความชันและแนวโน้ม สำหรับโมเดลป่าสุ่ม มีการแปลงข้อมูลกลุ่มสาระการเรียนรู้ (GPA รายวิชา) ให้อยู่ในรูปแบบทศนิยมมาตรฐาน และแปลงข้อมูลเป้าหมายคือ "สาขาวิชา" (Major) ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงกลุ่ม (Categorical Data) ให้เป็นรหัสตัวเลข (Label Encoding) เพื่อให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลได้
- การจัดการข้อมูลไม่สมดุล (Handling Imbalanced Data): เนื่องจากจำนวนผู้สมัครในแต่ละสาขาวิชามีความแตกต่างกันมาก (Imbalanced Dataset) งานวิจัยนี้จึงใช้เทคนิค Oversampling เพื่อเพิ่มจำนวนตัวอย่างใน

กลุ่มสาขาที่มีผู้สมัครน้อยให้มีความสมดุลกับสาขาที่มีผู้สมัครมาก ซึ่งช่วยลดความลำเอียง (Bias) ของโมเดลในการทำงาน

2) การสร้างแบบจำลอง (Machine Learning & Modeling) ข้อมูลที่ผ่านการเตรียมแล้วจะถูกนำไปใช้ในการฝึกโมเดลด้วยเทคนิค Machine Learning ได้แก่ โมเดลการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) สำหรับการแสดงแนวโน้มจำนวนผู้สมัคร และโมเดลป่าสุ่ม (Random Forest) สำหรับวิเคราะห์การเลือกสาขาของผู้สมัคร ซึ่งทั้งหมดช่วยในการค้นหารูปแบบ ความสัมพันธ์ และแนวโน้มในข้อมูล โค้ดโปรแกรมภาษาไพทอนในส่วนของการจัดเตรียมข้อมูล และการสร้างโมเดลการถดถอย และโมเดลป่าสุ่ม แสดงในรูปที่ 2-3

```
import pandas as pd
import numpy as np
from sklearn.linear_model import LinearRegression

# 1. Load the dataset
df = pd.read_csv("student_applications_64_68.csv", encoding="utf-8-sig")
df["Major"] = df["Major"].astype(str).str.strip()
df["Year"] = df["Year"].astype(str).str.extract(r"(\d+)").astype(int)

# 2. Select features and target for regression (total applicants per year)
total = df.groupby("Year", as_index=False).size().rename(columns={"Year": "Year_Buddhist", "size": "Applicants"})
base_year = total["Year_Buddhist"].min()
t = (total["Year_Buddhist"] - base_year).to_numpy()
X = t.reshape(-1, 1)
y = total["Applicants"].astype(float).to_numpy()

# 3. Build and train a Linear Regression model
model = LinearRegression()
model.fit(X, y)

# 4. Perform a basic prediction with the trained model (next 3 years)
future_years = np.array([2569, 2570, 2571])
t_future = (future_years - base_year).astype(int).reshape(-1, 1)
predictions = model.predict(t_future)
```

รูปที่ 2 แสดงโค้ดส่วนของการเตรียมข้อมูลและการสร้างโมเดลการถดถอยเชิงเส้น

จากรูปที่ 2 แสดงโค้ดโปรแกรมในส่วนที่เป็นการสร้างโมเดลเพื่อพยากรณ์แนวโน้มจำนวนผู้สมัคร ชุดข้อมูลนักศึกษาถูกนำเข้ามาและเตรียมพร้อมสำหรับการวิเคราะห์แนวโน้มการสมัครเรียนต่อ โดยอ่านข้อมูลจากไฟล์ CSV และทำความสะอาดเบื้องต้น เช่น การแปลงค่าปี พ.ศ. ให้เป็นข้อมูลตัวเลข จากนั้นได้รวมจำนวนผู้สมัครของทุกสาขาวิชาในแต่ละปีเพื่อหาจำนวนผู้สมัครรวมต่อปี ซึ่งจะใช้เป็นตัวแปรตามสำหรับการสร้างแบบจำลอง ขั้นตอนต่อมาเป็นการสร้างแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) และการฝึกโมเดลด้วยข้อมูลที่เตรียมไว้ โดยกำหนดให้ปี (ในรูปดัชนีเวลา) เป็นตัวแปรอิสระ และจำนวนผู้สมัครรวมต่อปีเป็นตัวแปรตาม จากนั้นใช้โมเดลการถดถอยเชิงเส้นจากไลบรารี scikit-learn เพื่อเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างปีและจำนวนผู้สมัครจากข้อมูลในอดีต โมเดลที่ได้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์แนวโน้มเชิงเส้นของจำนวนผู้สมัครตามเวลา และประมาณการจำนวนผู้สมัครในอนาคต หลังจากสร้างโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลแต่ละตัวบนชุดข้อมูลทดสอบ โดยสำหรับโมเดลการถดถอยเชิงเส้นได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ร่วมกับค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) และค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยแบบเปอร์เซ็นต์ (MAPE) เป็นเกณฑ์วัดความแม่นยำในการพยากรณ์

```

import pandas as pd
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.utils import resample

# 1. Load dataset
df = pd.read_csv("Tree_new1.csv")
features = ['THGPAX', 'MAGPAX', 'SCGPAX', 'SSGPAX', 'FLGPAX']
X = df[features]
y = df['Major']

# 2. Balance dataset
df_list = []
for cls in y.unique():
    df_class = df[df['Major'] == cls]
    df_class_upsampled = resample(
        df_class,
        replace=True,
        n_samples=df['Major'].value_counts().max(),
        random_state=42
    )
    df_list.append(df_class_upsampled)
df_balanced = pd.concat(df_list)
X_bal = df_balanced[features]
y_bal = df_balanced['Major']

# 3. Split data
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X_bal, y_bal,
    test_size=0.2,
    random_state=42,
    stratify=y_bal
)

# 4. Train Random Forest
rf = RandomForestClassifier(
    n_estimators=300,
    max_depth=13,
    min_samples_split=5,
    min_samples_leaf=2,
    criterion="entropy",
    random_state=42,
    n_jobs=-1
)
rf.fit(X_train, y_train)

# 5. Predict & Evaluate
y_train_pred = rf.predict(X_train)
y_test_pred = rf.predict(X_test)

```

รูปที่ 3 แสดงโค้ดส่วนของการเตรียมข้อมูลและการสร้างโมเดลป่าสุ่ม

จากรูปที่ 3 แสดงโค้ดโปรแกรมการสร้างโมเดลป่าสุ่ม โดยขั้นตอนเริ่มต้น ได้แก่ การโหลดชุดข้อมูลจากไฟล์ CSV และเลือกเฉพาะคุณลักษณะด้านผลการเรียนที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มสาระต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นตัวแปรอิสระ จากนั้นจัดการปัญหาความไม่สมดุลของข้อมูลแต่ละกลุ่มเป้าหมาย (Major) ด้วยเทคนิค oversampling เพื่อให้แต่ละกลุ่มมีจำนวนตัวอย่างใกล้เคียงกัน แล้วแบ่งข้อมูลออกเป็นชุดฝึกและชุดทดสอบโดยใช้ stratified sampling เพื่อคงสัดส่วนของแต่ละกลุ่ม สำหรับการจำแนกประเภท ได้สร้างโมเดลด้วยอัลกอริทึม Random Forest โดยกำหนดพารามิเตอร์สำคัญ เช่น จำนวนต้นไม้ ($n_estimators$), ความลึกสูงสุดของต้นไม้ (max_depth) และเกณฑ์การแบ่งข้อมูล ($criterion = "entropy"$) แล้วฝึกโมเดลด้วยชุดข้อมูลฝึก จากนั้นนำโมเดลที่ได้ไปทำนายกลุ่มสาขาวิชาของข้อมูลใหม่ในชุดทดสอบ โดยผู้วิจัยได้ประเมินความแม่นยำของการจำแนกด้วยค่าความถูกต้อง (Accuracy), ค่าความแม่นยำเชิงบวก (Precision), การเรียกคืน (Recall) และ F1-score เพื่อให้ครอบคลุมทุกมิติของประสิทธิภาพโมเดล

การดำเนินการขั้นสุดท้ายก่อนเข้าสู่กระบวนการสร้างแดชบอร์ด ได้แก่ การเชื่อมต่อและการปรับปรุงข้อมูล (Scoring & Refresh Strategy) ในขั้นตอนการนำผลการพยากรณ์ไปใช้งาน (Model Deployment) งานวิจัยนี้ใช้วิธีการ Pre-computed Batch Scoring โดยดำเนินการประมวลผลข้อมูลและทำนายผลลัพธ์ทั้งหมดให้เสร็จสิ้นในขั้นตอนการสร้างโมเดล (บน Jupyter Notebook) และจัดเก็บผลลัพธ์สุดท้ายในรูปแบบไฟล์ CSV (Import Mode) เพื่อนำเข้าสู่ Power BI แทนการเขียนสคริปต์เพื่อประมวลผลโมเดลภายใน Power BI โดยตรง วิธีการนี้มีข้อดีคือช่วยลดภาระการประมวลผลขณะใช้งานจริง ทำให้ผู้บริหารสามารถเข้าถึงข้อมูลบนแดชบอร์ดได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องรอการประมวลผลโมเดลใหม่ทุกครั้งที่มีการเรียกดูข้อมูล

สำหรับแนวทางการปรับปรุงข้อมูล (Data & Model Refresh) กำหนดให้มีการดำเนินการแบบ Periodic Update ตามวงรอบปีการศึกษาหรือเมื่อสิ้นสุดรอบการรับสมัคร (TCAS Rounds) โดยเมื่อมีข้อมูลผู้สมัครชุดใหม่ ผู้วิจัยจะนำข้อมูลดิบเข้าสู่กระบวนการทำความสะอาดและป้อนเข้าสู่โมเดลเดิมเพื่อทำนายผล (Scoring) หรือทำการเทรนโมเดลใหม่ (Re-training)

หากลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นจึงทำการอัปเดตไฟล์ CSV ต้นทางเพื่อให้ Power BI ดึงข้อมูลชุดล่าสุดไปแสดงผล

4.1.3 Output & Decision Layer

ข้อมูลที่ผ่านการวิเคราะห์และการสร้างโมเดลแล้ว จะถูกจัดเก็บเป็นข้อมูลสุดท้าย (Final Data) และส่งออกในรูปแบบที่พร้อมใช้งาน เช่น CSV หรือ XLS เพื่อให้สามารถนำไปใช้ต่อในขั้นตอนถัดไป โดยสรุปไฟล์ข้อมูลที่จะใช้ในการสร้างแดชบอร์ด ประกอบไปด้วยไฟล์ข้อมูลทั้งหมด 8 ไฟล์ ได้แก่ 1) ไฟล์ข้อมูลผู้สมัคร 2) ไฟล์ข้อมูลผู้ยืนยันสิทธิ์เข้าศึกษา 3) ไฟล์ข้อมูลแผนการรับในแต่ละรอบ 4) ไฟล์ข้อมูลแผนการรับทั้งปี 5) ไฟล์ข้อมูลการกระจายตัวผู้ยืนยันสิทธิ์ตามภูมิภาค 6) ไฟล์ข้อมูลแนวโน้มผู้สมัครรายปี 7) ไฟล์ข้อมูลแนวโน้มผู้สมัครรายหลักสูตร และ 8) ไฟล์ข้อมูลทำนายการเลือกสาขาของผู้สมัคร

ในลำดับต่อมา ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการสร้างภาพข้อมูล (Data Visualization) ผ่านโปรแกรม Power BI เพื่อนำเสนอผลลัพธ์ในรูปแบบแผนภูมิ กราฟ และแดชบอร์ด ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถมองเห็นภาพรวมและแนวโน้มของข้อมูลได้อย่างชัดเจน นำไปสู่ขั้นตอนสุดท้ายคือการสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision Support) โดยผู้บริหารและผู้เกี่ยวข้องสามารถนำสารสนเทศที่ได้ไปใช้ประกอบการวางแผนกลยุทธ์และวิเคราะห์ผลการดำเนินงานของคณะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.2 การกำหนดประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรและกลุ่มตัวอย่างเพื่อใช้ศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ ได้แก่ กลุ่มหัวหน้าภาควิชา ประธานหลักสูตร และอาจารย์ประจำหลักสูตร รวมทั้งสิ้น 15 คน ซึ่งทั้งหมดเป็นผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการใช้งานแดชบอร์ดนี้โดยตรง

4.3 การกำหนดเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

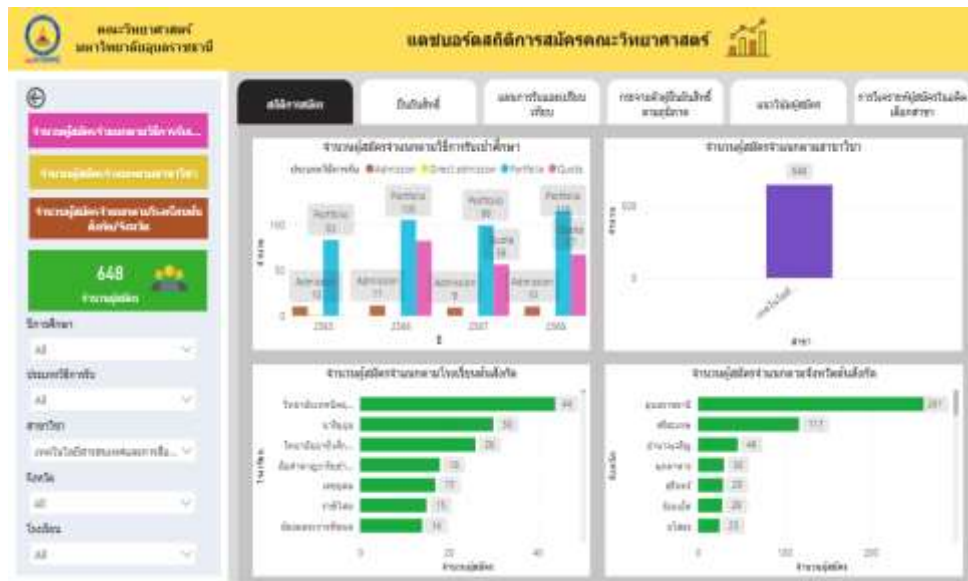
เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการศึกษาความพึงพอใจใช้วิธีการประเมินผ่านแบบสอบถามแบบปลายปิดแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ข้อมูลพื้นฐานของผู้ตอบ สถิติที่ใช้คือความถี่ และร้อยละ ส่วนที่ 2 ความพึงพอใจของผู้ใช้ด้วยมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ สถิติที่ใช้คือ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และส่วนที่ 3 ข้อเสนอแนะ ในส่วนของเครื่องมือที่ใช้สร้างแบบสอบถามออนไลน์ ได้แก่ Google form สำหรับการส่งเพื่อประเมินแบบสอบถาม

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

5.1 การออกแบบและพัฒนาระบบการวิเคราะห์เชิงทำนายและการแสดงผลภาพโดยใช้โมเดลการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูรณาการในแดชบอร์ด Power BI

5.1.1 แดชบอร์ดสถิติการรับสมัคร

แดชบอร์ดในส่วนนี้เป็นสถิติจำนวนผู้สมัคร โดยสามารถทำการเลือกสาขาวิชาที่ต้องการ ปีการศึกษา จังหวัด ในสังกัด และโรงเรียนของนักเรียนผู้สมัคร แดชบอร์ดจะแสดงในลักษณะกราฟแท่งเปรียบเทียบตามเงื่อนไขที่เลือก ทำให้ทราบว่าผู้สมัครในสาขาที่เลือกนั้นส่วนใหญ่มาจากโรงเรียนอะไร จังหวัดอะไร ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แดชบอร์ดสถิติการรับสมัคร สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ปี 2565-2568 ทัวประเทศ

5.1.2 แดชบอร์ดข้อมูลการยืนยันสิทธิ์

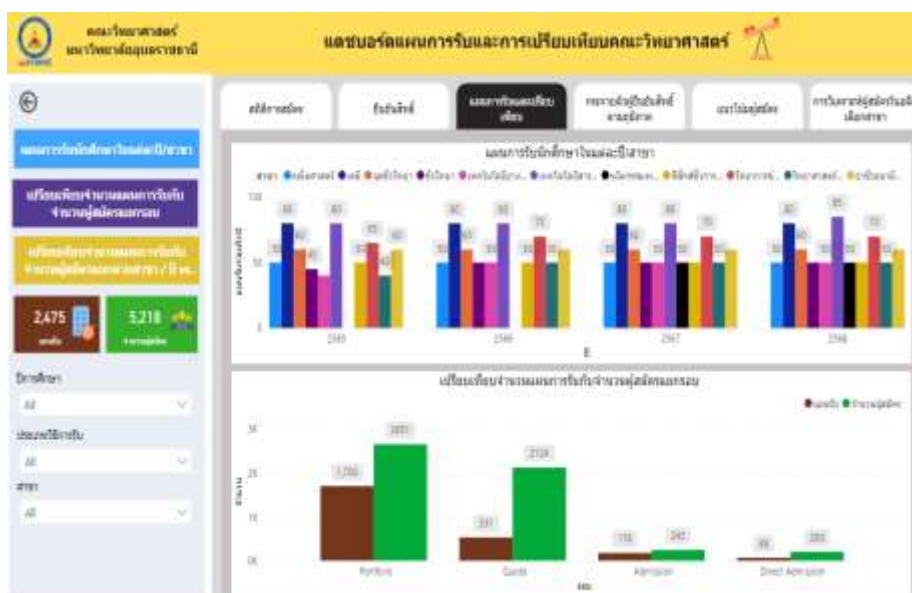
แดชบอร์ดในส่วนนี้เป็นสถิติจำนวนผู้ยืนยันสิทธิ์เข้าศึกษาต่อ โดยสามารถทำการเลือกสาขาวิชาที่ต้องการ ปีการศึกษา จังหวัดในสังกัด และโรงเรียนของนักเรียนผู้ยืนยันสิทธิ์ แดชบอร์ดจะแสดงในลักษณะกราฟแท่งเปรียบเทียบตามเงื่อนไขที่เลือก ทำให้ทราบว่าผู้ยืนยันสิทธิ์ในสาขาที่เลือกนั้นส่วนใหญ่มาจากโรงเรียนอะไร จังหวัดอะไร ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แดชบอร์ดข้อมูลยืนยันสิทธิ์ สาขาเคมี ปี 2565-2568 ทูกรอบการรับ

5.1.3 แดชบอร์ดเปรียบเทียบแผนการรับกับจำนวนผู้สมัคร

แดชบอร์ดในส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนตามแผนรับและจำนวนผู้สมัครเรียน โดยสามารถทำการเลือกสาขาวิชาที่ต้องการ ปีการศึกษา และประเภทวิธีการรับ แดชบอร์ดจะแสดงในลักษณะกราฟแท่งเปรียบเทียบตามเงื่อนไขที่เลือก ทำให้ทราบว่าสาขาวิชานั้น จำนวนผู้สมัครเรียนเมื่อเทียบกับจำนวนตามแผนรับเป็นอย่างไร เป็นไปตามแผนหรือไม่ มากกว่าหรือน้อยกว่า ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 6



5.1.4 แดชบอร์ดการกระจายตัวผู้ยืนยันสิทธิ์ตามภูมิภาค

แดชบอร์ดในส่วนนี้จะแสดงการกระจายตัวของผู้ยืนยันสิทธิ์เข้าศึกษาต่อรายสาขาวิชา โดยแสดงด้วยกราฟวงกลมให้เห็นสัดส่วนของผู้ยืนยันสิทธิ์เข้าศึกษาต่อตามภูมิภาค และจังหวัด นอกจากนี้ยังแสดงด้วยกราฟ aquarium โดยขนาดของตัวปลาจะแทนจำนวนผู้ยืนยันสิทธิ์เข้าศึกษาต่อ ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 7



5.1.5 แดชบอร์ดแสดงแนวโน้มจำนวนผู้สมัคร

แดชบอร์ดในส่วนนี้จะแสดงแนวโน้มจำนวนผู้สมัครเรียนทั้งภาพรวมของคณะวิทยาศาสตร์ และรายสาขาวิชา โดยจะแสดงด้วยกราฟเส้นให้เห็นแนวโน้มโดยการพยากรณ์จำนวนผู้สมัครใน 3 ปีข้างหน้า ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แดชบอร์ดทำนายแนวโน้มจำนวนผู้สมัคร คณะวิทยาศาสตร์ และสาขานวัตกรรมเทคโนโลยีวัสดุ ปี 2569-2571

จากการประเมินประสิทธิภาพของโมเดล Linear Regression ในการพยากรณ์จำนวนผู้สมัครแยกตามสาขาวิชา โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error: MAE), ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการประเมินประสิทธิภาพโมเดล Linear Regression จำแนกตามสาขาวิชา

สาขา	MAE	MAPE (%)	R2
คณิตศาสตร์	1.44	16.87	0.1692
จุลชีววิทยา	0.27	16.04	0.0940
ชีววิทยา	1.55	20.16	0.1279
ฟิสิกส์ชีวการแพทย์	0.62	27.47	0.2057
วิทยาการข้อมูลและนวัตกรรมซอฟต์แวร์	0.24	24.68	0.2165
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม	0.18	6.29	0.1047
อาชีวอนามัยและความปลอดภัย	0.76	20.85	0.2694
เคมี	2.95	16.96	0.1214
เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์	0.83	6.95	0.2936
เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร	0.41	29.36	0.2013
ค่าเฉลี่ย	1.11	17.42	0.1731

จากตารางที่ 1 พบว่าโมเดลมีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้สำหรับการวางแผนบริหารจัดการ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (MAE) รวมอยู่ที่ 1.11 คน ซึ่งหมายความว่า การพยากรณ์จำนวนผู้สมัครจะคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงประมาณ 1 คนต่อสาขาเท่านั้นเมื่อพิจารณารายสาขา พบว่า สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และ สาขาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ มีผลการพยากรณ์ที่แม่นยำสูงสุด โดยมีค่า MAPE ต่ำเพียงร้อยละ 6.29 และ 6.95 ตามลำดับ ในขณะที่สาขาที่มีความผันผวนสูง เช่น สาขาเคมี และสาขาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร อาจมีความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่า (MAE ประมาณ 2-3 คน) ทั้งนี้ แม้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เฉลี่ยจะอยู่ที่ 0.1731 ซึ่งบ่งชี้ว่าตัวแปรด้านเวลาเพียงอย่างเดียวอาจไม่สามารถอธิบายความแปรปรวนของจำนวนผู้สมัครได้ทั้งหมด หากนำตัวแปรอื่นมาร่วมพิจารณา เช่น ประเภทโรงเรียน ภูมิภาค หรือสาขาวิชาที่เปิด อาจช่วยให้ค่า R^2 สูงขึ้นในอนาคต แต่เมื่อพิจารณาค่า MAE ที่ต่ำ ประกอบกับวัตถุประสงค์เพื่อการคาดการณ์แนวโน้มเบื้องต้น ผลลัพธ์นี้จึงเพียงพอสำหรับการสนับสนุนการตัดสินใจวางแผนรับนักศึกษาประจำปี

5.1.6 แดชบอร์ดวิเคราะห์การเลือกสาขาของผู้สมัคร

แดชบอร์ดในส่วนนี้จะใช้เพื่อการวิเคราะห์สาขาวิชาที่นักเรียนจะเลือก โดยดูจากผลการเรียนตามกลุ่มสาระต่าง ๆ ได้แก่ กลุ่มสาระวิชาภาษาไทย กลุ่มสาระวิชาคณิตศาสตร์ กลุ่มสาระวิชาวิทยาศาสตร์ กลุ่มสาระวิชาสังคมศึกษา และกลุ่มสาระวิชาภาษาอังกฤษ โดยผู้ใช้งานทำการเลือกคะแนนผลการเรียนของนักเรียนแต่ละกลุ่มสาระ ผลลัพธ์จะทำนายสาขาวิชาที่นักเรียนมีแนวโน้มจะเลือกเรียน ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 9

รูปที่ 9 แดชบอร์ดวิเคราะห์การเลือกสาขา โดยใช้เกรดจากกลุ่มสาระภาษาไทย (เกรด 3-4) คณิตศาสตร์ (เกรด 3-4) วิทยาศาสตร์ (เกรด 2-3) สังคมศึกษา (เกรด 2-3) และภาษาอังกฤษ (เกรด 2-3) สาขาที่ผู้สมัครมีโอกาสเลือกมากที่สุดคือ สาขาวิทยาการข้อมูลและนวัตกรรมซอฟต์แวร์

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของโมเดล Random Forest ในการจำแนกสาขาวิชาที่เหมาะสมกับผู้สมัคร ผู้วิจัยได้ใช้การตรวจสอบไขว้ (Cross-validation) และวัดผลด้วยค่าความถูกต้อง (Accuracy), ค่าความแม่นยำ (Precision), ค่าความรำลึก (Recall) และค่า F1-Score ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการประเมินประสิทธิภาพโมเดล Random Forest

Precision	Accuracy	Recall	F1 Score
0.718	7.18	0.718	0.716

จากตารางที่ 2 การประเมินประสิทธิภาพของโมเดล Random Forest ที่ใช้ในการจำแนกสาขาวิชาที่ผู้สมัครน่าจะเลือก มีค่าประสิทธิภาพของโมเดลให้ค่า Accuracy และ Precision อยู่ที่ประมาณ 71.8% โดยมีค่า F1-score เท่ากับ 0.716 แสดงถึงความสมดุลในการทำนายระหว่างค่าความแม่นยำและการเรียกคืน ซึ่งสะท้อนว่าโมเดลสามารถจำแนกได้อย่างมีประสิทธิภาพในระดับปานกลาง ไม่สูงมากนัก ผู้ใช้จึงควรใช้ความระมัดระวังในการนำผลการทำนายไปใช้งานจริง โดยอาจพิจารณาพร้อมกับข้อมูลอื่นเพิ่มเติม

5.2 การศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ที่มีต่อระบบการวิเคราะห์เชิงทำนายและการแสดงผลโดยใช้โมเดลการเรียนรู้ของเครื่องแบบบูรณาการในแดชบอร์ด Power BI

ผลการศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ข้อมูลส่วนที่ 1 ข้อมูลพื้นฐานทั่วไป ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นกลุ่มอาจารย์ประจำหลักสูตร (ร้อยละ 53.33) โดยส่วนใหญ่สังกัดในหลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (ร้อยละ 46.67) และที่น่ายกย่องว่ากลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ยังไม่เคยใช้งานแดชบอร์ดมาก่อน (ร้อยละ 40.00) และรายงานความพึงพอใจสูง แสดงถึงการใช้งานง่าย เรียนรู้เร็วและสะดวกสำหรับผู้ใช้งาน (User-friendly) และรูปแบบการนำเสนอข้อมูลในระบบ ข้อมูลทั้งหมดแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลพื้นฐานทั่วไป

ข้อมูลผู้ประเมิน	จำนวน	ร้อยละ
ตำแหน่ง		
อาจารย์ประจำหลักสูตร	8	53.33
ประธานหลักสูตร	5	33.33
หัวหน้าภาควิชา	2	13.33
หลักสูตร		
คณิตศาสตร์	1	6.67
จุลชีววิทยา	1	6.67
ฟิสิกส์ชีวการแพทย์	1	6.67
วิทยาการข้อมูลและนวัตกรรมซอฟต์แวร์	1	6.67
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม	1	6.67
อาชีวอนามัยและความปลอดภัย	1	6.67
เคมี	1	6.67
เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์	1	6.67
เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร	7	46.67
ประสบการณ์การใช้งานเดสก์บอร์ด		
ไม่เคยใช้มาก่อน	6	40.00
เคยใช้เล็กน้อย	4	26.67
ใช้เป็นบางครั้ง	4	26.67
ใช้บ่อย/มีความชำนาญ	1	6.67

ข้อมูลส่วนที่ 2 การศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ที่มีต่อระบบ แบ่งเป็น 5 ด้าน ได้แก่ 1) ด้านการใช้ประโยชน์ 2) ด้านความถูกต้องของข้อมูล 3) ด้านวัตถุประสงค์การใช้งาน 4) ด้านฟังก์ชันและเทคโนโลยี และ 5) ด้านการออกแบบ โดยค่าความพึงพอใจเฉลี่ยโดยรวมมีค่าเท่ากับ 4.38 อยู่ในระดับมาก ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.58 และเมื่อพิจารณาเป็นรายด้านค่าความพึงพอใจเฉลี่ยใน 3 ลำดับแรก ได้แก่ ลำดับที่ 1 ด้านฟังก์ชันและเทคโนโลยี ค่าความพึงพอใจเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 4.52 อยู่ระดับมากที่สุด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.58 สะท้อนว่าผู้ใช้งานเห็นว่าเดสก์บอร์ดมีฟังก์ชันครบถ้วน ใช้งานง่าย และประมวลผลได้รวดเร็ว รองลงมาในลำดับที่ 2 ด้านวัตถุประสงค์การใช้งาน ค่าความพึงพอใจมีค่าเท่ากับ 4.41 อยู่ในระดับมาก ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.54 และลำดับที่ 3 ด้านการออกแบบ ค่าความพึงพอใจมีค่าเท่ากับ 4.40 อยู่ในระดับมาก ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.56 ซึ่งบ่งชี้ว่าเดสก์บอร์ดตอบโจทย์เป้าหมายของผู้ใช้และนำเสนอข้อมูลได้ชัดเจน สวยงาม ในทางตรงกันข้าม ด้านความถูกต้องของข้อมูลได้ค่าความพึงพอใจเฉลี่ยต่ำสุด เท่ากับ 4.20 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.61 แม้จะยังอยู่ในระดับมากก็ตาม ซึ่งสะท้อนความจำเป็นในการปรับปรุงกระบวนการจัดการข้อมูลให้ใหม่และครบถ้วนมากขึ้น ผลการศึกษาความพึงพอใจทั้งหมด แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ข้อมูลความพึงพอใจต่อการใช้งานระบบ

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	ระดับคุณภาพ
ด้านการใช้ประโยชน์			
ระบบช่วยให้เข้าใจภาพรวมของข้อมูลการรับเข้าเรียนได้ง่ายขึ้น	4.33	0.72	มาก
ระบบช่วยให้วิเคราะห์แนวโน้มการรับเข้าเรียนในแต่ละปี/สาขาวิชาได้	4.27	0.59	มาก
ระบบช่วยให้สามารถเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างสาขาหรือช่วงเวลาได้	4.47	0.52	มาก
ระบบช่วยสนับสนุนการตัดสินใจหรือวางแผนงานด้านการรับเข้าเรียน	4.60	0.63	มากที่สุด
ระบบมีฟังก์ชันที่ตอบสนองต่อความต้องการใช้งานจริง	4.27	0.59	มาก
เฉลี่ย	4.39	0.61	มาก

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	ระดับคุณภาพ
ด้านความถูกต้องของข้อมูล			
ข้อมูลในระบบมีความถูกต้องและเชื่อถือได้	4.33	0.62	มาก
ข้อมูลที่นำเสนอทันสมัยและอัปเดตตามความเป็นจริง	4.20	0.68	มาก
ระบบช่วยลดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ข้อมูล	4.07	0.59	มาก
ระบบแสดงข้อมูลครบถ้วนและไม่ขาดข้อมูลสำคัญ	4.20	0.56	มาก
เฉลี่ย	4.20	0.61	มาก
ด้านวัตถุประสงค์การใช้งาน			
ระบบสามารถตอบโจทย์วัตถุประสงค์การใช้งานของท่านได้	4.47	0.52	มาก
ระบบมีความยืดหยุ่น สามารถปรับการใช้งานให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้ใช้	4.33	0.49	มาก
ระบบโดยรวมตอบสนองต่อเป้าหมายและความคาดหวังของผู้ใช้ได้อย่างเหมาะสม	4.33	0.62	มาก
ระบบช่วยประหยัดเวลาในการค้นหาและวิเคราะห์ข้อมูล	4.53	0.52	มาก
เฉลี่ย	4.41	0.54	มาก
ด้านฟังก์ชันและเทคโนโลยี			
ระบบใช้งานง่ายและเข้าใจฟังก์ชันต่าง ๆ ได้รวดเร็ว	4.47	0.52	มาก
ระบบมีฟังก์ชันครบถ้วน รองรับการวิเคราะห์และกรองข้อมูล	4.47	0.64	มาก
ระบบสามารถแสดงผลแบบกราฟ/ตาราง/แดชบอร์ดได้อย่างเหมาะสม	4.53	0.64	มากที่สุด
ระบบทำงานได้รวดเร็วและไม่ล่าช้า	4.60	0.51	มากที่สุด
เฉลี่ย	4.52	0.58	มากที่สุด
ด้านการออกแบบ			
การจัดวางตาราง กราฟ และ Dashboard มีความชัดเจนและเข้าใจง่าย	4.53	0.52	มากที่สุด
ระบบมีรูปแบบการแสดงผลสวยงามและเป็นระเบียบ	4.33	0.49	มาก
สีและสัญลักษณ์ในระบบช่วยให้ตีความข้อมูลได้ง่าย	4.47	0.64	มาก
ความน่าสนใจและความพึงพอใจโดยรวมต่อการออกแบบ Dashboard	4.27	0.59	มาก
เฉลี่ย	4.40	0.56	มาก
เฉลี่ยรวม	4.38	0.58	มาก

ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวคิดและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอย่างชัดเจน งานศึกษาก่อนหน้านี้ชี้ให้เห็นว่าการผสมผสานเทคโนโลยี Machine Learning เข้ากับแดชบอร์ดแบบโต้ตอบอย่าง Power BI ก่อให้เกิดประโยชน์ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางการศึกษา โดยเฉพาะในการเข้าถึงข้อมูลเชิงลึกและสนับสนุนการตัดสินใจอย่างรวดเร็ว ตัวอย่าง เช่น Ladeira et al. (2022) พบว่าแดชบอร์ดที่ใช้ Machine Learning ใน Power BI ช่วยให้เจ้าหน้าที่เข้าถึงข้อมูลเชิงลึกและตัดสินใจทางยุทธศาสตร์ได้รวดเร็วขึ้น นอกจากนี้ งานวิจัยอื่น ๆ เช่น Ezhilarasi & S, (2024) ได้ระบุว่าแดชบอร์ดแบบโต้ตอบใน Power BI จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการข้อมูลและการตัดสินใจของผู้บริหาร ผลการศึกษานี้สนับสนุนทิศทางดังกล่าว โดยแสดงให้เห็นว่าแดชบอร์ดวิเคราะห์ข้อมูลรับเข้าร่วมกับโมเดล Machine Learning สามารถสร้างข้อมูลเชิงลึกที่ผู้บริหารใช้วางแผนการรับนักศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสอดคล้องกับแนวโน้มงานวิจัยปัจจุบันที่ใช้ Power BI ในการวิเคราะห์ข้อมูลผู้สมัคร สุกัญญา (2562)

นอกจากนั้น งานวิจัยนี้ได้ค้นพบองค์ความรู้ใหม่ ที่มีความเฉพาะเจาะจงต่อบริบทการรับนักศึกษาด้านวิทยาศาสตร์ ดังนี้

- 1) ข้อค้นพบใหม่จากการใช้ Linear Regression ชี้ให้เห็นว่า ความผันผวนของจำนวนผู้สมัครไม่ได้เกิดขึ้นเท่ากันในทุกสาขา โดยพบว่าสาขาที่มีความเฉพาะทางสูง (Niche Majors) เช่น วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ มีรูปแบบข้อมูลอนุกรมเวลาที่เสถียรและพยากรณ์ได้แม่นยำสูง (MAPE ต่ำกว่าร้อยละ 7) ในขณะที่สาขาที่มีการแข่งขันสูงหรือเป็นที่นิยมตามกระแสสังคม เช่น เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร จำเป็นต้องใช้ตัวแปรอื่น

นอกเหนือจากปัจจัยด้านเวลาเข้าร่วมพยานณ์ ข้อค้นพบนี้ช่วยให้ผู้บริหารสามารถเลือกใช้นโยบายเชิงรุกหรือเชิงรับได้แตกต่างกันตามธรรมชาติของแต่ละหลักสูตร

- 2) การเปลี่ยนโมเดลทางคณิตศาสตร์สู่การปฏิบัติจริง (Model Operationalization) งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า การนำโมเดลที่มีความซับซ้อนทางสถิติมาแสดงผลผ่านแดชบอร์ดช่วยลดระยะเวลาในการตีความข้อมูลของเจ้าหน้าที่ฝ่ายรับเข้าศึกษา ทำให้สามารถระบุกลุ่มเป้าหมายและวางแผนโควตาการรับได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการปิดช่องว่างระหว่างทฤษฎี Machine Learning และการปฏิบัติงานจริงในสถาบันการศึกษา

ข้อจำกัดในการตีความผลการวิเคราะห์ ผู้วิจัยขอเน้นย้ำว่าแม้โมเดลการเรียนรู้ของเครื่องจะสามารถระบุตัวแปรที่มีความสำคัญ (Feature Importance) ต่อการพยากรณ์ได้ แต่ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนถึง ความสัมพันธ์เชิงทำนาย (Predictive Relationship) ระหว่างข้อมูลคุณลักษณะกับตัวแปรเป้าหมายเท่านั้น ยังไม่ใช่อุปกรณ์การสรุปความสัมพันธ์เชิงสาเหตุและผลลัพธ์ที่แท้จริง เนื่องจากข้อจำกัดของกระบวนการวิเคราะห์ที่ไม่ได้มีการควบคุมตัวแปรแทรกซ้อนตามระเบียบวิธีวิจัยเชิงทดลอง ดังนั้น การนำเสนอผลจากระบบแดชบอร์ดนี้ไปประยุกต์ใช้ จึงควรเป็นไปในบทบาทของ "เครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์และการสำรวจข้อมูล (Exploratory Decision Support)" โดยผู้บริหารสามารถใช้ผลการวิเคราะห์เพื่อระบุแนวโน้มและตั้งสมมติฐานเบื้องต้นสำหรับการเจาะลึกข้อมูล มากกว่าการใช้เป็นข้อสรุปชี้ขาดทางปัจจัยเพียงอย่างเดียว

สรุปได้ว่า แดชบอร์ดทั้งหกที่พัฒนาขึ้นตอบสนองต่อวัตถุประสงค์งานวิจัยทั้งสองประการและได้รับการยอมรับจากผู้ใช้ อย่างไรก็ตาม ข้อค้นพบชี้ให้เห็นประเด็นที่ควรพัฒนาเพิ่มเติม อาทิ ด้านการจัดการและอัปเดตข้อมูลเพื่อเพิ่มความถูกต้องของการวิเคราะห์ และการขยายการทดลองไปยังผู้ใช้หรือบริบทอื่น ๆ เพื่อทดสอบความยืดหยุ่นของระบบ แนวทางต่อยอดงานวิจัยสามารถรวมถึงการบูรณาการข้อมูลปัจจัยภายนอกเพิ่มเติม เช่น ข้อมูลประชากรศาสตร์ของนักเรียน หรือลองใช้เทคนิค Machine Learning อื่น ๆ ในการพยากรณ์เพื่อยกระดับประสิทธิภาพการวิเคราะห์เชิงทำนายในระบบแดชบอร์ดนี้ต่อไป

6. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบและพัฒนาระบบแดชบอร์ดเชิงวิเคราะห์และพยากรณ์ข้อมูลขึ้นทั้งหมด 6 ประเภทตามวัตถุประสงค์ที่ 1 โดยแต่ละประเภทของแดชบอร์ดมีความครอบคลุมการนำเสนอข้อมูลที่แตกต่างกัน เช่น แดชบอร์ดสรุปสถิติการรับเข้าและจำนวนผู้สมัครในแต่ละหลักสูตรตามปีการศึกษา แดชบอร์ดพยากรณ์แนวโน้มจำนวนผู้สมัครในอนาคตด้วยโมเดล Machine Learning แดชบอร์ดเพื่อจำแนกรูปแบบคุณลักษณะของผู้สมัครที่มีความสัมพันธ์กับการเลือกเข้าศึกษา เช่น เกณฑ์คะแนนคุณสมบัติ แดชบอร์ดเปรียบเทียบอัตราการสมัครและอัตราการรับเข้าในกลุ่มประชากรต่าง ๆ รวมถึงแดชบอร์ดสรุปตัวชี้วัดสำคัญ (KPI) ด้านการรับนักศึกษาเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ ทั้งหมดนี้ถูกฝังอยู่ในแอปพลิเคชัน Power BI เพื่อให้ผู้บริหารและเจ้าหน้าที่สามารถเข้าถึงข้อมูลเชิงลึกได้อย่างรวดเร็วและสะดวก โดยได้จัดการออกแบบให้แดชบอร์ดแต่ละประเภทมีส่วนประสานที่ชัดเจน ปรับใช้ตัวกรอง (filters) และกราฟหลากหลายรูปแบบสอดคล้องกับลักษณะข้อมูลของคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผลจากการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ 2 พบว่าผู้ใช้งานโดยรวมมีความพึงพอใจในระดับมากต่อระบบที่พัฒนาขึ้น ด้านความง่ายในการใช้งาน ความชัดเจนของการนำเสนอข้อมูล และความสอดคล้องกับความต้องการปฏิบัติงาน มีคะแนนเฉลี่ยอยู่ในระดับมากถึงมากที่สุด โดยไม่มีปัญหาข้อร้องเรียนด้านเทคนิคสำคัญใด ๆ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการประเมินนี้กระทำกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 15 คน ซึ่งเป็นการทดสอบระบบในระดับนำร่อง (Pilot Study) เพื่อยืนยันประสิทธิภาพการทำงานเบื้องต้น ดังนั้น การนำผลการศึกษาไปใช้อ้างอิงในบริบทที่กว้างขวางขึ้น จึงควรพิจารณาขยายขนาดกลุ่มตัวอย่างให้ครอบคลุมผู้ใช้งานที่มีความหลากหลายในงานวิจัยลำดับต่อไป เพื่อให้ผลการประเมินมีความเป็นตัวแทนที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น พบว่าการผสมผสานการทำงานของ Power BI ร่วมกับโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องช่วยเพิ่มศักยภาพในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างเป็นรูปธรรม โดยมีหลักฐานเชิงประจักษ์จากการทดสอบประสิทธิภาพโมเดล พบว่าโมเดลการถดถอยเชิงเส้นมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) รวมอยู่ที่ 1.11 คน และค่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยแบบเปอร์เซ็นต์ (MAPE) อยู่ที่ร้อยละ 17.42 ซึ่งถือว่าเป็นระดับความแม่นยำที่ยอมรับได้สำหรับการพยากรณ์แนวโน้มเพื่อประกอบการวางแผนเบื้องต้น ในขณะที่โมเดล Random Forest สำหรับการจำแนกสาขาวิชา มีค่าความถูกต้อง (Accuracy) เฉลี่ยร้อยละ 71.8 อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยยังมีข้อจำกัดบางประการ

โดยเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของการพยากรณ์ในบางสาขาวิชายังอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าปัจจัยด้านปีการศึกษาเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอต่อการอธิบายความผันผวนของจำนวนผู้สมัครในหลักสูตรที่มีการแข่งขันสูง

โดยสรุป ผลการวิจัยครั้งนี้ชี้ให้เห็นถึงคุณค่าของระบบในด้านการสนับสนุนการวางแผนรับนักศึกษาและการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ การที่ระบบสามารถให้ข้อมูลเชิงลึกทั้งด้านตัวเลขและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงช่วยให้ผู้บริหารสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการวางแผนจัดสรรทรัพยากรด้านการศึกษาและคัดเลือกหลักสูตรได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ระบบยังสนับสนุนการวิเคราะห์แนวโน้มและรูปแบบความสัมพันธ์ของข้อมูล ช่วยลดความไม่แน่นอน และส่งเสริมการวางแผนนโยบายการรับเข้าที่ตอบโจทย์ความต้องการของคณะวิทยาศาสตร์ได้อย่างเป็นระบบและต่อเนื่องในอนาคต

7. ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยสามารถเสนอแนะประเด็นที่ควรพัฒนาต่อยอดได้ดังนี้

7.1 ด้านการพัฒนาและปรับปรุงระบบและข้อมูล

ควรมีการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการจัดเก็บและอัปเดตข้อมูลให้เป็นระบบมากขึ้น เพื่อให้ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความถูกต้อง ครบถ้วน และเป็นปัจจุบันมากที่สุด เนื่องจากผู้ใช้ให้คะแนนด้านความถูกต้องของข้อมูลต่ำกว่าด้านอื่น แม้จะยังอยู่ในระดับมากก็ตาม ดังนั้นการวางระบบ Data Pipeline หรือการเชื่อมต่อข้อมูลแบบอัตโนมัติ (Automated Data Refresh) จะช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นและความน่าเชื่อถือในการนำผลไปใช้ตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ได้ดียิ่งขึ้น

7.2 ด้านการเพิ่มฟังก์ชันการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ใช้โมเดล Linear Regression และ Random Forest ในการวิเคราะห์เชิงทำนาย แต่สามารถต่อยอดด้วยการทดลองอัลกอริทึมอื่น เช่น Gradient Boosting, XGBoost หรือ Neural Networks เพื่อประเมินว่าโมเดลใดให้ประสิทธิภาพสูงสุดต่อข้อมูลด้านการรับสมัคร นอกจากนี้สามารถเพิ่มฟังก์ชันวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร หรือระบบแจ้งเตือนความเสี่ยง (Early Warning System) เพื่อช่วยให้ผู้บริหารวางแผนรับนักศึกษาได้แม่นยำมากขึ้น

7.3 ด้านการขยายกลุ่มผู้ใช้งาน

ควรขยายการทดสอบระบบให้ครอบคลุมผู้ใช้งานกลุ่มอื่น เช่น เจ้าหน้าที่งานรับเข้า นักวิชาการศึกษา หรือผู้บริหารระดับคณะและมหาวิทยาลัย เพื่อประเมินประโยชน์ของระบบในหลายมุมมอง และเพิ่มความหลากหลายของข้อมูลความพึงพอใจ ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาที่ตอบสนองการใช้งานจริงได้ดียิ่งขึ้น

7.4 ด้านการนำระบบไปใช้ในระยะยาว

ควรมีการติดตามประเมินผลการใช้งานระบบในระยะยาว เพื่อวัดผลกระทบต่อการวางแผนรับนักศึกษา เช่น ความแม่นยำของการพยากรณ์เมื่อเทียบกับข้อมูลจริงในแต่ละปี หรือประสิทธิผลของการวิเคราะห์แนวโน้มผู้สมัครในระดับสาขาวิชา ผลการติดตามดังกล่าวจะช่วยให้การปรับปรุงโมเดลหรือแดชบอร์ดในอนาคตมีความสอดคล้องกับสถานะจริงมากขึ้น

7.5 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยครั้งต่อไป

ควรเพิ่มตัวแปรด้านประชากรศาสตร์หรือพฤติกรรมผู้สมัคร เช่น โรงเรียนเดิม ผลการเรียนเฉลี่ย ความสนใจในการเลือกสาขา หรือข้อมูลจาก TCAS รอบต่าง ๆ ซึ่งอาจช่วยให้การวิเคราะห์และการคาดการณ์มีความละเอียดและเที่ยงตรงยิ่งขึ้น รวมถึงการพัฒนาแดชบอร์ดให้สามารถรองรับการคาดการณ์ระดับบุคคล (Individual Prediction) เพื่อใช้ในการทำงานเชิงรุกด้านการตลาดและแนะแนวการศึกษา

8. เอกสารอ้างอิง

- Breiman L. Random forests. *Machine Learning*. 2001;45(1):5–32.
- Ezhilarasi, Dr. T., & S, J. M. (2024). A Study on Implementation of Power BI Dashboards to Streamline Business Processes. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 12(7), 1548–1551.
- Hanifah, S., Akbar, F., & Santi, R. P. (2022). Implementasi Business Intelligence dan Prediksi Menggunakan Regresi Linear pada Data Penjualan dan Breakage di PT XYZ. *Jurnal Nasional Teknologi Dan Sistem Informasi*, 8(3), 144–152.

- Kim, J., Lee, J., Kim, D., Choi, C., Lee, M., & Kim, H. S. (2019). Developing a Prediction Model (Heavy Rain Damage Occurrence Probability) Based on Machine Learning. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 19(6), 115–127.
- Ladeira, P. P., de Lima, L. M., & Krohling, R. A. (2022). A visualization tool for data analysis on higher education dropout: a case study at UFES (arXiv:2201.12637v1).
- Lopes, M. R. (2023). Transformando dados em informações: a ferramenta Power BI e a elaboração de Dashboard sobre o corpo discente da FCTE – Faculdade de Ciências, Tecnologia e Educação da UNESP, Câmpus de Ourinhos.
- Santhosh Kumar, B. (2023). Introductory Chapter: Data Integrity and Data Governance. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.110399
- Schonlau, M., & Zou, R. Y. (2020). The random forest algorithm for statistical learning. *The Stata Journal: Promoting Communications on Statistics and Stata*, 20(1), 3-29.
- Shreyas, S. (2021). Design and Development of IIoT Dashboard for Overall Equipment Effectiveness Monitoring of CNC Machine Tools. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 9(12), 1603–1612.
- Vemula, S. R., & Moraes, M. (2024). Learning Analytics Dashboards for Advisors — A Systematic Literature Review (arXiv:2402.01671).
- สุกัญญา ประมงค์กิจ. (2562) การวิเคราะห์ข้อมูลของผู้สมัครที่เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยบูรพา ด้วยระบบ TCAS โดยใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติ (รายงานการวิจัย). สำนักคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- สำนักข่าวอินโฟเควสท์. (2566). มหาวิทยาลัยไทยเจอปัญหาขาดคนเรียน ผู้เชี่ยวชาญชี้อัตราเกิดต่ำเป็นเหตุ. สืบค้นเมื่อ 10 ธันวาคม 2568, จาก <https://www.infoquest.co.th/2023/313112#:~:text=200>

ประวัติผู้เขียนบทความ



รองศาสตราจารย์ชาญชัย ศุภอรณกร อาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร
วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
โทรศัพท์ 08-1853-0650
E-mail: chanchai.s@ubu.ac.th



นางสาวสุวลักษณ์ นามแสง นักศึกษาระดับปริญญาตรี
หลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
โทรศัพท์ 08-18531-1770
E-mail: suvalak.na.65@ubu.ac.th

การพัฒนาแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม โดยใช้แนวคิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์

Development of a Transmedia Storytelling Model using Augmented Reality Technology with the Concept of Human-Computer Interaction

ทิพย์มณฑา ผกาแก้ว¹ และสมใจ จิตค้ำนึ่งสุข²

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาเทคโนโลยีดิจิทัล มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต, thipmonta.p@pkr.ac.th

² คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาเทคโนโลยีดิจิทัล มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต, somjai.j@pkr.ac.th

Thipmonta pakakeaw¹ and Somjai Jitkamnuengsook²

¹ Faculty of Science and Technology, Digital Technology Department, Phuket Rajabhat University, thipmonta.p@pkr.ac.th

² Faculty of Science and Technology, Digital Technology Department, Phuket Rajabhat University, somjai.j@pkr.ac.th

วันที่รับบทความ 24 ธันวาคม 2569

วันแก้ไขบทความ 16 มกราคม 2570

วันตอบรับบทความ 29 เมษายน 2570

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตลักษณ์ของจังหวัดภูเก็ตโดยใช้ชุมชนเป็นฐาน เพื่อนำไปสู่การพัฒนาแนวทางการส่งเสริมการท่องเที่ยววิถีถิ่นผ่านผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่สะท้อนอัตลักษณ์ภูเก็ต ควบคู่กับการออกแบบและพัฒนาแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อที่บูรณาการอยู่ในผลิตภัณฑ์ดังกล่าวด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม โดยมุ่งประเมินประสิทธิภาพทางเทคนิคและความพึงพอใจของผู้ใช้ต่อระบบที่พัฒนาขึ้น การวิจัยนี้ใช้แนวทางวิจัยเชิงออกแบบภายใต้กรอบแนวคิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ ซึ่งบูรณาการเทคนิคการรู้จำภาพแบบ Feature-based Image Matching ร่วมกับกลไกฐานกฎ และรองรับการทำงานบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์และเว็บแอปพลิเคชันความจริงเสริม ผลการประเมินประสิทธิภาพเชิงเทคนิคพบว่า ระบบมีค่า End-to-End Latency เฉลี่ย 140 มิลลิวินาที อัตราการแสดงผลภาพเฉลี่ย 58 เฟรมต่อวินาที ความคลาดเคลื่อนของการติดตามวัตถุเฉลี่ย 1.2 มิลลิเมตร และระยะเวลาในการรู้จำภาพเฉลี่ย 0.55 วินาที สะท้อนถึงเสถียรภาพและความพร้อมใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง ผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 6 คน พบว่ามีความเหมาะสมด้านเนื้อหา ($M = 4.83$, $SD = 0.28$) และด้านเทคโนโลยี ($M = 4.92$, $SD = 0.54$) อยู่ในระดับสูง การทดลองใช้กับกลุ่มตัวอย่าง 100 คน มีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับสูง ($M = 4.62$, $SD = 0.51$) และมีคะแนน System Usability Scale (SUS) เท่ากับ 90.50 อยู่ในระดับดีเยี่ยม ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม ที่เสนอมานั้นมีประสิทธิภาพทางเทคนิคที่น่าเชื่อถือใช้งานได้ดีในสภาพแวดล้อมจริงแสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติเพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยวและสนับสนุนผลิตภัณฑ์ชุมชนที่สะท้อนถึงเอกลักษณ์ของท้องถิ่นผ่านสื่อดิจิทัลเชิงโต้ตอบ

คำสำคัญ: ปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์, การเล่าเรื่องแบบข้ามสื่อ, เทคโนโลยีความจริงเสริม, อัตลักษณ์ท้องถิ่น, ผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก

ABSTRACT

This research aims to examine Phuket's community-based cultural identity in order to develop guidelines for promoting local tourism through identity-driven souvenir products, alongside the design and development of a transmedia storytelling model embedded within these products using Augmented Reality (AR) technology, with an emphasis on evaluating the technical performance and user satisfaction of the developed system. The study adopts a Design-Based Research (DBR) approach grounded in Human-Computer Interaction (HCI) principles, integrating feature-based image matching for object recognition with rule-based logic mechanisms, and supporting implementation on Android and web-based AR platforms. Technical evaluation indicates that the model achieves an average end-to-end latency of 140 milliseconds, a rendering rate of 58 frames per second (FPS), a mean object-tracking error of 1.2 millimeters, and an average image recognition time of 0.55 seconds, demonstrating operational stability in real-world environments. Expert validation conducted with six specialists in content and information technology revealed high content validity ($M = 4.83$, $SD = 0.28$) and technical appropriateness ($M = 4.92$, $SD = 0.54$). Field testing with 100 participants showed high overall satisfaction ($M = 4.62$, $SD = 0.51$), and the System Usability Scale (SUS) score of 90.50 indicates excellent usability. The findings indicate that the proposed AR-based transmedia storytelling model achieves reliable technical performance and satisfactory usability in real-world conditions. The developed system demonstrates practical applicability for supporting community-based tourism through interactive digital media integration.

KEYWORDS: Human-Computer Interaction, Transmedia Storytelling, Augmented Reality, Local Identity, Souvenir Products

1. บทนำ

การรับรู้และการสื่อสารเป็นปัจจัยเสริมโอกาสทางเศรษฐกิจด้านธุรกิจการท่องเที่ยว การนำเทคโนโลยีความจริงเสมือนมาสนับสนุนเพื่อให้กลุ่มผู้สนใจเกิดประสบการณ์ใหม่ ช่วยเสริมแรงขับเคลื่อนการท่องเที่ยว ซึ่งสอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 13 (พ.ศ. 2566 - 2570) หมวดหน้าที่ 6 ไทยเป็นศูนย์กลางด้านดิจิทัลและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะของอาเซียน เชื่อมโยงกับกลยุทธ์การพัฒนาการเป็นเมืองที่สร้างมูลค่าเพิ่มจากดิจิทัลเทคโนโลยี (Smart City) การพัฒนาภาคการท่องเที่ยวสอดคล้องกับแผนงานพัฒนาภูเก็ตให้เป็นเมือง Smart City สร้างการรับรู้ผลิตภัณฑ์ OTOP ส่งเสริมการท่องเที่ยว และสอดคล้องกับแผนงานพัฒนาคูณภูเก็ตให้เป็นคนคุณภาพ พัฒนา ต่อยอด สร้างนวัตกรรมผลิตภัณฑ์ชุมชนสู่อัตลักษณ์ภูเก็ต เพิ่มมูลค่าทางการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม ส่งเสริมการสร้างผลิตภัณฑ์ชุมชนต้นแบบด้วยนวัตกรรมเทคโนโลยีสู่อัตลักษณ์ภูเก็ต มาเป็นสิ่งจูงใจเพื่อดึงดูดนักท่องเที่ยวให้เพิ่มมากขึ้น โดยใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีดิจิทัล สร้างฐานให้ชุมชนมีความรักในท้องถิ่นและรักษาวัฒนธรรมของตนเอง และการนำประสบการณ์ความรู้จากการพักผ่อนมาปรับประยุกต์ในชีวิต การท่องเที่ยวเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาลักษณะการท่องเที่ยวที่เรียนรู้ประสบการณ์ด้วยตนเอง (First experience)

จากการศึกษาการสร้างการรับรู้อัตลักษณ์วิถีถิ่นภูเก็ตสามารถสร้างมาจากประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก ผ้าปาเต๊ะ ผ้าบาติก ภาพวาดจิตรกรรมตามสถานที่ท่องเที่ยวทางธรรมชาติและวัฒนธรรม ภาพข้อความบนบรรจุภัณฑ์ตราสัญลักษณ์(วสันต์ จันทร์ประสิทธิ์และอรไท ครุฑเวช, 2563) ควบคู่กับการรับรู้อัตลักษณ์วิถีถิ่นภูเก็ตและสามารถให้ข้อมูลที่ตรงประเด็นและน่าเชื่อถือ เพื่อทำให้เกิดความน่าเชื่อถือด้านแหล่งข้อมูลและบุคคล (ชานาญ ปานาวงษ์, 2563) ด้วยวิธีการเจาะจง (Purposive sampling) (สุภางค์ จันทรวานิช, 2556) ศึกษาข้อมูลพื้นฐานอัตลักษณ์ภูเก็ต โดยใช้ชุมชนเป็นฐานเพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยววัฒนธรรมวิถีถิ่นภูเก็ต ได้แก่ ผู้นำชุมชน ประชาชนชุมชน ผู้แทนจากหน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชน ในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต สอดคล้องกับการเล่าเรื่องผ่านผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกชุมชนภูเก็ต โดยนำหลักการเล่าเรื่องข้ามสื่อมาใช้ ซึ่งขั้นตอนการทำงานในส่วนของการพัฒนาฐานสมีเดียมีองค์ประกอบสำคัญดังนี้ 1) เรื่องเล่า ตัวละครหรือตัวแสดงการเล่าเรื่อง สถานที่ โครงเรื่อง 2) ประสบการณ์ เวลา แพลตฟอร์ม จำแนก สื่อ เทคโนโลยีและลักษณะทางกายภาพ โดยการ

เข้าถึงตำแหน่งการข้ามสื่อด้วยออนไลน์ ออฟไลน์ และทางภูมิศาสตร์ อาศัยตัวกลางในการประสานกับผู้ใช้ทำให้สามารถโต้ตอบ มีส่วนร่วมและส่งผลต่อการรับรู้การเล่าเรื่องความเข้าใจด้านวิทยาศาสตร์เชิงคอมพิวเตอร์ สามารถสรุปแนวทางการเล่าเรื่องได้ 5 ประเด็นได้แก่ Narrative extraction, Story evolution, Narrative generation, Evolution และ Open resources โดยการใช้ทรัพยากรและชุดข้อมูล เช่น การรับรู้ข้อมูลเอนิตีของชุดข้อมูลด้วยการรวมป้ายกำกับเอนิตีเฉพาะโดเมนที่ไม่ซ้ำ เพื่อนำเสนอเรื่องราว การใช้เครื่องมือให้เหมาะสมนำมาประยุกต์ใช้กับการเล่าเรื่องสำหรับการรับรู้วิถีถิ่นผ่านผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม โดยผสมผสานของจริงและของเสมือนเข้าด้วยกัน สามารถตอบสนองได้ทันที แสดงผลในรูปแบบสามมิติ ภาพวิดีโอ ระบบเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมที่สมบูรณ์ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ 1) อุปกรณ์ Tracking 2) การ Registration 3) ส่วนแสดงผล และ 4) ฐานข้อมูลเก็บข้อมูลของโลกจริงและโลกเสริม (Spatial Model) (พรชัย เตชะธนเศรษฐ์และคณะ, 2562; Schmalstieg & Hollerer, 2016) โดยนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ทั้งในด้านการศึกษา (Barrow et al., 2019) ด้านการท่องเที่ยวส่งเสริมโดยนำเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมและการใช้เทคโนโลยีเสมือนจริง (Kalafati Eleni Maria, 2020; ดวงจันทร์ สีหาราชและคณะ, 2563) การพัฒนาเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมควบคู่กับการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ ด้วยการปฏิสัมพันธ์เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานของผู้ใช้ที่เกิดจากการพิมพ์ สัมผัส หน้าจอ สั่งงานด้วยเสียง ไปสู่กริยาท่าทาง จึงเกิดความจำเป็นการสั่งงานโดยการสื่อสารระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ ซึ่งต้องคำนึงถึงการบริหารทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดบนอุปกรณ์สมาร์ตโฟนหรือเครื่องคอมพิวเตอร์ (Damla Aslan et al., 2019; โกสินทร์ จ่านไทย, 2566) โดยเชื่อมโยงกับการเล่าเรื่องข้ามสื่อ อาศัยการรู้จำภาพสอดคล้องกับการสร้างการรับรู้ด้วยเงื่อนไขโดยวิธีการนำกรอบแนวคิดระบบฐานกฎ (Rule base system) มานำเสนอให้สอดคล้องกับการเล่าเรื่องข้ามสื่อ (Seung-Bo Park, 2021)

โดยสรุปแม้งานวิจัยที่ผ่านมาได้สร้างองค์ความรู้ที่สำคัญเกี่ยวกับการสื่อสารอัตลักษณ์ท้องถิ่น การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม และแนวคิดการเล่าเรื่องข้ามสื่อในมิติต่าง ๆ แต่ยังขาดกรอบแบบจำลองเชิงบูรณาการที่เชื่อมโยงองค์ความรู้ชุมชน อัตลักษณ์ผลิตภัณฑ์ โครงสร้างเรื่องเล่า กลไกการรู้จำภาพ และหลักการปฏิสัมพันธ์มนุษย์คอมพิวเตอร์เข้าไว้ในระบบเดียวอย่างเป็นตรรกะและตรวจสอบได้ งานวิจัยนี้จึงพัฒนาแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมภายใต้กรอบ HCI ที่ออกแบบกลไกปฏิสัมพันธ์ให้สอดคล้องทั้งบริบททางวัฒนธรรมและข้อจำกัดเชิงเทคนิคของอุปกรณ์ เพื่อสนับสนุนประสบการณ์การรับรู้แบบ first experience อย่างมีโครงสร้าง ชัดเจน และประเมินผลได้เชิงวิชาการ อันเป็นการเติมเต็มช่องว่างเชิงแนวคิดและเชิงระบบในงานวิจัยด้านการยกระดับอัตลักษณ์วิถีถิ่นผ่านสื่อดิจิทัลร่วมสมัย โดยเฉพาะในบริบทผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกอัตลักษณ์ภูเก็ตเพื่อการส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมอย่างยั่งยืน

โดยมีวัตถุประสงค์การวิจัยดังนี้ 1) ศึกษาอัตลักษณ์ภูเก็ตโดยใช้ชุมชนเป็นฐาน เพื่อพัฒนาแนวทางส่งเสริมการท่องเที่ยววิถีถิ่นผ่านผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกอัตลักษณ์ภูเก็ต 2) เพื่อพัฒนาแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม โดยประยุกต์แนวคิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ สำหรับผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกอัตลักษณ์วิถีถิ่นภูเก็ต และ 3) เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจของผู้ใช้ต่อแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม ในการสร้างการรับรู้อัตลักษณ์วิถีถิ่นภูเก็ตและสนับสนุนการท่องเที่ยว

2. ระเบียบวิธีวิจัย (Methodology)

งานวิจัยนี้ใช้กรอบแนวคิดการวิจัยเชิงออกแบบ (Design-Based Research: DBR) ซึ่งมุ่งพัฒนาและทดสอบนวัตกรรมในบริบทจริงควบคู่กับการสร้างองค์ความรู้เชิงทฤษฎี (Reeves, 2006) ซึ่งประกอบด้วย 1) การวิเคราะห์ปัญหาเชิงปฏิบัติร่วมกันระหว่างนักวิจัยและผู้มีส่วนร่วมปฏิบัติ 2) การพัฒนาแนวทางแก้ไขที่ตั้งอยู่บนฐานทฤษฎีและหลักการออกแบบ 3) การทดสอบและปรับปรุงแบบวนซ้ำในสภาพแวดล้อมจริงและ 4) การสะท้อนผลเพื่อสังเคราะห์หลักการออกแบบและองค์ความรู้ใหม่ ผู้วิจัยได้ดำเนินการดังต่อไปนี้

2.1 แนวคิดการพัฒนาแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริมภายใต้กรอบ Design-Based Research

กรอบแนวคิดการวิจัยเชิงออกแบบ (Design-Based Research: DBR) การพัฒนาแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม โดยใช้แนวคิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกระบุอัตลักษณ์วิถีถิ่นภูเก็ต ได้ดำเนินการตาม 4 ระยะสำคัญ ดังนี้



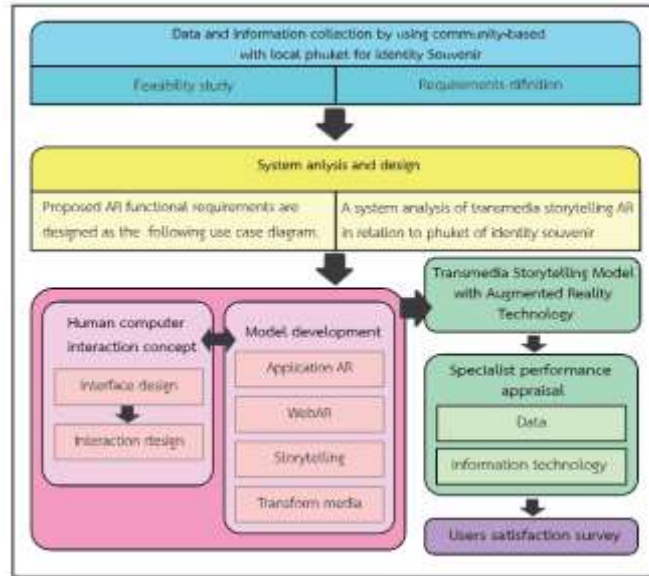
รูปที่ 1 แผนภาพการจัดแนวกระบวนการวิจัยเชิงออกแบบ (DBR) สำหรับการพัฒนาแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม

ระยะที่ 1 การวิเคราะห์ปัญหาเชิงปฏิบัติ (Analysis of Practical Problems)

ผู้วิจัยศึกษาข้อมูลพื้นฐานอัตลักษณ์ที่เกิดโดยชุมชนเป็นฐาน เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยววิถีถิ่นผ่านผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่สะท้อนอัตลักษณ์ท้องถิ่น โดยศึกษาความเป็นไปได้จากข้อมูลผลิตภัณฑ์วิถีถิ่นที่เกิดขึ้นและสถานที่ท่องเที่ยวที่มีความสอดคล้องกับการเล่าเรื่อง และวิเคราะห์ศักยภาพในการนำเสนอเรื่องราวผ่านเทคโนโลยีความจริงเสริม ผลการวิเคราะห์ในระยะนี้นำไปสู่การกำหนดกรอบแนวคิดการพัฒนาแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 1

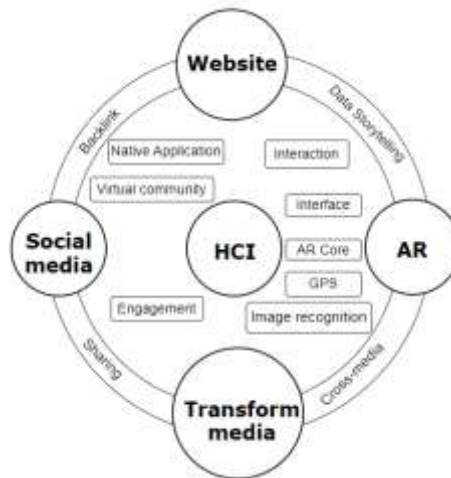
ระยะที่ 2 การพัฒนาแนวทางแก้ไขบนฐานทฤษฎี (Development of Theory-Informed Solutions)

จากผลการวิเคราะห์ ผู้วิจัยดำเนินการวิเคราะห์และออกแบบระบบ (System Analysis and Design) โดยเก็บรวบรวมข้อมูลและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง และนำมาวิเคราะห์ด้วย Use Case Diagram (Robert C. Martin, 2014) เพื่ออธิบายปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้งานกับสภาพแวดล้อมของระบบ รวมถึงกระบวนการทำงานของแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม การออกแบบดังกล่าวตั้งอยู่บนแนวคิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ โดยคำนึงถึงผู้ใช้เป็นศูนย์กลาง เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน การเข้าถึงข้อมูล และรองรับช่องทางการสื่อสารที่หลากหลาย ดังแสดงในรูปที่ 2 กระบวนการออกแบบประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ 1) การออกแบบเรื่องเล่า 2) การออกแบบปฏิสัมพันธ์ และ 3) การเผยแพร่สื่อข้อมูลบนหลายแพลตฟอร์ม การออกแบบส่วนต่อประสานการใช้งาน แบ่งเป็นแอปพลิเคชันความจริงเสริม (Application AR) และเว็บแอปพลิเคชันความจริงเสริม (Web AR) การออกแบบการปฏิสัมพันธ์สำหรับการจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อ และการออกแบบส่วนประสานผู้ใช้สำหรับสร้างการรับรู้เรื่องราวอัตลักษณ์วิถีถิ่นที่เกิดขึ้นผ่านผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก (Alan Dennis, Barbara Haley Wixom, and Roberta Roth, 2021; D. Santano and H. Thwaites, 2018) โดยประยุกต์ใช้กรอบแนวคิดระบบฐานกฎตามเงื่อนไขการรับภาพของกล้องสมาร์ทโฟนและเว็บแคม เพื่อให้การเล่าเรื่องสอดคล้องกับข้อมูลผลิตภัณฑ์และเชื่อมโยงไปยังผู้จำหน่ายท้องถิ่นต่อนั้นได้พัฒนาโมเดลเพื่อรองรับการทำงานบนแพลตฟอร์มเทคโนโลยีความจริงเสริม ทั้งในรูปแบบ Application AR และ Web AR เพื่อสนับสนุนการนำเสนอการเล่าเรื่องข้ามสื่ออย่างครบถ้วนบนอุปกรณ์ของผู้ใช้



รูปที่ 2 แผนภาพกระบวนการพัฒนาแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม

จากการนำแนวคิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์มาใช้ในการพัฒนาโมเดลดังนี้จากการศึกษาข้อมูลเชิงลึกจากการสัมภาษณ์ข้อมูลพื้นฐานอัตลักษณ์ภูเก็ต โดยใช้ชุมชนเป็นฐานเพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยววิถีถิ่นภูเก็ตด้วยผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกระบุอัตลักษณ์ภูเก็ต โดยมีองค์ประกอบหลักที่เป็นศูนย์กลางด้วยแนวคิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ โดยคำนึงถึงผู้ใช้เป็นหลักให้ง่ายต่อการใช้งานแบบจำลอง การเข้าถึงข้อมูลและช่องทางที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 3 แนวคิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์แบบมีส่วนร่วมพัฒนา

จากการศึกษาแนวคิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ (Ben Shneiderman and et al, 2018; Helen Sharp and et al, 2019) การออกแบบมี 2 ขั้นตอนดังนี้

1) การออกแบบส่วนต่อประสานการใช้ จำแนกเป็นส่วนแอปพลิเคชันเทคโนโลยีความจริงเสริม และเว็บแอปพลิเคชันเทคโนโลยีความจริงเสริม

2) การออกแบบการปฏิสัมพันธ์การใช้งานแอปพลิเคชันส่วนที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อและการออกแบบส่วนประสานผู้ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองเพื่อสร้างการรับรู้การเล่าเรื่องอัตลักษณ์วิถีถิ่นภูเก็ตผ่านผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก นำกรอบแนวคิดระบบฐานกฎหมายประยุกต์ใช้ตามเงื่อนไขการรับภาพของกล้องสมาร์ทโฟน และกล้องเว็บแคม โดยคำนึงถึงการเล่าเรื่องที่สอดคล้องกับข้อมูลผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกเชื่อมโยงต่อไปยังผู้จำหน่ายของท้องถิ่น และข้อมูลผลิตภัณฑ์

พัฒนาโมเดลสำหรับรองรับการทำงานบนแพลตฟอร์มด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม ประกอบด้วยแอปพลิเคชันความจริงเสริม (Application AR) และเว็บแอปพลิเคชันความจริงเสริม (Web AR) เพื่อให้รองรับการนำเสนอการเล่าเรื่องข้ามสื่อและจัดเก็บข้อมูลเชื่อมโยงกับช่องทางโซเชียลมีเดีย เว็บไซต์เจ้าของผลิตภัณฑ์

ระยะที่ 3 การทดสอบและปรับปรุงแบบวนซ้ำในบริบทจริง (Iterative Testing and Refinement in Practice) กำหนดการทดสอบแบบจำลองโดยทดสอบโครงสร้างข้อมูลการจัดการกฎการเล่าเรื่องที่ใช้แบบจำลอง ต่อมาทดสอบวัดประสิทธิภาพเชิงเทคนิคของระบบได้รับการประเมินผ่านตัวชี้วัดเชิงเทคนิคตามเกณฑ์มาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัย AR และ XR ปัจจุบัน ได้แก่ Latency, Tracking Accuracy, Frame Rate และ Image Recognition Time ก่อนนำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รับการประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ 2 ด้าน ได้แก่ ด้านเนื้อหา ด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ ผลการประเมินถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงองค์ประกอบของระบบ ก่อนนำไปทดลองใช้กับกลุ่มผู้ใช้จริง เพื่อประเมินความพึงพอใจและการยอมรับระบบตามแนวคิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวเป็นการทดสอบและปรับปรุงแบบวนซ้ำในสภาพแวดล้อมการใช้งานจริง

ผู้วิจัยพัฒนาและตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือ ดังนี้ 1) ดัชนีความสอดคล้องของเนื้อหา (Index of Item-Objective Congruence: IOC) แบบสอบถามด้านการประเมินประสบการณ์ผู้ใช้และการปฏิสัมพันธ์ในระบบความจริงเสริม (AR) ได้รับการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้เชี่ยวชาญด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ (HCI) และเทคโนโลยีสื่อดิจิทัล จำนวน 3 คน โดยคำนวณค่าดัชนีความสอดคล้องของเนื้อหา ผลการประเมินพบว่าค่า IOC ของข้อคำถามอยู่ในช่วง 0.67–1.00 สะท้อนว่าข้อคำถามมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การวิจัยและกรอบแนวคิดด้าน HCI สามารถนำไปใช้ในการเก็บข้อมูลได้ 2) ผู้วิจัยประเมินความตรงเชิงเนื้อหาของเครื่องมือวัด โดยใช้ดัชนีความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity Index: CVI) จากผู้เชี่ยวชาญชุดเดียวกัน โดยพิจารณาทั้งในระดับรายข้อ (Item-level CVI: I-CVI) และระดับทั้งฉบับ (Scale-level CVI: S-CVI) เพื่อยืนยันความครอบคลุมของมิติการใช้งานระบบ AR และประสบการณ์ผู้ใช้ ผลการวิเคราะห์พบว่า I-CVI มีค่าอยู่ระหว่าง 0.83–1.00 และค่า S-CVI เท่ากับ 0.94 แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือมีความตรงเชิงเนื้อหาในระดับสูง ครอบคลุมองค์ประกอบสำคัญของการประเมินระบบตามหลัก HCI และเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในบริบทการวิจัย และ 3) ค่าความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม (Cronbach's alpha) ผู้วิจัยทดสอบความเชื่อมั่นของแบบสอบถามกับกลุ่มตัวอย่างนำร่อง จำนวน 30 คน ซึ่งเป็นผู้ใช้งานระบบ AR โดยคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's alpha) เพื่อประเมินความสอดคล้องภายในของรายการคำถามในแต่ละมิติ ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบสอบถามมีค่า Cronbach's alpha เท่ากับ 0.89 สะท้อนถึงระดับความเชื่อมั่นที่สูง แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือมีความสม่ำเสมอภายในดี และสามารถนำไปใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล

ระยะที่ 4 การสะท้อนผลและสังเคราะห์องค์ความรู้ (Reflection to Produce Design Principles) ผลจากการวิเคราะห์ การพัฒนา และการทดสอบแบบจำลอง ถูกนำมาสังเคราะห์เพื่อพัฒนาเป็นหลักการออกแบบสำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีความจริงเสริมในการเล่าเรื่องข้ามสื่อเพื่อส่งเสริมอัตลักษณ์ท้องถิ่น ซึ่งก่อให้เกิดองค์ความรู้เชิงออกแบบที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในบริบทการท่องเที่ยวและผลิตภัณฑ์ชุมชนอื่นได้

2.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

2.2.1 การวิจัยศึกษาข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยศึกษาผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกระบุอัตลักษณ์วิถีถิ่นภูเก็ต รวบรวมข้อมูลและสารสนเทศนำมาวิเคราะห์บริบทของผลิตภัณฑ์ โดยการศึกษาข้อมูลเชิงลึกด้วยวิธีการสัมภาษณ์ ดังนี้

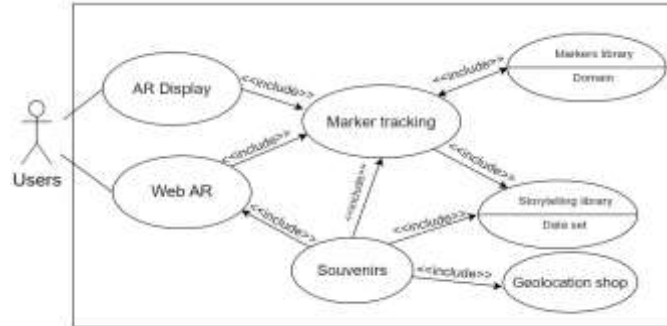
1) กลุ่มผู้นำชุมชน หน่วยงานราชการ และ ราษฎรชาวบ้าน จำนวน 12 คน พบว่า ข้อมูลผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกท้องถิ่นภูเก็ต สามารถจำแนกแหล่งที่มาของผลิตภัณฑ์ ดังนี้ (1) กลุ่มประกอบการวิสาหกิจชุมชนจัดตั้งขึ้นเพื่อจัดทำผลิตภัณฑ์และกำหนดช่องทางในการจำหน่าย ผ่านหน้าร้านของสำนักงานวิสาหกิจชุมชน โดยมีหัวหน้ากลุ่มเป็นผู้ประสานงาน (2) กลุ่มหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ (OTOP) ผู้รับผิดชอบหลักคือสำนักงานพัฒนาชุมชนจังหวัดภูเก็ต มีหน่วยประสานงานย่อย 3 อำเภอ คืออำเภอเมืองภูเก็ต อำเภอเกาะภูเก็ต และอำเภอถลาง (3) ธุรกิจส่วนตัว โดยรับจากผู้ผลิตหรือนำเข้าผลิตภัณฑ์มาสร้างแบรนด์ผลิตภัณฑ์เพื่อจำหน่าย

2) กลุ่มผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก 15 คน ประกอบด้วย อำเภอเกาะภูเก็ต 5 คน อำเภอถลาง 6 คน และ อำเภอเมืองภูเก็ต 4 คน จำแนกกลุ่มผลิตภัณฑ์ ดังนี้ (1) เสื้อผ้า 7 ผลิตภัณฑ์ (2) อาหาร 9 ผลิตภัณฑ์ (3) ของใช้ 12 ผลิตภัณฑ์ และ (4) เครื่องประดับ 1 ผลิตภัณฑ์

2.2.2 การวิเคราะห์และออกแบบระบบ

จากการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้อง รวบรวมข้อมูลเชิงลึกด้วยวิธีการสัมภาษณ์ เพื่อพัฒนาแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม โดยใช้แนวคิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ มีกระบวนการวิเคราะห์และออกแบบระบบดังนี้

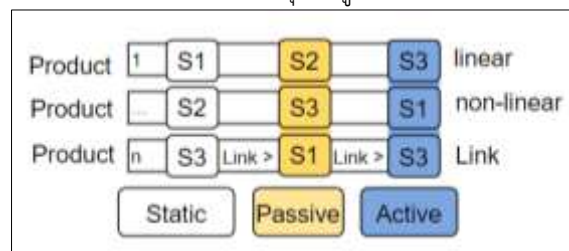
- 1) การวิเคราะห์กระบวนการทำงานเทคโนโลยีความจริงเสริม ด้วย Use case diagram



รูปที่ 4 Use case diagram จำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมผ่านผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก

จากรูปที่ 4 ผู้ใช้สามารถใช้เทคโนโลยีความจริงเสริมสำหรับการเล่าเรื่องข้ามสื่อผ่าน Application AR และ Web AR อธิบายหลักการทำงานของ Use case ได้ดังนี้ 1) Use case Storytelling library การเรียกใช้ไลบรารีของการเล่าเรื่องผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกรูปแบบสื่อผสม (Moving picture export group) กำหนดชุดข้อมูล (Dataset) ซึ่งรองรับการแสดงผลด้วยอุปกรณ์สมาร์ทโฟนและการใช้งานผ่านเบราว์เซอร์ 2) Use case Marker library เรียกใช้งานไลบรารีโดยจำแนก Marker ตาม Domain 3) Use case souvenirs ข้อมูลผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก 4) Use case marker tracking กระบวนการ Data matching รูปแบบ Feature-based image matching เพื่ออ้างอิงข้อมูลจาก Use case Storytelling library, Use case Marker library และ Use case Souvenirs 5) Use case Geolocation shop ข้อมูลผู้จำหน่ายผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกระบุตำแหน่งหน้าร้าน 6) Use case AR Display ผู้ใช้งานสามารถใช้งานแอปพลิเคชันความจริงเสริม และ 7) Use case Web AR ผู้ใช้งานสามารถใช้งานเว็บแอปพลิเคชันความจริงเสริม

2) การเล่าเรื่องวิถีถิ่นเกิดรูปแบบทรานส์มีเดีย ผู้วิจัยศึกษาเกี่ยวกับการเล่าเรื่องข้ามสื่อ (Transmedia) เพื่อให้ดึงดูดความสนใจของผู้ใช้สื่อให้รู้สึกผูกพันร่วม (Engage) กับโลกของการเล่าเรื่อง โดยการออกแบบเรื่องเล่าย่อยในแต่ละแพลตฟอร์มจะใช้สื่อแต่ละแพลตฟอร์มให้เกิดประโยชน์ (Henry Jenkins, 2006) การเล่าเรื่องบนแพลตฟอร์มโดยใช้รูปแบบการนำทาง(Navigational) ด้วยการเล่าเรื่องฉากย่อย (Subscenes) เป็นชุดข้อมูลเมตาดาตาการเล่าเรื่อง (Metadata storytelling)



รูปที่ 5 แบบจำลองรูปแบบการเล่าเรื่องและชุดข้อมูลการเล่าเรื่อง

รูปที่ 5 แสดงการทำงานของการทำงานการกำหนดเส้นทางด้วยกระบวนการเล่าเรื่องของผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกด้วยการลำดับฉากย่อยจากข้อมูลเมตาดาตาการเล่าเรื่อง โดยแทนค่า P = Product และ S = Story elements กำหนดให้ $P_{1..n}$ เป็นผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่ระบุอัตลักษณ์วิถีถิ่นเกิด และกำหนดชุดข้อมูลเมตาดาตาการเล่าเรื่องข้ามสื่อรูปแบบสื่อวิถีทัศน์ประกอบด้วยเส้นทางการเล่าเรื่องจากข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญด้านการเล่าเรื่องให้พิจารณาจากผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่มีความอัตลักษณ์เกิด ดังนี้ S1 = ความเป็นมาที่เป็นส่วนหนึ่งในวิถีท้องถิ่นเกิด S2 = กระบวนการขั้นตอนที่เป็นเอกลักษณ์และ/หรือ S3 = อัตลักษณ์เด่นของผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก โดยระบุความสัมพันธ์ของป้ายกำกับข้อมูลผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกและชุดข้อมูลสื่อวิถีทัศน์เรื่องเล่าข้ามสื่อ เพื่อสร้างประสบการณ์ในการรับรู้ และกำหนดการเล่าเรื่อง (Narrative) 3 รูปแบบ ดังนี้

1) การเล่าเรื่องแบบลำดับ (Linear narrative) 2) การเล่าเรื่องแบบไม่ลำดับ (Nonlinear narrative) และ 3) การเล่าเรื่องแบบเชื่อมโยง (Link narrative)

โดยสร้างชุดข้อมูล (Library) กำหนดให้มีฉากย่อยเพื่อให้สามารถดึงข้อมูลแสดงผลข้ามสื่อได้รวดเร็วขึ้น กำหนดลำดับการแสดงผล ดังนี้ 1) Static การแสดงผลการเล่าเรื่องสื่อดิจิทัลนำเสนอบนผลิตภัณฑ์หรือกล่องผลิตภัณฑ์ (Traditional media) 2) Passive เรื่องเล่าผ่านโซเชียลมีเดีย การแสดงผลผ่านเว็บแอปพลิเคชัน 3) Active เพื่อให้เกิดการรับรู้ซ้ำๆ ด้วยเรื่องเล่าผ่าน Application AR และ Web AR และสร้างการรับรู้ผ่านผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก โดยให้ผู้ซื้อผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกมีการปฏิสัมพันธ์สั่งซื้อกับผู้ขายผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก

3) การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้แอปพลิเคชันเทคโนโลยีความจริงเสริม

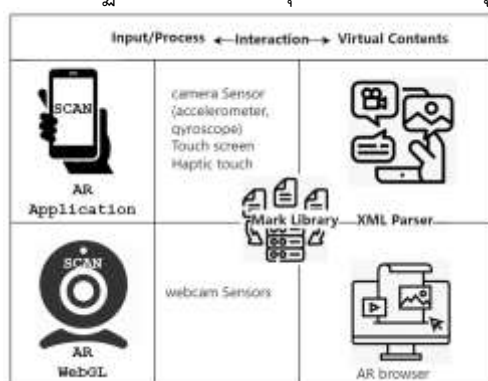


รูปที่ 6 การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้แอปพลิเคชันเทคโนโลยีความจริงเสริม

รูปที่ 5 การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ประกอบด้วย กำหนดปุ่มควบคุมดังนี้ ส่วนที่ 1 หน้าหลัก รูปที่ 4 จำแนกแหล่งเว็บเพจผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก 4 หมวด คือ อาหาร เครื่องแต่งกาย เครื่องประดับ และของใช้ เพื่อเข้าสู่เว็บไซต์ผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกวิถีถิ่นภูเก็ต แสดงตำแหน่งพิกัดร้านค้าผลิตภัณฑ์วิถีถิ่นภูเก็ต ส่วนที่ 2 หน้า AR mode รูปที่ 4 (ค) แสดงผลแบบจำลองเออาร์ ใช้กล้องส่องภาพที่มาร์คเกอร์ผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกด้วยข้อมูลภาพอัตลักษณ์ และตราสัญลักษณ์ผลิตภัณฑ์สำหรับแสดงวิถีทัศน์การเล่าเรื่อง ซึ่งกระบวนการทำงาน AR mode สอดคล้องกับการวิเคราะห์กระบวนการทำงานของเทคโนโลยีความจริงเสริมและกรอบแนวคิดฐานกฎหมายประยุกต์ใช้ร่วมกับการเล่าเรื่องข้ามสื่อ

2.2.3 การออกแบบส่วนปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้

จากการศึกษาแนวคิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ ผู้วิจัยได้ออกแบบส่วนปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้



รูปที่ 7 การปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้กับเทคโนโลยีความจริงเสริม

การออกแบบส่วนปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ในส่วนของการนำเข้าข้อมูล ประมวลผลภาพ และจำลองการแสดงผลข้อมูล 3 องค์ประกอบ ได้แก่ 1) การจัดการข้อมูลสำหรับการแสดงผลเทคโนโลยีความจริงเสริม ภาพ ข้อความ เสียง ภาพเคลื่อนไหว 2) การติดตามวัตถุผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก และ 3) การโต้ตอบความเป็นจริงเสริมแสดงผลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ด้วย ARweb GL และแอป

พลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ โดยใช้สแกนผลิตภัณฑ์เพื่อแสดงผลการเล่าเรื่องสื่อวีดิทัศน์ดิจิทัลและเข้าถึงข้อมูลผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก และส่งข้อมูลผลิตภัณฑ์สามารถติดต่อผู้ผลิตได้โดยตรงผ่านช่องทางโซเชียลมีเดีย

ด้านเทคนิคระบบได้ถูกพัฒนาให้รองรับการทำงานข้ามแพลตฟอร์ม (Cross-platform) ทั้งในรูปแบบ Native Application บนระบบปฏิบัติการ Android และ WebAR เพื่อลดอุปสรรคในการเข้าถึง (Access Barriers) สำหรับนักท่องเที่ยวที่ไม่ต้องการติดตั้งแอปพลิเคชันใหม่ ระบบได้ประมวลผลการจดจำภาพ (Image Recognition) ผ่านระบบคลาวด์ร่วมกับไลบรารี AR Core และ Vuforia Engine เพื่อให้สามารถรองรับชุดข้อมูลของที่ระลึกที่มีความหลากหลายและมีการเพิ่มขึ้นในอนาคต

2.2.4 กระบวนการวิเคราะห์ภาพเทคโนโลยีความจริงเสริม

จากการรวบรวมและสังเคราะห์ข้อมูล นำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ภาพจากบริบทผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกอัตลักษณ์วิถีถิ่น จำแนกการวิเคราะห์ ชุดข้อมูลตัวอย่างอัตลักษณ์วิถีถิ่นถูกเก็บ ประกอบ 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกคือ ชุดข้อมูลประเภทผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย 1) อาหาร 2) เครื่องแต่งกาย 3) เครื่องประดับ และ 4) ของใช้ ส่วนที่สองคือ โดเมนข้อมูลประกอบด้วย สัญลักษณ์ภูเขตกแบรด์ และอัตลักษณ์บนบรรจุภัณฑ์ จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของรูปแบบบรรจุภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก มีลักษณะ 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) บรรจุภัณฑ์กระดาษ 2) บรรจุภัณฑ์พลาสติก และ 3) บรรจุภัณฑ์แก้ว และพบว่า ผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกที่เป็นบรรจุภัณฑ์พลาสติกและบรรจุภัณฑ์แก้ว อาจมีการสูญเสียข้อมูลจากการตกกระทบของแสงจากหลอดไฟหรือแสงจากดวงอาทิตย์บ้างแนวคิดการนำเสนอผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกร่วมกับเทคโนโลยีความจริงเสริม เพื่อดึงดูดความสนใจของกลุ่มนักท่องเที่ยว สร้างประสบการณ์การเข้าถึงข้อมูลและการนำเสนอรูปแบบการเล่าเรื่องด้วยเทคโนโลยี AR ผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกประเภทอัตลักษณ์วิถีถิ่นถูกเก็บ

การวิเคราะห์ภาพต้นแบบเพื่อให้รองรับ AR Engine โดยใช้คุณสมบัติการจดจำภาพ (Image recognition) ตรวจจับวัตถุ (Tracking object) และติดตามภาพจากฮิสโทแกรมระดับสีเทาโดยแสดงมาร์คและค่าเป้าหมายตามอัตลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก ผู้วิจัยยกตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของที่ระลึก 3 ผลิตภัณฑ์ ดังนี้



รูปที่ 8 การวิเคราะห์มาร์คอัตลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกด้วยฮิสโทแกรมระดับสีเทา

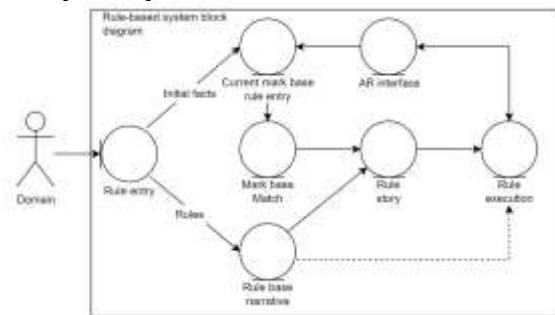
จากรูปที่ 8 การวิเคราะห์มาร์คอัตลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกด้วยฮิสโทแกรมระดับสีเทา โดยการนำสัญลักษณ์ (Marker-based) ของผลิตภัณฑ์ใช้ในการอ้างอิงข้อมูลผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกวิถีถิ่นด้วยกระบวนการ (Structural Similarity Index Measure: SSIM) ได้นำแนวคิดดัชนีความคล้ายคลึงเชิงโครงสร้าง (Structural Similarity Index Measure: SSIM) ในงานวิจัยนี้ถูกนำมาใช้ในฐานะ"กรอบแนวคิดเชิงระบบ" (Conceptual Framework) เพื่ออธิบายความแม่นยำและความเสถียรของการจดจำภาพบนพื้นผิวของที่ระลึกที่มีความซับซ้อน SSIM แตกต่างจากวิธีการวัดข้อผิดพลาดแบบจุดต่อจุด (Pointwise Error) เช่น Mean Squared Error (MSE) เพราะ SSIM มุ่งเน้นไปที่การรักษาสารสนเทศเชิงโครงสร้างที่มนุษย์รับรู้ได้จริงในเชิงคณิตศาสตร์ SSIM ของภาพสองภาพ X และ y ถูกกำหนดโดยการเปรียบเทียบองค์ประกอบสามประการ ได้แก่ ความสว่าง (Luminance: l) ความเปรียบต่าง (Contrast: C) และโครงสร้าง (Structure: S) ดังนี้

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma$$

โดยที่สูตรคำนวณเมื่อกำหนดให้ $\alpha, \beta, \gamma = 1$ คือ

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}$$

ในการวิจัยนี้ SSIM ถูกใช้เพื่ออธิบายข้อจำกัดเชิงเทคนิคที่พบในขั้นตอนการดำเนินการ อาทิ ผลกระทบที่มีบรรจุภัณฑ์พลาสติกหรือแก้ว อาทิ ซีอีวูเก้ต มักเกิดการสะท้อนแสง (Specular Reflection) ซึ่งส่งผลให้ค่าความแปรปรวนร่วม (σ_{xy}) ระหว่างภาพอ้างอิงกับภาพที่กล้องรับเข้าลดลง ทำให้ค่า SSIM ต่ำกว่าเกณฑ์ที่ AR Engine จะรับรู้ได้ โดยปกติค่า SSIM ควรเข้าใกล้ 1.0 การระบุปัญหาด้วยกรอบแนวคิด SSIM ช่วยให้การแก้ปัญหาในเชิงวิศวกรรมมีความชัดเจนขึ้น โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้เทคนิค "Feature-based Image Matching" (Karma & Darma, 2025) ร่วมกับการประมวลผลภาพระดับสีเทา (Grayscale Histogram) เพื่อเพิ่มค่าความเปรียบต่างและลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของสีเนื่องจากสภาพแสง อาศัยความสามารถของ AR Engine ในการรู้จำภาพและติดตามวัตถุ (image recognition and tracking) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดมาตรฐานที่ใช้ในการประเมินความคล้ายคลึงของภาพในงานประมวลผลภาพ (Accardi et al., 2025) ทั้งนี้ การใช้ SSIM ในงานวิจัยนี้เป็นการอ้างอิงเชิงแนวคิดเพื่ออธิบายหลักการประเมินความคล้ายคลึงกันระหว่างสองภาพซึ่งค่าที่ได้จากการประมวลผลจะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ด้วยการวิเคราะห์ตำแหน่งมาร์ค โดยใช้ AR Engine นำภาพ RGB แปลงค่าภาพเป็น Gray จากนั้นสร้าง Mark ด้วยสัญลักษณ์ + (K. Komsorn, 2011) ในการแสดงผลความเป็นจริงเสริม โดยกระบวนการรู้จำภาพ การตรวจจับตำแหน่งมาร์คเกอร์ และการติดตามวัตถุ ได้ดำเนินการผ่านกลไกภายในของ AR Engine ซึ่งจัดการการเปรียบเทียบคุณลักษณะของภาพ (feature-based image matching) และการจับคู่ข้อมูลกับชุดข้อมูลอ้างอิงบนระบบคลาวด์โดยอัตโนมัติ ผลลัพธ์จากกระบวนการดังกล่าวถูกนำมาใช้ร่วมกับการออกแบบโครงสร้างเนื้อหาและระบบฐานกฎ (rule-based logic) กำหนดให้มีการเปรียบเทียบ Mark 1..N = Product set metadata แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูล (Relationship) โดยนำระบบฐานกฎมาประยุกต์ (Frühwirth, 2025) ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองการเล่าเรื่องด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Seung-Bo Park เพื่อเลือกและแสดงผลเล่าเรื่องด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมให้สอดคล้องกับอัตลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกวิถีถิ่นภูเก็ต ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 กรอบการนำฐานกฎประยุกต์ใช้ร่วมแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม

กำหนดการอ้างอิงผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกระบุอัตลักษณ์วิถีถิ่นภูเก็ต ระบุโดเมนชุดข้อมูลภาพอัตลักษณ์และตราสัญลักษณ์ผลิตภัณฑ์มีชุดข้อมูลจริงที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับเงื่อนไขโดยกำหนดกฎ ระบุข้อเท็จจริงของกฎ ซึ่งเปรียบเทียบค่ากฎกับค่า Mark base หากมีความสอดคล้องกัน ให้กำหนดเป็นกฎการเล่าเรื่อง (Rule base narrative) โดยแบ่งเป็น 4 หมวด ดังนี้ 1) Food 2) Apparel 3) Accessories และ 4) Utensils items กำหนดให้เปิดการใช้ Rule story และ ดำเนินการตามกฎ (Rule execution) ซึ่งการแสดงผลเทคโนโลยีความจริงเสริมสอดคล้องกับการรับข้อมูลจากผู้ใช้งานผ่านกล้องสมาร์ทโฟน หรือ เว็บแคม ในการรับภาพโดยใช้ข้อมูลภาพอัตลักษณ์ และตราสัญลักษณ์ผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกวิถีถิ่นภูเก็ต ซึ่งเป็นการปฏิสัมพันธ์การแสดงผลข้อมูลอยู่เบื้องหลัง

ระบบฐานกฎ (Rule-based Logic) การปฏิสัมพันธ์ในแบบจำลองกลไก "Match-Execute" ซึ่งทำงานร่วมกับชุดข้อมูลเมทาดาตาของผลิตภัณฑ์ เมื่อเซนเซอร์กล้องตรวจพบมาร์คเกอร์ (Marker) ระบบจะดำเนินการตามลำดับขั้นตอนทางตรรกศาสตร์ดังนี้: $IF(MarkerID==ProductType) \wedge (UserContext==Action) == Active \rightarrow Execute(StorytellingSequence)$

ตารางที่ 1 แสดงโครงสร้างข้อมูลและการจัดการกฎการเล่าเรื่องที่ใช้ในแบบจำลอง

หมวดหมู่ผลิตภัณฑ์ (Domain)	มาร์กเกอร์อัตลักษณ์ (Marker Base)	กฎการเล่าเรื่อง (Rule Narrative)	รูปแบบการสื่อสาร (Communication Mode)
อาหาร (Food)	ตราสัญลักษณ์ภูเก็ตแบรนด์โลโก้ซีวี่	ประวัติกรรมวิธี/ แหล่งที่มาวัตถุดิบ	วิธีทัศนเชิงสารคดีสั้น 2D
เครื่องแต่งกาย (Apparel)	ลวดลายผ้าปาเต๊ะ บาติก	แรงบันดาลใจจาก ลวดลายท้องถิ่น	วิธีทัศนเชิงสารคดีสั้น 2D
เครื่องประดับ (Accessories)	ตราประทับร้านค้าสัญลักษณ์เฉพาะ	ความหมายมงคล และกรรมวิธีผลิต	เสียงบรรยายร่วมกับภาพซ้อนทับ
ของใช้ (Utensils)	ลวดลาย สัญลักษณ์สถาปัตยกรรม	การประยุกต์ใช้วิถี ถิ่นในปัจจุบัน	เว็บแอปพลิเคชันโต้ตอบ (Interactive Web)

การประยุกต์ใช้ระบบฐานกฎ (rule-based system) ทำให้ AR Storytelling Model มีความยืดหยุ่นเชิงบริบท (adaptability) โดยระบบสามารถปรับลำดับการนำเสนอเนื้อหาแบบเชื่อมโยง (linked narrative) ตามประวัติการสแกนและเงื่อนไขการใช้งานของผู้ใช้ เช่น การสแกนผลิตภัณฑ์เดิมในช่วงเวลาที่ต่างกัน หรือการสแกนร่วมกับผลิตภัณฑ์อื่น แผนการเริ่มต้นเนื้อหาซ้ำจากจุดเดิมทุกครั้ง แนวทางดังกล่าวสะท้อนการเปลี่ยนผ่านจากการแสดงผลเชิงเทคโนโลยีไปสู่ระบบปฏิสัมพันธ์ตามหลัก HCI ที่คำนึงถึงความต่อเนื่องทางประสบการณ์ (experiential continuity) และการตอบสนองเชิงบริบทของผู้ใช้

ตารางที่ 2 ตัวชี้วัดประสิทธิภาพเชิงเทคนิคของแบบจำลอง

ตัวชี้วัด (Metric)	เกณฑ์มาตรฐาน (Benchmark)	ผลการทดสอบ (Model performance)	นัยสำคัญเชิง HCI
Latency (End-to-End)	< 150 - 200 ms	เฉลี่ย 140 ms (บน 5G/WiFi)	รักษาสภาพลื่นไหล (Flow)
Tracking Accuracy	< 2 mm drift	1.2 mm บนพื้นผิวไม่สะท้อนแสง	ความแม่นยำในการซ้อนทับและความเชื่อถือของการซ้อนทับภาพ
Frame Rate (FPS)	30 FPS (Min) / 60 FPS (Ideal)	เฉลี่ย 58 FPS (บน Smartphone)	การแสดงผลที่ต่อเนื่อง Visual Continuity ลด cognitive load
Image Recognition Time	< 1.0 s	เฉลี่ย 0.55 s	ความเร็วในการตอบสนองเมื่อผู้ใช้เริ่มปฏิสัมพันธ์ Responsiveness และ Narrative Engagement

จากการวัดประสิทธิภาพเชิงเทคนิคของระบบได้รับการประเมินผ่านตัวชี้วัดเชิงเทคนิคตามเกณฑ์มาตรฐานที่ใช้ในงานวิจัย AR และ XR ปัจจุบัน ได้แก่ Latency, Tracking Accuracy, Frame Rate และ Image Recognition Time โดยค่า End-to-End Latency เฉลี่ยอยู่ที่ 140 มิลลิวินาที ซึ่งต่ำกว่าช่วง 150–200 มิลลิวินาทีที่ถือเป็นระดับเริ่มกระทบต่อการรับรู้ความหน่วงและ immersion (Raaen & Kjellmo, 2015) ค่า tracking drift เฉลี่ย 1.2 มิลลิเมตร ต่ำกว่าระดับที่อาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนเชิงการซ้อนทับภาพตามหลัก spatial registration (Azuma, 1997; Azuma et al., 2001) ค่า Frame Rate เฉลี่ย 58 FPS ใกล้ระดับ 60 FPS ที่เหมาะสมต่อการโต้ตอบแบบ immersive และระยะเวลาการรู้จำภาพ ค่าเฉลี่ย 0.55 วินาที ต่ำกว่าเกณฑ์ 1 วินาทีที่ใช้เป็นจุดอ้างอิงด้าน mobile AR performance ผลลัพธ์ดังกล่าวยืนยันว่าระบบมีสมรรถนะเพียงพอในการรักษาความลื่นไหล ความแม่นยำเชิงพื้นที่ ความเสถียรของการแสดงผล และความรวดเร็วในการตอบสนอง ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำคัญต่อคุณภาพประสบการณ์ผู้ใช้ในระบบ AR เชิงเล่าเรื่องภายใต้กรอบ HCI ร่วมสมัย

3. สถิติที่ใช้ในการวิจัย สถิติที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่ออธิบายแนวโน้มการกระจายของข้อมูลจากแบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Likert Scale) ซึ่งเป็นมาตรวัดเชิงช่วงที่นิยมใช้ในการวิจัยด้านสังคมศาสตร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (Likert, 1932) นอกจากนี้ ใช้สถิติทดสอบสำหรับกลุ่ม

ตัวอย่างที่สัมพันธ์กัน (Dependent Samples t-test) (Cohen, 1988) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญด้านเนื้อหาและด้านเทคโนโลยีเพื่อเปรียบเทียบระบบแบบจำลอง โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ .05 (Field, 2013)

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.51 – 5.00 หมายความว่า ระดับมากที่สุด

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.51 – 4.50 หมายความว่า ระดับมาก

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.51 – 3.50 หมายความว่า ระดับปานกลาง

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.51 – 2.50 หมายความว่า ระดับน้อย

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.01 – 1.50 หมายความว่า ระดับน้อยที่สุด

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิจัย

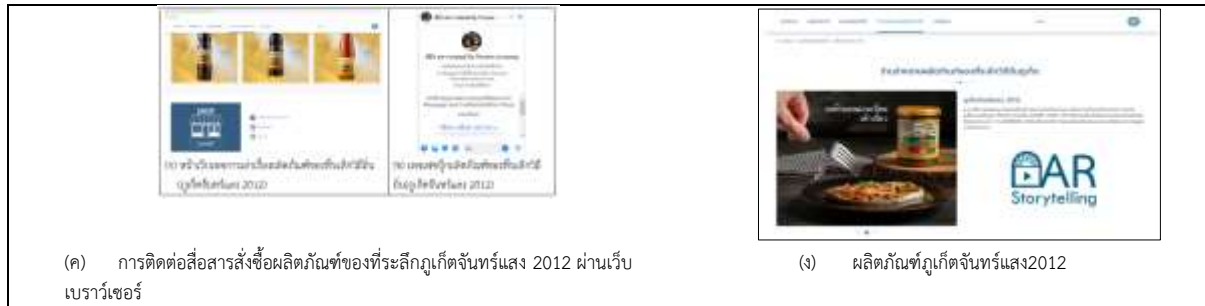
4.1.1 ผลการพัฒนาแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม โดยใช้แนวคิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกระบุอัตลักษณ์วิถีถิ่นภูเก็ต

ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนการวิจัย โดยนำข้อมูลจากการศึกษา และวิเคราะห์ มาจัดทำระบบแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม โดยใช้แนวคิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ใช้เป็นเครื่องมือของกิจกรรม การพัฒนาเครื่องมือในรูปแบบ Native application ทำงานค่อนข้างเร็ว สามารถใช้งานได้ใหม่ Offline ปรับอัตราส่วนของจอได้อย่างคงที่ในแต่ละแพลตฟอร์ม โดยเรียกใช้งานอุปกรณ์รับค่าผ่านกล้องสมาร์ทโฟน หรือ กล้องเว็บแคม โดยการพัฒนาแบบจำลองให้สามารถรองรับได้หลายแพลตฟอร์มสอดคล้องกับการใช้งานผู้ใช้



รูปที่ 9 แบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมกับผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกวิถีถิ่นภูเก็ต





รูปที่ 10 การติดต่อสื่อสารและสั่งซื้อผลิตภัณฑ์

4.1.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพระหว่างกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของคะแนนการประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองระหว่างกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ 2 กลุ่ม ได้แก่ ผู้เชี่ยวชาญด้านข้อมูล ($n = 3$) และผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ ($n = 3$) โดยการคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญ 6 คน สอดคล้องกับการวิจัย HCI ด้านการใช้งานและการออกแบบในระบบโต้ตอบ (Alroobaea & Mayhew, 2014) โดยใช้แบบประเมินมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ และวิเคราะห์ด้วยสถิติ Independent Samples t-test แบบสองทาง (two-tailed) ก่อนดำเนินการทดสอบ Independent Samples t-test ผู้วิจัยได้ตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นของการใช้สถิติ ได้แก่ การกระจายตัวแบบปกติของคะแนนในแต่ละกลุ่มด้วยสถิติ Shapiro-Wilk และการทดสอบความแปรปรวนเท่ากันด้วย Levene's Test เนื่องจากขนาดตัวอย่างของแต่ละกลุ่มมีจำนวนจำกัด ($n = 3$) การทดสอบความเป็นปกติมีข้อจำกัด จึงพิจารณาควบคู่กับการตรวจสอบลักษณะการกระจายของข้อมูลเชิงพรรณนา ผลการตรวจสอบไม่พบความเบี่ยงเบนรุนแรงจากสมมติฐานดังกล่าว จึงดำเนินการวิเคราะห์ด้วยสถิติ t-test แบบสองทางแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบคะแนนการประเมินประสิทธิภาพระหว่างกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ

กลุ่มผู้เชี่ยวชาญ	N	$\bar{x}$	S.D.	t(df)	p (two-tailed)
1. ด้านข้อมูล	3	4.83	0.28	1.08(4)	.341
2. ด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ	3	4.92	0.54		

ผลการวิเคราะห์เชิงพรรณนาพบว่า กลุ่มผู้เชี่ยวชาญด้านข้อมูลมีค่าเฉลี่ย 4.83 (S.D. = 0.28) ขณะที่กลุ่มผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศมีค่าเฉลี่ย 4.92 (S.D. = 0.54) สะท้อนว่าทั้งสองกลุ่มประเมินแบบจำลองอยู่ในระดับสูงมาก ผลการทดสอบ Independent Samples t-test เนื่องจากมาตรวัดเป็นแบบประมาณค่า 5 ระดับที่สามารถพิจารณาเป็นข้อมูลเชิงช่วง (interval-level approximation) พบว่า $t(4) = 1.08$, $p = .341$ ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ที่ .05 แสดงว่าไม่พบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญทั้งสองกลุ่ม ผลการวิเคราะห์ถูกตีความด้วยความระมัดระวัง และมุ่งเน้นการสะท้อนแนวโน้มมากกว่าการสรุปเชิงอนุมาน

นอกจากนี้ได้คำนวณขนาดอิทธิพล (Effect Size) ด้วยสถิติ Cohen's d พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.21 ซึ่งจัดอยู่ในระดับเล็ก (Small Effect Size) ตามเกณฑ์ของ Cohen แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของคะแนนเฉลี่ยระหว่างกลุ่มมีขนาดเล็ก ผลกระทบต่ำ และมีแนวโน้มสอดคล้องกันในเชิงการประเมิน เนื่องจากจำนวนผู้เชี่ยวชาญในแต่ละกลุ่มมีขนาดเล็ก ($n = 3$) การวิเคราะห์เชิงอนุมานจึงควรตีความด้วยความระมัดระวัง โดยผลลัพธ์ในส่วนนี้มุ่งเน้นการสะท้อนความสอดคล้องเชิงแนวโน้มของความคิดเห็น มากกว่าการสรุปอ้างอิงไปยังประชากรผู้เชี่ยวชาญในวงกว้าง ส่วนของเชิงเทคนิคผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศให้ข้อสังเกตเกี่ยวกับการสะท้อนแสงของบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่อาจส่งผลต่อความเสถียรของการรู้จำภาพภายใต้สภาพพื้นผิวที่ไม่มีคุณสมบัติสะท้อนแสง ระบบสามารถทำงานได้ตามเกณฑ์ประสิทธิภาพที่กำหนด ผลการประเมินดังกล่าวจึงสนับสนุนความพร้อมของแบบจำลองก่อนนำไปทดลองกับผู้ใช้

4.1.3 ผลการทดลองการใช้งานและการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้

แบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมถูกนำไปทดลองใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 100 คน ซึ่งเป็นนักท่องเที่ยวหรือผู้มาเยือนจังหวัดภูเก็ต โดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบบังเอิญ (Accidental

Sampling) ผู้เข้าร่วมทดลองได้ใช้งานแอปพลิเคชันต้นแบบครบทุกฟังก์ชัน จากนั้นจึงประเมินความพึงพอใจและระดับการยอมรับระบบผ่านแบบสอบถามด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

ตารางที่ 4 สถิติการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ ตามเกณฑ์ Likert Scale

ข้อความของแบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้	$\bar{x}$	S.D.
ด้านเนื้อหาและวิทัศน์	4.66	0.49
การมีส่วนร่วมกับเทคโนโลยีเทคโนโลยีความจริงเสริม	4.64	0.48
ด้านความง่ายในการเข้าถึงข้อมูล	4.63	0.49
การยอมรับระบบของผู้ใช้	4.58	0.53
ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจในภาพรวม	4.62	0.51

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ พบว่า ผู้ใช้มีความพึงพอใจในภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x} = 4.62$, S.D. = 0.51) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้านเนื้อหาที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด ($\bar{x} = 4.66$, S.D. = 0.49) สะท้อนว่าเนื้อหา สื่อวิทัศน์ และภาพประกอบมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ เข้าใจง่าย และสามารถสื่อสารอัตลักษณ์วิถีถิ่นที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ด้านการยอมรับระบบของผู้ใช้มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุดเช่นกัน ($\bar{x} = 4.58$, S.D. = 0.53) โดยเฉพาะประเด็นด้านการมีส่วนร่วมกับเทคโนโลยีความจริงเสริม ($\bar{x} = 4.64$) และความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูล ($\bar{x} = 4.63$) ซึ่งผู้วิจัยได้ประเมินความสามารถในการใช้งานของระบบ (Usability Evaluation) ในการวิจัยนี้ใช้เครื่องมือ System Usability Scale :SUS ซึ่งพัฒนาโดย Brooke (1996) และได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ (Human-Computer Interaction: HCI) เนื่องจากมีความกระชับ เชื่อถือได้ และสามารถใช้ประเมินระบบที่หลากหลายทั้งเชิงซอฟต์แวร์และเทคโนโลยีเชิงโต้ตอบ แบบสอบถาม SUS ประกอบด้วยข้อความจำนวน 10 ข้อ ในรูปแบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (5-point Likert scale) โดยกำหนดระดับคะแนนตั้งแต่ 1 = ไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง (Strongly disagree) ถึง 5 = เห็นด้วยอย่างยิ่ง (Strongly agree) ซึ่งข้อความถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ข้อความเชิงบวก (Positive items: ข้อ 1, 3, 5, 7 และ 9) และข้อความเชิงลบ (Negative items: ข้อ 2, 4, 6, 8 และ 10) ตามโครงสร้างมาตรฐานของเครื่องมือ ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้ทำการปรับถ้อยคำของข้อความบางส่วนให้สอดคล้องกับบริบทของระบบการเรียนรู้ผ่านผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกและเทคโนโลยีความจริงเสริม (Augmented Reality: AR) โดยยังคงโครงสร้าง แนวคิด และความหมายเชิงพฤติกรรมของแต่ละข้อความไว้ตามต้นฉบับ เพื่อรักษาความเทียบเท่าทางความหมาย (semantic equivalence) และความตรงเชิงโครงสร้าง (construct validity) ของเครื่องมือ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการประยุกต์ใช้ SUS ในบริบทเฉพาะทาง (Bangor et al., 2009) ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สถิติการประเมินความพึงพอใจและระดับการยอมรับระบบของผู้ใช้ ตามเกณฑ์ SUS (n = 100)

ข้อ	รายการประเมินประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้	$\bar{x}$	คะแนนที่ได้	ประเภท
1	ระบบผ่านผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกสนับสนุนการเรียนรู้และการรับรู้อัตลักษณ์วิถีถิ่นที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ	4.68	3.68	Positive
2	การเล่าเรื่องข้ามสื่อผ่านแอปและผลิตภัณฑ์มีความซับซ้อนและเข้าใจยาก	1.29	3.71	Negative
3	เทคโนโลยีAR ที่เชื่อมกับผลิตภัณฑ์ช่วยเสริมความเข้าใจเนื้อหาและบริบทการท่องเที่ยว	4.65	3.65	Positive
4	การใช้งานระหว่างผลิตภัณฑ์และแอปพลิเคชันขาดความต่อเนื่อง	1.42	3.58	Negative
5	สื่อประกอบ (ภาพ/วิทัศน์) ช่วยเสริมประสบการณ์และความน่าสนใจ	4.66	3.66	Positive
6	การแสดงผลและการจัดวางองค์ประกอบขาดความสม่ำเสมอ	1.54	3.46	Negative
7	ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลผ่านผลิตภัณฑ์และแอปพลิเคชันได้ง่าย	4.65	3.65	Positive
8	การเข้าถึงเนื้อหาผ่านผลิตภัณฑ์และแอปพลิเคชันมีข้อจำกัด	1.39	3.61	Negative
9	ระบบส่งเสริมการมีส่วนร่วมและประสบการณ์ท่องเที่ยวเชิงโต้ตอบ	4.69	3.69	Positive
10	การเรียนรู้การใช้งานระบบต้องใช้เวลา	1.49	3.51	Negative

ผลการประเมินจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 100 คน พบว่าระบบมีค่าคะแนน SUS เฉลี่ยเท่ากับ 90.50 ซึ่งจัดอยู่ในระดับ Excellent (Grade A) ตามเกณฑ์การแปลผลของ Bangor et al. (2009) และอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ไทล์สูง (>90th percentile) สะท้อนถึงระดับความสามารถในการใช้งานที่ดีเยี่ยมและการยอมรับของผู้ใช้ในระดับสูง เมื่อพิจารณาค่าเฉลยราย

ข้อ พบว่า ข้อคำถามเชิงบวกมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับสูง ขณะที่ข้อคำถามเชิงลบมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำ แสดงให้เห็นว่าผู้รับรู้ถึงความง่ายในการใช้งาน ความชัดเจนของระบบ และข้อจำกัดในการใช้งานในระดับต่ำ

4.2 อภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมที่พัฒนาขึ้นสามารถดำเนินการตามกรอบการวิจัยเชิงออกแบบ (Design-Based Research: DBR) ได้ในเชิงกระบวนการ กล่าวคือ เริ่มจากการศึกษาข้อมูลอัตลักษณ์ที่เกิดขึ้นโดยชุมชนเป็นฐาน ก่อนนำมาสังเคราะห์เป็นโครงสร้างข้อมูลผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบเรื่องเล่า แล้วจึงพัฒนาเป็นสถาปัตยกรรมระบบที่รองรับการแสดงผลผ่าน AR ในบริบทผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกจริง กระบวนการดังกล่าวสะท้อนลักษณะ iterative alignment ระหว่างองค์ความรู้เชิงเนื้อหาและโครงสร้างเชิงเทคนิค ซึ่งเป็นมิติของงานวิจัยเชิงออกแบบ ดังนี้ 1) มิติด้านเนื้อหาและสถาปัตยกรรมการเล่าเรื่อง การออกแบบโครงสร้างข้อมูลผลิตภัณฑ์ (Product Metadata) ควบคู่กับองค์ประกอบเรื่องเล่า (Story Elements) และรูปแบบการเล่าเรื่อง 3 ลักษณะ ได้แก่ Linear, Nonlinear และ Link Narrative ช่วยให้ระบบสามารถจัดการความต่อเนื่องของเรื่องเล่า (Narrative Continuity) ได้อย่างยืดหยุ่น กลไกระบบฐานกฎในรูปแบบ Match-Execute เอื้อให้การแสดงผลเนื้อหาสอดคล้องกับวัตถุที่ตรวจจับได้จริง ซึ่งแตกต่างจากการซ้อนทับข้อมูลแบบคงที่ (Static Overlay) ซึ่งผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญทั้งสองกลุ่ม ($n = 3$ ต่อกลุ่ม) ไม่พบหลักฐานเชิงสถิติที่บ่งชี้ความแตกต่างของคะแนนประเมิน ($p = .341$; Cohen's $d = 0.21$) ภายใต้ขนาดตัวอย่างที่จำกัด ผลลัพธ์ดังกล่าวจึงควรถูกตีความในลักษณะของแนวโน้มความสอดคล้องของความคิดเห็น มากกว่าการสรุปว่าคุณภาพด้านเนื้อหาและด้านเทคนิคมีความเท่าเทียมกันในระดับประชากร ทั้งนี้ ค่า effect size ระดับเล็กน้อยสนับสนุนว่าความแตกต่างของคะแนนอยู่ในระดับต่ำภายในกลุ่มตัวอย่างที่ศึกษา 2) มิติด้านประสิทธิภาพเชิงเทคนิค ค่าตัวชี้วัดของระบบ เช่น End-to-End Latency (120–160 ms), อัตราเฟรมเฉลี่ย 58 FPS, ความคลาดเคลื่อนการติดตามวัตถุเฉลี่ย 1.2 มม. และระยะเวลาการรู้จำภาพ 0.4–0.7 วินาทีอยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับการใช้งาน AR แบบเรียลไทม์ในบริบททดลอง ซึ่งค่าดังกล่าวได้มาจากการทดสอบภายใต้สภาพอุปกรณ์และเงื่อนไขเฉพาะของการศึกษา จึงควรระมัดระวังในการอ้างอิงไปยังสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ปัญหาการสะท้อนแสงจากพื้นผิวบรรจุภัณฑ์ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำในการรู้จำภาพ สะท้อนข้อจำกัดเชิงกายภาพของระบบ AR มากกว่าข้อจำกัดเชิงตรรกะของแบบจำลอง โดยการประยุกต์ใช้แนวคิด SSIM ร่วมกับเทคนิค Feature-based Image Matching และการประมวลผลภาพระดับสีเทา ช่วยลดผลกระทบดังกล่าวในระดับหนึ่งภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมได้

สำหรับผลการทดลองกับผู้ใช้จำนวน 100 คน ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจรวมอยู่ในระดับสูง ($M = 4.62$, $S.D. = 0.51$) และคะแนน System Usability Scale เท่ากับ 90.50 ซึ่งตามเกณฑ์มาตรฐานจัดอยู่ในระดับ Excellent และอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ไทล์สูง โดยกลุ่มตัวอย่างได้มาจากการสุ่มแบบบังเอิญในบริบทการทดลองจริง จึงอาจมีลักษณะเฉพาะของผู้เข้าร่วม เช่น ความสนใจในเทคโนโลยีหรือความเต็มใจในการทดลองระบบ ซึ่งอาจส่งผลต่อระดับคะแนนที่รายงานนอกจากนี้ เครื่องมือที่ใช้เป็นแบบรายงานตนเอง ผลการประเมินจึงสะท้อนการรับรู้และประสบการณ์เชิงอัตวิสัยของผู้ใช้ภายใต้เงื่อนไขการทดลองในช่วงเวลาที่กำหนด ทั้งนี้การวัดลักษณะดังกล่าวอาจยังไม่ครอบคลุมพฤติกรรมการใช้งานในระยะยาว ซึ่งควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติมในงานวิจัยระยะต่อไป โดยภาพรวมภายใต้ขอบเขตของการศึกษาตามบริบทที่กำหนดแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นแสดงการเชื่อมโยงเนื้อหาอัตลักษณ์ชุมชนกับกลไกการเล่าเรื่องเชิงโต้ตอบผ่านเทคโนโลยี AR ในลักษณะที่สอดคล้องกับหลักการออกแบบเชิงปฏิสัมพันธ์และการวิจัยเชิงออกแบบ ดังนั้นข้อค้นพบควรถูกพิจารณาในฐานะหลักฐานเชิงบริบทที่สนับสนุนความเป็นไปได้ของแนวทางการออกแบบ มากกว่าการสรุปอ้างอิงเชิงทั่วไปในระดับประชากรหรือบริบทที่แตกต่างกัน

งานวิจัยมีข้อจำกัดที่ควรพิจารณาในการตีความผลการศึกษา ดังนี้ 1) การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองมุ่งเน้นการประเมินภายในระบบที่พัฒนาขึ้น โดยยังไม่ได้มีการเปรียบเทียบเชิงทดลองกับรูปแบบสื่อดิจิทัลแบบดั้งเดิม หรือแพลตฟอร์ม AR รูปแบบอื่น จึงยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนถึงระดับความได้เปรียบเชิงสัมพัทธ์ของแบบจำลองในมิติต่าง ๆ 2) การประเมินผู้ใช้งานวิจัยนี้อาศัยข้อมูลแบบรายงานตนเองเป็นหลัก ซึ่งสะท้อนการรับรู้และความพึงพอใจในระยะสั้น แต่ยังไม่ได้ครอบคลุมตัวชี้วัดเชิงพฤติกรรมระยะเวลาดำเนินการจริง อัตราการมีส่วนร่วม หรือพฤติกรรมการกลับมาใช้งานซ้ำ และทรัพยากรในการดำเนินการวิจัย ส่งผลให้การเก็บข้อมูลยังอยู่ในช่วงเวลาสั้นและบริบทเฉพาะ ซึ่งอาจยังไม่สะท้อนพฤติกรรมการใช้งานในระยะยาวหรือในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อ (Transmedia Storytelling) โดยบูรณาการเทคโนโลยีความจริงเสริม (AR) และหลักการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ (HCI) ภายใต้กรอบการวิจัยเชิงออกแบบ (Design-Based Research: DBR) ในบริบทผลิตภัณฑ์ของที่ระลึกอัตลักษณ์วิถีถิ่นภูเก็ต โดยสามารถสรุปผลตามวัตถุประสงค์ได้ดังนี้ 1) ด้านโครงสร้างเนื้อหาและฐานข้อมูล การศึกษาข้อมูลเชิงบริบทจากชุมชนนำไปสู่การกำหนดชุดองค์ประกอบอัตลักษณ์ภูเก็ตที่จัดโครงสร้างในรูปแบบองค์ประกอบเรื่องเล่า (Narrative Elements) และเมตาดาตาเชิงความหมาย (Semantic Metadata) ซึ่งทำหน้าที่เป็นฐานข้อมูลสำหรับการออกแบบเนื้อหาเชิงระบบ ผลลัพธ์ส่วนนี้ได้จำกัดเพียงการรวบรวมข้อมูลวัฒนธรรม แต่เป็นการแปลงองค์ความรู้อัตลักษณ์ให้เป็นหน่วยข้อมูลที่สามารถประมวลผลและเชื่อมโยงกับกลไกเทคโนโลยีได้อย่างเป็นระบบ 2) ด้านการพัฒนาและประสิทธิภาพระบบ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้บูรณาการโครงสร้างข้อมูลเชิงบริบท กลไกการเล่าเรื่องแบบฐานกฎ (Rule-based Storytelling) และสถาปัตยกรรมข้ามแพลตฟอร์ม (Native Application และ WebAR) ผลการประเมินเชิงเทคนิคพบว่า ค่าความหน่วง (Latency) อัตราเฟรม (Frame Rate) และความแม่นยำในการติดตามวัตถุอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ไม่รบกวนการใช้งาน ขณะที่ผลการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญยืนยันความสอดคล้องระหว่างโครงสร้างเนื้อหาวัฒนธรรมและกลไกทางเทคโนโลยี และ 3) ด้านการตอบรับของผู้ใช้ จากการทดสอบกับกลุ่มตัวอย่าง 100 คน พบว่า มีความพึงพอใจในภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($M = 4.83$, $SD = 0.28$) และมีคะแนนความสามารถในการใช้ประโยชน์ (System Usability Scale: SUS) เฉลี่ยเท่ากับ 90.50 ซึ่งอยู่ในระดับ Excellent สะท้อนถึงการรับรู้อัตลักษณ์วิถีถิ่นผ่านประสบการณ์ AR ที่ต่อเนื่องและใช้งานง่าย ด้วยข้อค้นพบนี้ควรพิจารณาภายใต้ข้อจำกัดของการประเมินแบบรายงานตนเองและระยะเวลาการทดลองในระยะสั้น

งานวิจัยนี้เพิ่มเติมช่องว่างใน 3 มิติสำคัญ ได้แก่ 1) การเสนอกรอบแบบจำลองเชิงบูรณาการที่เชื่อมโยง Cultural Metadata – Narrative Structure – AR Engine – Rule-based Logic ภายในสถาปัตยกรรมเดียว 2) การประยุกต์หลักการ DBR เพื่อสร้างหลักการออกแบบสำหรับการเล่าเรื่องด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมในบริบทอัตลักษณ์ท้องถิ่น และ 3) การยกระดับบทบาทของ AR จากเครื่องมือแสดงผลภาพ ไปสู่ระบบปฏิสัมพันธ์เชิงเรื่องเล่าที่สร้างประสบการณ์ร่วมระหว่างวัตถุทางกายภาพและเชื่อมโยงการปฏิสัมพันธ์อย่างเป็นระบบ แนวทางการออกแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อยกระดับผลิตภัณฑ์ชุมชน การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมในบริบทอื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นส่วนสนับสนุนองค์ความรู้ด้านเทคโนโลยีสารสนเทศโดยเสนอและตรวจสอบความถูกต้องของสถาปัตยกรรมระบบความจริงเสริมแบบข้ามแพลตฟอร์มที่บูรณาการเทคนิคการรู้จำภาพร่วมกับกลไกปฏิสัมพันธ์เชิงกฎ นอกจากนี้ยังขยายกรอบการออกแบบเชิง HCI สู่บริบทการประยุกต์ใช้ระดับชุมชน โดยผสานการประเมินประสิทธิภาพเชิงเทคนิคและความสามารถในการใช้งานภายใต้แนวทางวิจัยเชิงออกแบบ

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

การพัฒนาในระดับนโยบายหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้อง เช่น สำนักงานพัฒนาชุมชนจังหวัดภูเก็ต หรือการท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย (ททท.) ควรบูรณาการแบบจำลองนี้เป็น “แพลตฟอร์มกลาง” สำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนและผู้ประกอบการ OTOP เพื่อให้นักท่องเที่ยวเข้าถึงข้อมูลผลิตภัณฑ์ผ่านการสแกนตราสัญลักษณ์รับรองมาตรฐาน ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการสร้างประสบการณ์แบรนด์แบบมีส่วนร่วมผ่านบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ (Accardi et al., 2025) การพัฒนาทักษะผู้ประกอบการควรจัดอบรมเชิงปฏิบัติการเพื่อเสริมสร้างทักษะการสร้างเนื้อหาดิจิทัล (Digital Content Creation) ให้แก่ผู้ประกอบการ เพื่อให้ข้อมูลมีความทันสมัยและตอบสนองความต้องการของนักท่องเที่ยวรุ่นใหม่ (Millennials และ Gen Z) ที่ให้ความสำคัญกับเรื่องราวเบื้องหลังของผลิตภัณฑ์และความยั่งยืนของแบรนด์ การขยายผลและเพิ่มประสิทธิภาพระบบควรขยายฐานข้อมูลเนื้อหาให้ครอบคลุมผลิตภัณฑ์ท้องถิ่นที่หลากหลายมากขึ้น พร้อมทั้งพัฒนาระบบให้เข้าถึงได้ทั้งรูปแบบแอปพลิเคชันและ WebAR เพื่ออำนวยความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูลและการสั่งซื้อโดยตรง ตลอดจนมีการติดตามผลและปรับปรุงซอฟต์แวร์อย่างสม่ำเสมอเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบในระยะยาว

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

การวิจัยในอนาคตควรพิจารณาบูรณาการเทคโนโลยีดิจิทัลสมัยใหม่ ผู้วิจัยเห็นว่าการพัฒนาในอนาคตควรนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ มาบูรณาการร่วมกับแบบจำลองการเล่าเรื่องข้ามสื่อ เพื่อสร้าง "การเล่าเรื่องที่ปรับแต่งตามบุคคล"

โดยระบบสามารถปรับโทนเสียงหรือระดับความลึกของเนื้อหาประวัติการเข้าชมหรือความชอบของผู้ใช้รายบุคคล เพื่อเพิ่มศักยภาพของแบบจำลองให้สอดคล้องกับบริบทการท่องเที่ยงและการตลาดในยุคดิจิทัล เช่น การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อการวิเคราะห์พฤติกรรมผู้ใช้และการตลาดเชิงอัจฉริยะ การจัดการและประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ รวมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีประมวลผลภาษาธรรมชาติแบบหลายภาษา เพื่อรองรับนักท่องเที่ยวจากนานาชาติ ซึ่งจะช่วยเพิ่มโอกาสในการสื่อสารข้ามวัฒนธรรม และส่งเสริมการเผยแพร่อัตลักษณ์วิถีถิ่นของประเทศไทยสู่ระดับสากลอย่างยั่งยืน

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้นำชุมชนท้องถิ่น ปรารักษ์ชาวบ้าน ผู้ประกอบการวิสาหกิจชุมชน หน่วยงานท้องถิ่นและสำนักงานพัฒนาชุมชนจังหวัดภูเก็ตที่ได้กรุณาให้ข้อมูล ข้อเสนอแนะ และความร่วมมือในการลงพื้นที่เก็บรวบรวมข้อมูล อันเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

8. เอกสารอ้างอิง

- Accardi, S., Campo, C., Bilucaglia, M., Zito, M., Caccamo, M., & Russo, V. (2025). Static vs. immersive: A neuromarketing exploratory study of augmented reality on packaging labels. *Behavioral Sciences*, 15(9), Article 1241.
- Alroobaea, R., & Mayhew, P. J. (2014). How many participants are really enough for usability studies? In *Proceedings of the 2014 Science and Information Conference* (pp. 48–56).
- Aslan, D., Çetin, B. B., & Ozbilgin, I. G. (2019). An innovative technology: Augmented reality-based information systems. *Procedia Computer Science*, 158, 407–414.
- Azuma, R. T. (1997). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355–385.
- Azuma, R. T., Bailiot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., & MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6), 34–47.
- Bangor, A., Kortum, P., & Miller, J. (2009). Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale. *Journal of Usability Studies*, 4(3), 114–123.
- Barrow, J., Forker, C., Sands, A., O'Hare, D., & Hurst, W. (2019). Augmented reality for enhancing life science education. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Applications and Systems of Visual Paradigms* (pp.7–12).
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Dennis, A., Wixom, B. H., & Roth, R. M. (2021). *Systems analysis and design* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Field, A. (2013). *Discovering statistics using IBM SPSS Statistics* (4th ed.). Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Frühwirth, T. (2025). *Principles of rule-based programming*. Hamburg, Germany: BoD – Books on Demand.
- Jenkins, H. (2006). *Convergence culture: Where old and new media collide*. New York, NY: New York University Press.
- Komsorn, K. (2011). *Develop and compare image recognition engine to support Android* (Unpublished doctoral dissertation). Sripatum University, Bangkok, Thailand.
- Karma, G. M., & Darma, K. (2025). Application of feature-based image matching method as an object recognition method. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 14(2), 1073–1079.
- Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*, 140, 1–55.
- Maria, K. E. (2020). *Virtual and augmented reality implementation in travel destination marketing: Thessaloniki, Greece* (Master's thesis). International Hellenic University, Thessaloniki, Greece.

- Martin, R. C. (2014). *Agile software development: Principles, patterns, and practices* (1st ed.). London, England: Pearson Education Limited.
- Park, S. B. (2021). Detection of the helper types from story in multimedia. *Multimedia Tools and Applications*, 80, 34479–34497.
- Raaen, K., & Kjellmo, I. (2015). Measuring latency in virtual reality systems. In K. Chorianopoulos, M. Divitini, J. B. Hauge, L. Jaccheri, & R. Malaka (Eds.), *Entertainment Computing—ICEC 2015* (pp. 457–462). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Reeves, T. C. (2006). Design research from a technology perspective. In J. van den Akker, K. Gravemeijer, S. McKenney, & N. Nieveen (Eds.), *Educational design research* (pp. 52–66). London, England: Routledge.
- Santano, D., & Thwaites, H. (2018). Augmented reality storytelling: A transmedia exploration. In *Proceedings of the 2018 3rd Digital Heritage International Congress (DigitalHERITAGE)* (pp. 1–8). Piscataway, NJ: IEEE.
- Sharp, H., Rogers, Y., & Preece, J. (2019). *Interaction design: Beyond human–computer interaction* (5th ed.). Indianapolis, IN: Wiley.
- Schmalstieg, D., & Höllerer, T. (2016). *Augmented reality: Principles and practice* (1st ed.). Boston, MA: Addison-Wesley Professional.
- Shneiderman, B., Plaisant, C., Cohen, M., Jacobs, S., Elmqvist, N., & Diakopoulos, N. (2018). *Designing the user interface: Strategies for effective human–computer interaction* (6th ed.). Harlow, England: Pearson Education Limited.
- วสันต์ จันทร์ประสิทธิ์และอรไท ครุฑเวโช. (2563). แนวทางการบริหารและสื่อสารตราสินค้าแหล่งท่องเที่ยวจังหวัดภูเก็ตให้เกิดคุณค่าตราสินค้าที่เพิ่มขึ้นในมุมมองนักท่องเที่ยวชาวยุโรป. *วารสารการจัดการ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์*, 9(3), 16–30.
- ชำนาญ ปาณางษ์. (2563). *ระเบียบวิธีวิจัยเชิงคุณภาพ : จากแนวคิดทฤษฎีสู่การปฏิบัติ*. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- สุภางค์ จันทวานิช. (2556). *วิธีวิจัยเชิงคุณภาพ*. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรชัย เตชะธนะเศรษฐ์, สุชาดา เกตุดี, วรदानันท์ เหมนิธิ และ วันรัชย์ ศรีสังข์. (2562). พัฒนาการของเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม. *วารสารเทคโนโลยีสื่อสารมวลชน มทร.พระนคร*, 4(2), 72–83.
- ดวงจันทร์ สีหาราช, ยุภา คำตะพล, ฐิณภักดิ์ นิธิวิทย์และ ศรัณญา ตรีทศ. (2563). แอปพลิเคชันส่งเสริมการท่องเที่ยวในจังหวัดเพชรบูรณ์ด้วยเทคโนโลยีเสมือนจริง. *วารสารศรีปทุมปริทัศน์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 12(1), 135–148.
- โกสินทร์ จ่านไทย. (2566). การสื่อสารระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ จากพิมพ์ดีด สัมผัสจอ และสั่งงานด้วยเสียง ไปสู่กริยาท่าทาง. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 33(4), 1–3.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นางสาวทิพย์มณฑา ผกาแก้ว

อาจารย์สาขาวิชาเทคโนโลยีดิจิทัล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต
โทรศัพท์ : 09-4149-2487

E-Mail : thipmonta.p@pkru.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ : Human Computer Interaction ,Technology Multimedia
Modern Technology



นางสาวสมใจ จิตคำนึ่งสุข

อาจารย์สาขาวิชาเทคโนโลยีดิจิทัล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต
โทรศัพท์ : 09-4149-2487

E-Mail : somjai.j@pkru.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ : Computing Platform Technology, Data Network

ผลของการให้ความร้อนต่อการปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอล ที่ปนเปื้อนเครื่องดื่ม

EFFECTS OF HEAT TREATMENT ON THE DEVELOPMENT OF LATENT FINGERPRINTS ON BEVERAGE-CONTAMINATED THERMAL PAPER

อรทัย เขียวพุ่ม¹, หลุยส์ พันธุ์แสง², ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง³ และ พชรพร ศรีสุวรรณ⁴

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, kheawpum_o@su.ac.th

²โครงการนิติวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, puifaiharuthai@gmail.com

³ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, choosakoonkrian_s@su.ac.th

⁴ศูนย์พิสูจน์หลักฐาน 7 สำนักงานตำรวจแห่งชาติ, pashrapon38@hotmail.com

Orathai Kheawpum¹, Haruethai Phansaeng², Sirirat Choosakoonkriang³ and Pashrapon Seesuvan⁴

¹Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University, kheawpum_o@su.ac.th

²Forensic Science Program, Faculty of Science, Silpakorn University, puifaiharuthai@gmail.com

³Department of Chemistry, Faculty of Science, Silpakorn University, choosakoonkrian_s@su.ac.th

⁴Scientific Crime Detection Center 7, Royal Thai Police, pashrapon38@hotmail.com

วันที่รับบทความ 3 กุมภาพันธ์ 2569

วันแก้ไขบทความ 18 กุมภาพันธ์ 2569

วันที่ตอบรับบทความ 30 เมษายน 2569

บทคัดย่อ

ลายนิ้วมือแฝงเป็นพยานหลักฐานทางนิติวิทยาศาสตร์ที่ใช้ยืนยันอัตลักษณ์บุคคลได้ อย่างไรก็ตามกระดาษเทอร์มอลมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเมื่อสัมผัสของเหลว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณภาพของรอยลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอลที่ปนเปื้อนด้วยเครื่องดื่มชนิดต่าง ๆ โดยใช้วิธีการให้ความร้อน กระดาษเทอร์มอลที่ใช้ศึกษา ได้แก่ กระดาษแฟกซ์ ใบเสร็จร้านสะดวกซื้อ และใบบันทึกการทำรายการจากเครื่องเอทีเอ็ม และเครื่องดื่มที่ใช้ศึกษาได้แก่ น้ำเปล่า โซดา น้ำอัดลม กาแฟนม และน้ำมะนาว ลายนิ้วมือแฝงถูกบันทึกภาพด้วยกล้องโทรศัพท์มือถือภายใต้แสงอัลตราไวโอเลตนำไปตรวจประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญด้านการตรวจลายนิ้วมือแฝง จากความคมชัดของลายเส้นและจำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษ ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการตรวจลายนิ้วมือแฝงพบว่า ใช้แรงกดประทับ ที่ 800–1,000 กรัม อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และระยะห่างจากแท่นความร้อน 0.5 เซนติเมตร ภายใต้สภาวะดังกล่าวพบว่า กระดาษแฟกซ์ และใบเสร็จร้านสะดวกซื้อที่ปนเปื้อนน้ำเปล่า โซดา และน้ำมะนาว รวมถึงใบบันทึกเอทีเอ็มที่ปนเปื้อนน้ำมะนาว ให้อายลายนิ้วมือแฝงที่มีคุณภาพระดับปานกลางถึงดีมาก ในขณะที่การปนเปื้อนน้ำอัดลมและกาแฟนมให้คุณภาพรอยลายนิ้วมือแฝงอยู่ในระดับต่ำ ผลการวิจัยแสดงว่าการให้ความร้อนด้วยแท่นให้ความร้อนเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพ ต้นทุนต่ำ ไม่ใช้สารเคมีอันตราย และมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในการตรวจพิสูจน์พยานหลักฐานประเภทกระดาษเทอร์มอลในงานนิติวิทยาศาสตร์

คำสำคัญ: ลายนิ้วมือแฝง, กระดาษเทอร์มอล, การให้ความร้อน, การปนเปื้อนเครื่องดื่ม, นิติวิทยาศาสตร์

ABSTRACT

Latent fingerprints are important forensic evidence for personal identification; however, thermal paper is highly sensitive to chemical changes when exposed to liquids. This study aimed to evaluate the quality of latent fingerprints on thermal paper contaminated with common beverages using a heat

development method. The examined samples included fax paper, convenience-store receipts, and ATM transaction slips. Beverage contaminants consisted of distilled water, soda water, carbonated soft drink, milk coffee, and lemon juice. Latent fingerprints were photographed using a smartphone camera under ultraviolet (UV) light and evaluated by fingerprint expert. Fingerprint quality was assessed based on ridge clarity and the number of identifiable minutiae points. The results demonstrated that the optimal conditions for latent fingerprint development were a deposition pressure of 800–1,000 g, a heating temperature of 100 °C, and a distance of 0.5 cm from the heat source. Under these conditions, fax paper and convenience-store receipts contaminated with distilled water, soda water, and lemon juice, as well as ATM slips contaminated with lemon juice, yielded fingerprints of moderate to very good quality. In contrast, samples contaminated with carbonated soft drink and milk coffee exhibited low fingerprint quality. These findings indicate that heat development using a hot plate is an effective, low-cost, and non-hazardous technique suitable for forensic examination of thermal paper evidence.

KEYWORDS: Latent fingerprints, Thermal paper, Heat development, Contamination from beverage, Forensic science

1. บทนำ

นิติวิทยาศาสตร์มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการยุติธรรม โดยใช้หลักการทางวิทยาศาสตร์ในการตรวจสอบพยานหลักฐานที่ได้จากสถานที่เกิดเหตุเพื่อสืบค้นข้อเท็จจริง อาจใช้ระบุตัวผู้กระทำความผิดอย่างเป็นระบบ หลักฐานทางนิติวิทยาศาสตร์มิใช่เพียงเครื่องมือประกอบการสืบสวนเท่านั้น หากแต่เป็นองค์ประกอบหลักที่ช่วยเพิ่มความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของกระบวนการพิจารณาตีความในศาล (Houck & Siegel, 2015; Saferstein, 2020; Bécue, 2021; Girod & Weyermann, 2022) แนวคิดพื้นฐานที่ถูกใช้เป็นรากฐานของการตรวจพิสูจน์ทางนิติวิทยาศาสตร์ คือหลักการที่เสนอโดย Edmond Locard ซึ่งกล่าวว่าทุกการสัมผัสจะมีการแลกเปลี่ยนของสาร โดยเมื่อวัตถุหรือบุคคลสองฝ่ายมีการสัมผัสกัน จะเกิดการถ่ายโอนของสารระหว่างพื้นผิวที่เกี่ยวข้องเสมอ ร่องรอยเหล่านี้คงอยู่ในสถานที่เกิดเหตุและถูกนำมาใช้เป็นพยานหลักฐานในการเชื่อมโยงบุคคล สิ่งของ และเหตุการณ์เข้าด้วยกันได้ (James et al., 2019; Houck, 2022)

ลายนิ้วมือถือเป็นหลักฐานทางนิติวิทยาศาสตร์ที่ใช้ระบุตัวบุคคลได้อย่างแม่นยำ และได้รับการยอมรับในระดับสากล เนื่องจากลายนิ้วมือของแต่ละบุคคลมีลวดลายแตกต่างกัน แม้กระทั่งในคู่แฝดก็ไม่ปรากฏว่ามีลายนิ้วมือเหมือนกันทุกประการ อีกทั้งยังคงมีความคงตัวตลอดช่วงชีวิต หากไม่มีการบาดเจ็บที่ทำลายโครงสร้างของผิวหนังอย่างถาวร (Champod et al., 2016; Daluz, 2014; Girod et al., 2021) ลายนิ้วมือเกิดจากการตกค้างของสารคัดหลั่งหลังจากต่อมเหงื่อและต่อมไขมันประกอบด้วยน้ำ เกลือแร่ กรดอะมิโน และไขมัน เมื่อมีการสัมผัสพื้นผิวจะถ่ายโอนและก่อให้เกิดลวดลายเฉพาะที่สามารถนำไปใช้ในการระบุตัวบุคคลได้ (Ramotowski, 2020; Saferstein, 2020; Bécue, 2021) อย่างไรก็ตามลายนิ้วมือที่พบบ่อยในสถานที่เกิดเหตุมักอยู่ในรูปของ ลายนิ้วมือแฝง ซึ่งมองไม่เห็นได้ด้วยตาเปล่า จำเป็นต้องอาศัยเทคนิคการทำให้ลายนิ้วมือแฝงปรากฏเพื่อให้สามารถบันทึกและนำไปใช้ในการเปรียบเทียบระบุตัวบุคคลได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Daluz, 2014; Ramotowski, 2020; Girod & Weyermann, 2022) และคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของพื้นผิว ลักษณะการสัมผัส ปริมาณและองค์ประกอบของสารคัดหลั่ง รวมถึงสภาพแวดล้อมเช่น อุณหภูมิและความชื้น (Daluz, 2014; Ramotowski, 2020; Bécue, 2018) ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาเทคนิคการตรวจเก็บลายนิ้วมือแฝงหลากหลายรูปแบบเพื่อให้เหมาะสมกับวัสดุและสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันจึงมีความสำคัญ

กระดาษเทอร์มอลเป็นวัสดุที่พบได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน ในรูปของใบเสร็จรับเงิน สลิปเอทีเอ็ม หรือเอกสารทางการเงินต่างๆ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติเฉพาะของกระดาษเทอร์มอลซึ่งมีการเคลือบสารไวต่อความร้อนและความชื้นทำให้การตรวจเก็บลายนิ้วมือแฝงบนวัสดุชนิดนี้เป็นความท้าทายทางนิติวิทยาศาสตร์ ลายนิ้วมือแฝงอาจเสื่อมสภาพหรือสูญเสยรายละเอียดได้ง่าย เมื่อกระดาษสัมผัสกับความร้อน ของเหลว หรือสารปนเปื้อนจากสิ่งแวดล้อม (Bécue, 2018, 2021; Cantu & Johnson, 2021) เมื่อกระดาษเทอร์มอลสัมผัสกับสภาวะที่มีอุณหภูมิหรือความชื้นไม่เหมาะสม หรือมีการปนเปื้อนด้วยสารเคมีต่าง ๆ อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งในมิติทางเคมีและกายภาพของกระดาษ เช่น การเปลี่ยนสี การมีด่างของพื้นผิว หรือการเสียสภาพของชั้นเคลือบไวต่อความร้อน ส่งผลให้รายละเอียดของลายนิ้วมือแฝงจางหาย ลบเลือน หรือถูกบดบังได้ง่าย (Bécue, 2018; Bécue, 2021; Bond, 2014; Girod & Weyermann, 2022; Johnson et al., 2020) ในทำนอง

เดียวกัน การปนเปื้อนของเครื่องดื่มที่มีส่วนประกอบทางเคมีหลากหลาย เช่น น้ำตาล กรดอินทรีย์ สี และสารเติมแต่งอื่น ๆ บนกระดาษเทอร์มอลสามารถทำให้พื้นผิวกระดาษเกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติม เกิดร่องรอยใหม่แทรกซ้อน หรือเร่งให้เกิดการจางหายของลายนิ้วมือเดิมที่อยู่บนพื้นผิวผลที่ตามมาคือคุณภาพของพยานหลักฐานลายนิ้วมือแฝงที่ใช้ในการตรวจสอบและเปรียบเทียบลดลง ทั้งในแง่ของความคมชัดของลายเส้น จำนวนจุดลักษณะสำคัญพิเศษ (minutiae) ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ และความน่าเชื่อถือของผลการพิสูจน์ มีงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอลที่มีการปนเปื้อนของของเหลว เช่น เครื่องดื่มหรือเหงื่อ เป็นหลักฐานสำคัญที่สามารถนำไปสู่การคลี่คลายคดีได้ แต่ในขณะเดียวกันก็มีข้อจำกัดด้านคุณภาพของร่องรอยและความยากในการตรวจพิสูจน์ (Johnson et al., 2020) นอกจากนี้งานวิจัยยังพบว่าการใช้ความร้อนช่วยกระตุ้นให้ลายนิ้วมือแฝงปรากฏชัดบนกระดาษเทอร์มอล โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพื้นผิว (Bond, 2014; Ninsuwan, 2018) อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดขององค์ความรู้เกี่ยวกับประสิทธิภาพของวิธีการดังกล่าวในสถานการณ์ที่มีการปนเปื้อนของเครื่องดื่มประเภทต่าง ๆ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่พบได้จริงในสถานที่เกิดเหตุ (Johnson et al., 2020; Girod & Weyermann, 2022)

ดังนั้น การศึกษาผลกระทบของการปนเปื้อนเครื่องดื่มต่อคุณภาพลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอล และการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการให้ความร้อนซึ่งเป็นวิธีการที่ง่าย ต้นทุนต่ำ และปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเพิ่มศักยภาพในการตรวจและใช้ประโยชน์จากลายนิ้วมือแฝง ซึ่งเป็นพยานหลักฐานที่เชื่อถือได้ในกระบวนการยุติธรรม และอาจนำไปประยุกต์ใช้หรือพัฒนาต่อยอดในงานนิติวิทยาศาสตร์ต่อไปในอนาคต

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการใช้ความร้อนในการพัฒนารอยลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอล
2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการให้ความร้อนในการพัฒนารอยลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอลที่มีการปนเปื้อนด้วยเครื่องดื่มชนิดต่าง ๆ ได้แก่ น้ำเปล่า โซดา น้ำอัดลม กาแฟนม และน้ำมะนาว

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 กลุ่มตัวอย่างผู้ให้ลายนิ้วมือ

การศึกษานี้ใช้ลายนิ้วมือจากอาสาสมัครเพศหญิง จำนวน 1 ราย อายุ 30 ปี น้ำหนัก 50 กิโลกรัม โดยเลือกนิ้วหัวแม่มือซึ่งมีสภาพผิวแห้งและลักษณะลายนิ้วมือปกติ ไม่แห้งหรือแตก อาสาสมัครไม่มีประวัติการใช้สารเคมีหรือผลิตภัณฑ์ที่อาจส่งผลต่อสารคัดหลั่งบนผิวหนังในช่วงก่อนการทดลอง

อย่างไรก็ตาม การกำหนดกลุ่มตัวอย่างเป็นอาสาสมัครเพียง 1 ราย มีวัตถุประสงค์เพื่อ ควบคุมความแปรปรวนจากปัจจัยด้านชีวภาพของผู้ให้ลายนิ้วมือ เช่น ปริมาณเหงื่อ ไขมัน และองค์ประกอบของสารคัดหลั่งบนผิวหนัง ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของลายนิ้วมือแฝง โดยการใช้ผู้ให้ลายนิ้วมือรายเดียวตลอดการทดลองช่วยให้สามารถเปรียบเทียบผลของชนิดกระดาษเทอร์มอล สารปนเปื้อน และสภาวะการให้ความร้อนได้อย่างเป็นระบบและชัดเจน

แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยด้านนิติวิทยาศาสตร์ที่มุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคหรือสภาวะการทดลองเป็นหลัก มากกว่าการศึกษาความแปรปรวนระหว่างบุคคล ทั้งนี้ การศึกษาครั้งนี้มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาและกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการพัฒนาลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอล ซึ่งสามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาขยายผลในกลุ่มตัวอย่างที่หลากหลายมากขึ้นในอนาคต

3.2 วัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดลอง

การศึกษานี้ใช้กระดาษเทอร์มอลซึ่งเป็นวัสดุที่พบได้ทั่วไปในชีวิตประจำวันและมักปรากฏเป็นพยานหลักฐานในสถานที่เกิดเหตุ ประกอบด้วยกระดาษเทอร์มอลเปล่าและกระดาษแฟกซ์ซึ่งจัดจำหน่ายโดย Makro รวมถึงใบเสร็จรับเงินจากร้านสะดวกซื้อ 7-Eleven และใบบันทึกการทำรายการจากเครื่องเอทีเอ็มของธนาคารแห่งหนึ่ง

สารปนเปื้อนที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องดื่มที่พบได้ทั่วไปและมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ได้แก่ น้ำเปล่า น้ำอัดลม โซดา กาแฟนม และน้ำมะนาว เพื่อจำลองสภาวะการปนเปื้อนที่อาจเกิดขึ้นจริงในสถานที่เกิดเหตุ ซึ่งอาจส่งผลต่อโครงสร้างของกระดาษและคุณภาพของลายนิ้วมือแฝง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยปิกเกอร์ขนาด 50 มิลลิเมตร เครื่องซึ่งดิจิทัลที่มีความละเอียดสองตำแหน่ง ทศนิยม แทนให้ความร้อน (hot plate) ใช้ในการปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝง และเครื่องกำเนิดแสงหลายความถี่ (multispectral light source (Rofin PL500) สำหรับการตรวจสอบและบันทึกภาพลายนิ้วมือแฝง โดยถ่ายภาพใช้แสงที่

ความยาวคลื่น 350 nm กล้องจากโทรศัพท์มือถือ ยี่ห้อ Apple (iphone 12 ระบบกล้องคู่ ความละเอียด 12 MP) อุปกรณ์ทั้งหมดถูกเลือกให้สามารถควบคุมตัวแปรได้อย่างเหมาะสมและสนับสนุนการทำซ้ำการทดลองในงานวิจัยเชิงวิชาการ

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจลายนิ้วมือแฝงด้วยการให้ความร้อน

การทดลองนี้มุ่งศึกษาผลของตัวแปร 3 ตัวต่อการพัฒนาลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอล ได้แก่ แรงกดในการประทับลายนิ้วมือ อุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน และระยะห่างระหว่างกระดาษเทอร์มอลกับแหล่งให้ความร้อน โดยดำเนินการภายใต้สภาวะที่ควบคุม และประเมินผลจากคะแนนโดยผู้เชี่ยวชาญด้านตรวจลายนิ้วมือแฝง เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด

เริ่มต้นจากการควบคุมสภาวะของผิวหนัง อาสาสมัครล้างมือให้สะอาดและสวมถุงมือเป็นเวลา 30 นาที เพื่อกระตุ้นการหลั่งสารคัดหลั่งตามธรรมชาติของผิวหนัง จากนั้นถอดถุงมือและประทับนิ้วหัวแม่มือลงบนกระดาษเทอร์มอล กำหนดแรงกด 3 ระดับ คือ 600–800 กรัม 800–1,000 กรัม และ 1,000–1,500 กรัม โดยวางกระดาษบนเครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความละเอียดสองตำแหน่งทศนิยม ทั้งนี้กำหนดระยะเวลากดประทับค้างไว้ที่ 10 วินาทีต่อครั้ง ซึ่งได้จากการทดลองเบื้องต้น เพื่อให้ได้ลายนิ้วมือที่มีความสม่ำเสมอและความคมชัดเพียงพอสำหรับการประเมินคุณภาพ ใช้ลายนิ้วมือ 1 รอยต่อกระดาษเทอร์มอล 1 แผ่น และทำซ้ำในแต่ละระดับแรงกดจำนวน 5 ครั้ง ลายนิ้วมือที่ได้ถูกบันทึกภาพภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต และให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินคุณภาพลายนิ้วมือ เพื่อนำไปคัดเลือกสภาวะแรงกดที่ให้คะแนนเฉลี่ยสูงสุดสำหรับการทดลองขั้นต่อไป

ลายนิ้วมือที่ผ่านการคัดเลือกจะถูกนำไปศึกษาผลของอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60, 100 และ 200 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 นาที ทำซ้ำในแต่ละอุณหภูมิ 5 ครั้ง แล้วบันทึกภาพลายนิ้วมือภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตและประเมินคุณภาพด้วยผู้เชี่ยวชาญในลักษณะเดียวกัน จากผลการประเมินจะคัดเลือกอุณหภูมิที่ให้คะแนนเฉลี่ยคุณภาพลายนิ้วมือสูงสุดเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป

ลายนิ้วมือที่ให้ผลดีที่สุดจากการทดลองอุณหภูมิถูกนำไปศึกษาผลของระยะห่างระหว่างกระดาษเทอร์มอลกับแหล่งให้ความร้อน โดยกำหนดระยะห่างเป็น 0.5 1 และ 2 เซนติเมตร พร้อมทำซ้ำในแต่ละระยะห่างจำนวน 5 ครั้ง จากนั้นบันทึกภาพลายนิ้วมือภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตและประเมินคุณภาพเช่นเดิม ข้อมูลที่ได้จากทั้งสามตัวแปร คือ แรงกด อุณหภูมิ และระยะห่าง จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อระบุสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตรวจลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอลด้วยวิธีให้ความร้อนและนำไปศึกษาการตรวจลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอลที่เปื้อนเครื่องดื่มต่อไป

3.3.2 การศึกษาลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอลที่เปื้อนเครื่องดื่ม

ประทับนิ้วหัวแม่มือของอาสาสมัครลงบนกระดาษเทอร์มอล 3 ประเภท ได้แก่ กระดาษแฟกซ์ ใบเสร็จรับเงินจากร้านค้า และใบบันทึกเอทีเอ็ม โดยควบคุมแรงกดในการประทับที่ 800–1,000 กรัม ใช้การประทับบนกระดาษที่วางไว้บนเครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความละเอียดสองตำแหน่งทศนิยม และกำหนดระยะเวลากดประทับค้างไว้ 10 วินาที ต่อกระดาษ 1 แผ่น ทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ซ้ำบนกระดาษแต่ละประเภท จากนั้นนำกระดาษแต่ละประเภทไปจุ่มใน น้ำเปล่า เป็นเวลา 1 นาที ผึ่งให้แห้งในสภาพแวดล้อมห้องปกติ เมื่อตัวอย่างแห้งสนิทแล้ว นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และระยะห่างระหว่างกระดาษกับแหล่งให้ความร้อนที่ 0.5 เซนติเมตร เมื่อดำเนินการแล้ว นำกระดาษเทอร์มอลทั้งหมดไปบันทึกภาพลายนิ้วมือแฝงภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต ทำการทดลองซ้ำกับเครื่องดื่มประเภทต่างๆคือ น้ำอัดลม โซดา กาแฟนม และน้ำมะนาว

นำภาพถ่ายให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญด้านการตรวจพิสูจน์ลายนิ้วมือแฝง สังกัดศูนย์พิสูจน์หลักฐานตำรวจ ภาค 7 มีประสบการณ์ปฏิบัติงานด้านการตรวจลายนิ้วมือแฝงมากกว่า 15 ปี ประเมินให้คะแนนคุณภาพของลายนิ้วมือที่ปรากฏ ใช้เกณฑ์การให้คะแนน 5 ระดับ (0–4) อ้างอิงแนวคิดการประเมินคุณภาพลายนิ้วมือแฝงที่ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์สากล โดยพิจารณาจากจำนวนและความชัดเจนของจุดลักษณะสำคัญพิเศษ (minutiae points) และลายเส้นหลักของลายนิ้วมือ ดังนี้ ระดับ 0 หมายถึง ไม่ปรากฏลายเส้นของลายนิ้วมือเลย ระดับ 1 หมายถึง พบลายเส้นเลอะเลือน ปรากฏลายเส้นเพียงเล็กน้อย ไม่สามารถใช้ในการเปรียบเทียบได้ ระดับ 2 หมายถึง ปรากฏลายเส้นของลายนิ้วมือ แต่ยังไม่ชัดเจนเพียงพอสำหรับการระบุหรือเปรียบเทียบจุดลักษณะสำคัญพิเศษได้อย่างมั่นใจ ระดับ 3 หมายถึง ลายนิ้วมือมีคุณภาพระดับปานกลาง สามารถตรวจพบจุดลักษณะสำคัญพิเศษได้ประมาณ 10–12 จุด ซึ่งอาจนำไปใช้ในการเปรียบเทียบเบื้องต้นได้ และระดับ 4 หมายถึง ลายนิ้วมือมีคุณภาพดีมาก ลายเส้นปรากฏชัดเจนและสมบูรณ์ สามารถตรวจพบจุดลักษณะสำคัญพิเศษได้มากกว่า 12 จุด เหมาะสมต่อการใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อระบุตัวบุคคลในทางนิติวิทยาศาสตร์ ทั้งนี้ เกณฑ์การระบุตัวบุคคล

ดังกล่าวเป็นไปตามแนวทางมาตรฐานสากล ซึ่งพิจารณาทั้งจำนวนและคุณภาพของจุดลักษณะสำคัญพิเศษร่วมกับความต่อเนื่องของลายเส้น เพื่อให้ผลการตรวจพิสูจน์มีความถูกต้องและเชื่อถือได้ (Champod et al., 2016; Ramotowski, 2020)

นอกจากนี้ เพื่อให้สอดคล้องกับการวิเคราะห์เชิงปริมาณและการรายงานผล ผู้วิจัยได้กำหนดช่วงการแปลผลจากคะแนนเฉลี่ย (mean score) เพื่อใช้ในการตัดสินคุณภาพของลายนิ้วมือแฝง ดังนี้: 0.00–0.99 หมายถึง ไม่ปรากฏลายนิ้วมือ, 1.00–1.99 หมายถึง คุณภาพต่ำ, 2.00–2.99 หมายถึง คุณภาพต่ำถึงปานกลาง, 3.00–3.79 หมายถึง คุณภาพปานกลางถึงดี และ 3.80–4.00 หมายถึง คุณภาพดีมาก ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการระบุตัวบุคคลได้

บันทึกคะแนนรอยลายนิ้วมือแฝงแต่ละตัวอย่าง นำค่าคะแนนที่ได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย (mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation; SD) เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงภายใต้สภาวะต่าง ๆ ต่อไป

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการศึกษาคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอลภายใต้สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้งในแต่ละเงื่อนไข พบว่าแรงกดประทับ อุณหภูมิของแท่นให้ความร้อน และระยะห่างระหว่างกระดาษกับแหล่งความร้อนมีผลโดยตรงต่อความคมชัดและคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงที่ปรากฏ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คะแนนเฉลี่ย ($\bar{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของคุณภาพลายนิ้วมือแฝงจากการศึกษาแรงกด อุณหภูมิ และระยะห่างระหว่างกระดาษเทอร์มอลกับแท่นให้ความร้อน (n=5)

ตัวแปร	ระดับตัวแปร	$\bar{X}$	S.D.
แรงกดประทับ (g)	$600 \leq x < 800$	3.80	0.45
	$800 \leq x < 1,000$	4.00	0.00
	$1,000 \leq x \leq 1,200$	3.60	0.55
อุณหภูมิแท่นให้ความร้อน (°C)	X = 60	3.60	0.89
	X = 100	4.00	0.00
	X = 200	1.40	1.14
ระยะห่าง (cm)	0.50	4.00	0.00
	1.00	4.00	0.00
	2.00	3.60	0.55

จากตารางพบว่า การประเมินคุณภาพลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอลจากตัวแปรทั้งสาม ได้แก่ แรงกดประทับ อุณหภูมิของแท่นให้ความร้อน และระยะห่างระหว่างกระดาษกับแหล่งให้ความร้อน แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการควบคุมทางกายภาพมีผลโดยตรงต่อความคมชัดและรายละเอียดของลายนิ้วมือแฝงที่ปรากฏ

แรงกดประทับในช่วง 800–1,000 กรัมให้ผลการทดลองดีที่สุด โดยลายนิ้วมือที่ปรากฏมีลายเส้นต่อเนื่อง คมชัด และสามารถระบุจุดลักษณะสำคัญพิเศษได้ครบถ้วน ส่งผลให้ได้ค่าคะแนนคุณภาพลายนิ้วมือแฝงเฉลี่ยสูงสุด ($\bar{X}=4.00$, S.D. = 0.00) และมีความสม่ำเสมอของผลการทดลองจากการทำซ้ำทั้งหมด ขณะที่แรงกดต่ำกว่า 800 กรัม (600–800 กรัม, $\bar{X} = 3.80$, S.D. = 0.45) ให้ลายนิ้วมือที่มีลายเส้นไม่ต่อเนื่องจากการถ่ายโอนสารคัดหลั่งที่ไม่สมบูรณ์ ส่วนแรงกดที่สูงกว่า 1,000 กรัม (1,000–1,200 กรัม, $\bar{X} = 3.60$, S.D. = 0.55) ให้ลายเส้นกระจายและทับซ้อน ส่งผลให้รายละเอียดของลายนิ้วมือถูกบดบัง ซึ่งเป็นลักษณะที่สอดคล้องกับรายงานที่ว่าแรงกดที่มากเกินไปมีแนวโน้มทำให้รอยลายนิ้วมือสูญเสียรายละเอียดและเกิดปื้นของลายเส้น (Cantu & Johnson, 2021)

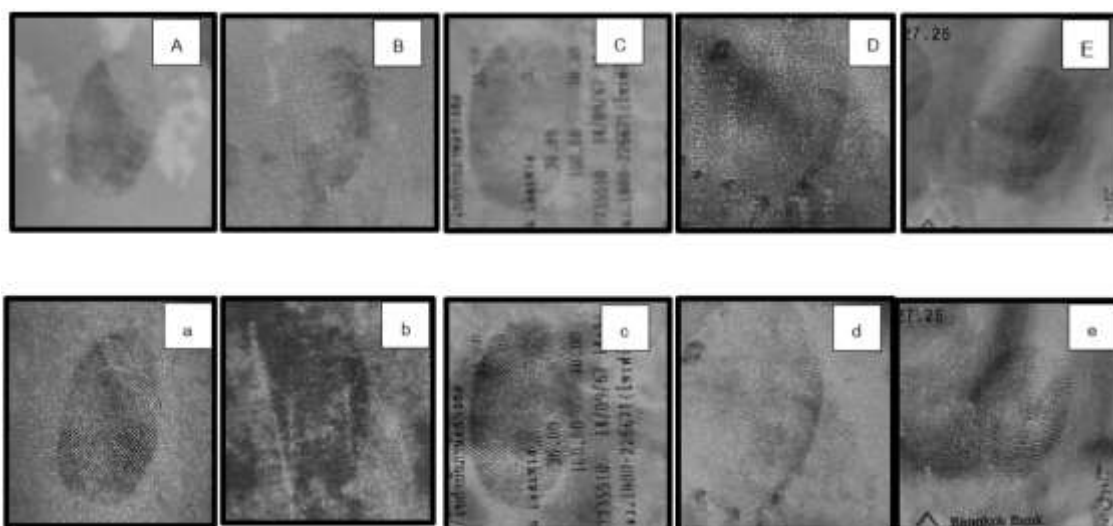
การทดลองพบว่าอุณหภูมิแท่นให้ความร้อนที่ 100 °C เหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาลายนิ้วมือแฝง โดยให้คะแนนเฉลี่ยคุณภาพลายนิ้วมือและความคมชัดสูงสุด ($\bar{X}=4.00$, S.D. = 0.00) ขณะที่อุณหภูมิ 60 °C ($\bar{X} = 3.60$, S.D. = 0.89) ให้ลายเส้นค่อนข้างจางเนื่องจากพลังงานความร้อนไม่เพียงพอ ส่วนอุณหภูมิ 200 °C ($\bar{X} = 1.40$, S.D. = 1.14) ทำให้กระดาษเทอร์มอลเปลี่ยนสี เกิดรอยไหม้ และสูญเสียรายละเอียดของลายนิ้วมืออย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ramotowski (2020) ที่ชี้ให้เห็นว่าการใช้ความร้อนที่สูงเกินไปบนกระดาษเทอร์มอลจะเร่งการเปลี่ยนแปลงของชั้นเคลือบของกระดาษเทอร์มอลจนกลบลักษณะของลายนิ้วมือแฝงเดิม (Ramotowski, 2020)

สำหรับระยะห่างระหว่างกระดาษเทอร์มอลกับแท่นให้ความร้อน พบว่าระยะห่าง 0.5 และ 1 เซนติเมตร ให้คะแนนเฉลี่ยคุณภาพลายนิ้วมือแฝงเท่ากันและอยู่ในระดับสูงสุด ($\bar{X} = 4.00$, S.D. = 0.00 ทั้งสองระยะ) โดยลายนิ้วมือมีความคมชัดดี อย่างไรก็ตาม ในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองขั้นถัดไป ผู้วิจัยเลือกใช้ระยะห่าง 0.5 เซนติเมตร เนื่องจากเป็นระยะที่ให้การถ่ายเทความร้อนสู่ผิวกระดาษได้โดยตรงและสม่ำเสมอมากกว่า อีกทั้งช่วยลดการสูญเสียพลังงานความร้อนระหว่างแหล่งกำเนิดและพื้นผิววัตถุ เมื่อเพิ่มระยะห่างเป็น 2 เซนติเมตร ($\bar{X} = 3.60$, S.D. = 0.55) ความคมชัดของลายนิ้วมือแฝงลดลง เนื่องจากพลังงานความร้อนกระจายตัวและถ่ายเทสู่ผิวกระดาษได้ไม่เพียงพอ ส่งผลให้ลายนิ้วมือเห็นไม่ชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอของ Cantu และ Johnson (2021) ที่ระบุว่า การเพิ่มระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนและพื้นผิววัตถุทำให้พลังงานความร้อนที่ตกกระทบลดลงและส่งผลกระทบต่อคุณภาพของลายนิ้วมือที่ปรากฏ (Cantu & Johnson, 2021)

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอลด้วยความร้อนในงานวิจัยนี้ คือ ใช้ แรงกดประทับ 800–1,000 กรัม อุณหภูมิแท่นให้ความร้อน 100 °C และระยะห่างระหว่างกระดาษกับแท่นความร้อน 0.5–1 เซนติเมตร ซึ่งให้คะแนนคุณภาพลายนิ้วมือแฝงสูงสุดและให้ลายเส้นที่ชัดเจนต่อเนื่อง

ผลของการปนเปื้อนเครื่องดื่มต่อคุณภาพลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอลก่อนและหลังให้ความร้อน

จากการศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอลที่เปื้อนด้วยเครื่องดื่มชนิดต่าง ๆ ก่อนและหลังการให้ความร้อน โดยทำการทดลองซ้ำในแต่ละเงื่อนไขจำนวน 5 ครั้ง ($n = 5$) พบว่าชนิดของเครื่องดื่มที่ปนเปื้อนมีผลอย่างชัดเจนต่อประสิทธิภาพของการตรวจหารอยลายนิ้วมือแฝง และการให้ความร้อนสามารถช่วยเพิ่มความชัดเจนของลายนิ้วมือแฝงได้ในระดับที่แตกต่างกันตามลักษณะของกระดาษและองค์ประกอบทางเคมีของเครื่องดื่ม สำหรับเครื่องดื่มที่ใช้ในการศึกษาเป็นตัวแทนของสารที่มีคุณสมบัติทางเคมีแตกต่างกัน ได้แก่ น้ำเปล่า (pH ≈ 7 ไม่มีสีและน้ำตาล) โซดา (มีคาร์บอนไดออกไซด์ละลาย ไม่มีสี pH $\approx 5.0-6.0$) น้ำอัดลม (มีกรดอินทรีย์ น้ำตาล และสารให้สี pH $\approx 2.5-3.5$) กาแฟนม (มีองค์ประกอบของไขมัน โปรตีน น้ำตาล และมีสีเข้ม) และน้ำมะนาว (มีกรดซิตริกสูง pH $\approx 2-3$) โดยองค์ประกอบดังกล่าว เช่น ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณน้ำตาล สี และสารประกอบอินทรีย์ อาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวกระดาษเทอร์มอลและการคงอยู่ของสารสีหลังในลายนิ้วมือแฝง ซึ่งสอดคล้องกับที่ได้กล่าวไว้ในบทนำ ผลการทดลองแสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 1 รอยลายนิ้วมือแฝงที่เปื้อนด้วยเครื่องดื่มชนิดต่าง ๆ บนกระดาษเทอร์มอล ก่อนและหลังการให้ความร้อน และส่วนคะแนนคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงก่อนและหลังให้ความร้อนบนกระดาษเทอร์มอลชนิดต่าง ๆ ที่เปื้อนเครื่องดื่มแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 1 รอยลายนิ้วมือแฝงที่เปื้อนด้วยเครื่องดื่มชนิดต่าง ๆ บนกระดาษเทอร์มอล ก่อนและหลังการให้ความร้อน โดยภาพก่อนการให้ความร้อนประกอบด้วย (A) กระดาษแฟกซ์เปื้อนน้ำเปล่า, (B) กระดาษแฟกซ์เปื้อนน้ำอัดลม, (C) ใบเสร็จร้านสะดวกซื้อเปื้อนโซดา, (D) ใบเสร็จร้านสะดวกซื้อเปื้อนกาแฟนม และ (E) ใบบันทึกเอทีเอ็มเปื้อนน้ำมะนาว ส่วนภาพหลังการให้ความร้อนแสดงตัวอย่างในเงื่อนไขเดียวกันตามลำดับ (a-e)

ตารางที่ 2 คะแนนคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงก่อนและหลังให้ความร้อนบนกระดาษเทอร์มอลชนิดต่าง ๆ ที่เปื้อนเครื่องดื่ม (n=5)

ชนิดกระดาษ	เครื่องดื่ม	ก่อนให้ความร้อน ($\bar{X} \pm S.D.$)	หลังให้ความร้อน ($\bar{X} \pm S.D.$)
กระดาษแฟกซ์	น้ำเปล่า	3.50 $\pm$ 0.45	4.00 $\pm$ 0.00
	น้ำอัดลม	2.40 $\pm$ 1.51	2.60 $\pm$ 1.34
	โซดา	3.00 $\pm$ 0.71	3.80 $\pm$ 0.45
	กาแฟนม	1.80 $\pm$ 0.82	2.40 $\pm$ 0.55
	น้ำมะนาว	3.80 $\pm$ 0.45	4.00 $\pm$ 0.00
ใบเสร็จร้านค้า	น้ำเปล่า	4.00 $\pm$ 0.00	4.00 $\pm$ 0.00
	น้ำอัดลม	2.40 $\pm$ 1.51	2.60 $\pm$ 1.34
	โซดา	3.80 $\pm$ 0.45	4.00 $\pm$ 0.00
	กาแฟนม	2.20 $\pm$ 1.38	2.80 $\pm$ 1.30
	น้ำมะนาว	4.00 $\pm$ 0.00	4.00 $\pm$ 0.00
ใบบันทึกเอทีเอ็ม	น้ำเปล่า	2.60 $\pm$ 0.89	3.20 $\pm$ 0.84
	น้ำอัดลม	1.40 $\pm$ 0.90	2.00 $\pm$ 1.22
	โซดา	2.20 $\pm$ 0.84	2.60 $\pm$ 0.90
	กาแฟนม	1.00 $\pm$ 1.22	1.80 $\pm$ 1.30
	น้ำมะนาว	3.60 $\pm$ 0.55	4.00 $\pm$ 0.00

หมายเหตุ: ค่าแสดงเป็นค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

จากตารางสำหรับกระดาษแฟกซ์ที่เปื้อนด้วยน้ำเปล่า โซดา และน้ำมะนาว พบว่าลายนิ้วมือแฝงก่อนให้ความร้อนมีคุณภาพอยู่ในระดับปานกลางถึงดีมาก โดยมีค่าเฉลี่ยคะแนนคุณภาพอยู่ในช่วง 3.00–3.80 หลังการให้ความร้อน ค่าเฉลี่ยคะแนนคุณภาพเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจนอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X} \approx 3.80$ –4.00) ลายนิ้วมือที่ปรากฏมีลายเส้นต่อเนื่องและสามารถระบุจุดลักษณะสำคัญพิเศษได้เพียงพอสำหรับการตรวจพิสูจน์เพื่อยืนยันอัตลักษณ์บุคคล ในทางตรงกันข้าม กระดาษแฟกซ์ที่เปื้อนด้วยน้ำอัดลมและกาแฟนมให้ลายนิ้วมือแฝงที่มีคุณภาพต่ำ โดยแม้หลังให้ความร้อนแล้วค่าคะแนนเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ลายเส้นที่ปรากฏยังไม่ชัดเจนเพียงพอสำหรับการใช้ในการระบุตัวบุคคลทางนิติวิทยาศาสตร์ สำหรับผลการศึกษากับใบเสร็จร้านค้าพบแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยใบเสร็จที่เปื้อนด้วยน้ำเปล่า โซดา และน้ำมะนาวให้ลายนิ้วมือแฝงที่มีคุณภาพดีถึงดีมากตั้งแต่ก่อนให้ความร้อน และหลังให้ความร้อนค่าคะแนนคุณภาพเพิ่มขึ้นจนอยู่ในระดับสูงสุด ลายนิ้วมือที่ได้มีความคมชัดและสามารถนำไปใช้ในการตรวจพิสูจน์อัตลักษณ์บุคคลได้ ในขณะที่ใบเสร็จร้านค้าที่เปื้อนด้วยน้ำอัดลมและกาแฟนมให้ลายนิ้วมือแฝงที่มีคุณภาพต่ำถึงปานกลาง แม้การให้ความร้อนจะช่วยเพิ่มค่าคะแนนเฉลี่ยขึ้นบ้าง แต่รายละเอียดของลายเส้นยังไม่ชัดเจนเพียงพอสำหรับการใช้งานเชิงนิติวิทยาศาสตร์ สำหรับใบบันทึกเอทีเอ็ม พบว่ากระดาษที่เปื้อนด้วยน้ำมะนาวให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยลายนิ้วมือแฝงหลังให้ความร้อนมีคุณภาพอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X} \approx 4.00$) และสามารถระบุจุดลักษณะสำคัญพิเศษได้ชัดเจน ในขณะที่ใบบันทึกเอทีเอ็มที่เปื้อนด้วยน้ำเปล่า น้ำอัดลม โซดา และกาแฟนมให้ลายนิ้วมือแฝงที่มีคุณภาพต่ำถึงปานกลาง แม้หลังการให้ความร้อนแล้วค่าคะแนนเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้น แต่ยังไม่เพียงพอสำหรับการยืนยันตัวบุคคลอย่างมั่นคง

เมื่อพิจารณาผลการทดลองพบว่าเครื่องดื่มที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน เช่น น้ำเปล่าและโซดา ส่งผลต่อโครงสร้างของกระดาษเทอร์มอลและลายนิ้วมือแฝงน้อย ทำให้ลายเส้นยังคงสภาพสมบูรณ์ ในทางตรงกันข้าม น้ำอัดลมซึ่งมีน้ำตาลและสารให้สี ทั้งคราบบนพื้นผิวกระดาษหลังการแห้ง ส่งผลให้ลายเส้นของลายนิ้วมือถูกปิดทับและความคมชัดลดลง ส่วนกาแฟนมซึ่งนมมีสารอิมัลซิไฟเออร์ สารนี้สามารถชะล้างไขมันที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของลายนิ้วมือแฝงออกจากพื้นผิวได้ โดยโมเลกุลของอิมัลซิไฟเออร์จะจัดเรียงตัวให้ส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำทำหน้าที่เชื่อมระหว่างน้ำและไขมัน ส่งผลให้ร่องรอยลายนิ้วมือ

สูญเสียความชัดเจนได้ (Braun et al., 2019) ในกรณีของน้ำมะนาว พบว่าลายนิ้วมือแฝงมีคุณภาพสูงบนกระดาษเทอร์มอลทุกประเภทที่ศึกษา โดยเฉพาะหลังการให้ความร้อน ซึ่งสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของทั้งน้ำมะนาวและกระดาษเทอร์มอล โดยน้ำมะนาวมีกรดซิตริก อาจเกิดปฏิกิริยากับชั้นสารเคลือบผิวความร้อนของกระดาษเทอร์มอล โดยกรดซิตริกอาจทำให้ค่า pH บริเวณที่มีสารคัดหลั่งของลายนิ้วมือเป็นกรดมากขึ้น ส่งผลต่อสมดุลปฏิกิริยาระหว่างตัวรับสีในชั้นสารเคลือบผิวความร้อนของกระดาษเทอร์มอล (เช่น บิสฟีนอลเอ (Bisphenol A: BPA) และบิสฟีนอลเอส (Bisphenol S: BPS)) ให้เกิดการเปลี่ยนสีเด่นชัดเฉพาะบริเวณรอยลายนิ้วมือ เมื่อได้รับความร้อน ทำให้ลายนิ้วมือแฝงมีความคมชัดและติดกับพื้นหลังของกระดาษได้ดี (Ramotowski, 2020; Cantu & Johnson, 2021) นอกจากนี้ กรดซิตริกยังอาจทำให้โปรตีนในสารคัดหลั่งของลายนิ้วมือเสียสภาพ เมื่อได้รับความร้อนโปรตีนเหล่านี้จะรวมตัวเป็นโครงสร้างที่ดัดกลืนและกระเจิงแสงมากขึ้น ทำให้ลายนิ้วมือปรากฏเป็นเส้นและจุดสีเข้มที่มองเห็นได้ชัดได้ (Bécue, 2018)

ชนิดและองค์ประกอบของกระดาษเทอร์มอลมีผลต่อประสิทธิภาพการพัฒนาลายนิ้วมือแฝงอย่างชัดเจน โดยกระดาษแฟกซ์ ใบเสร็จรับเงิน และใบบันทึกเอทีเอ็มให้ผลต่างกันด้านอุณหภูมิเริ่มเกิดสี ความไวต่อความร้อน และลักษณะการเปลี่ยนสี อันเนื่องมาจากความแตกต่างของชั้นเคลือบผิวความร้อนและสารเติมแต่ง ส่งผลต่อความคมชัด สีพื้น และสัญญาณรบกวนของลายนิ้วมือ ดังนั้น ผลจากกระดาษชนิดหนึ่งไม่อาจเหมารวมใช้กับทุกชนิดได้ และการนำเทคนิคการให้ความร้อนไปใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์ควรคำนึงถึงชนิดของกระดาษและทดสอบหรือจัดกลุ่มกระดาษก่อนกำหนดแนวปฏิบัติมาตรฐาน (Bécue, 2018; Noller & Grohmann, 2019) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบก่อนและหลังการให้ความร้อน (ตารางที่ 2) พบว่าคุณภาพลายนิ้วมือแฝงเพิ่มขึ้นในทุกกรณี สอดคล้องกับหลักการที่ชั้นเคลือบผิวความร้อนของกระดาษตอบสนองต่อพลังงานความร้อน โดยบริเวณที่มีน้ำ ไขมัน และสารอินทรีย์จากลายนิ้วมือจะดูดซับความร้อนได้มากกว่า และกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนสีเฉพาะบริเวณสันลายและร่องลาย ทำให้รายละเอียดและจุดลักษณะสำคัญของลายนิ้วมือปรากฏเด่นชัดยิ่งขึ้น

5. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า เทคนิคการให้ความร้อนเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมต่อการใช้เพื่อตรวจลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษเทอร์มอล โดยคุณภาพของลายนิ้วมือที่ได้ขึ้นอยู่กับการควบคุมปัจจัยทางกายภาพอย่างเหมาะสม ได้แก่ แรงกดของลายนิ้วมือ อุณหภูมิของแท่นให้ความร้อน และระยะห่างระหว่างกระดาษกับแหล่งความร้อน ซึ่งการปรับสภาวะเหล่านี้ให้เหมาะสมสามารถสร้างลายนิ้วมือแฝงที่มีความคมชัดเพียงพอต่อการระบุตัวบุคคลได้อย่างน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่า ชนิดและองค์ประกอบทางเคมีของสารปนเปื้อนมีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพของลายนิ้วมือแฝง โดยเครื่องดื่มที่มีองค์ประกอบอย่างง่าย เช่น น้ำเปล่าและโซดา แม้โซดาจะมีลักษณะใสและไม่มีน้ำตาลเช่นเดียวกับน้ำเปล่า แต่มีค่าความเป็นกรดต่ำกว่าเนื่องจากการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ก่อให้เกิดกรดคาร์บอนิก อย่างไรก็ตาม ทั้งสองชนิดมีปริมาณสารอินทรีย์ต่ำและไม่มีสี จึงรบกวนโครงสร้างของกระดาษเทอร์มอลและองค์ประกอบของลายนิ้วมือแฝงค่อนข้างน้อย ส่งผลให้สามารถพัฒนาลายนิ้วมือได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกรณีของน้ำมะนาว ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญคือกรดซิตริกและมีค่าความเป็นกรด (pH ประมาณ 2–3) พบว่ามีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความคมชัดของลายนิ้วมือแฝง โดยกรดซิตริกสามารถส่งผลต่อสมดุลทางเคมีของชั้นสารเคลือบผิวความร้อนของกระดาษเทอร์มอล (เช่น สารกลุ่มบิสฟีนอล) ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีที่เด่นชัดเฉพาะบริเวณที่มีสารคัดหลั่งของลายนิ้วมือเมื่อได้รับความร้อน นอกจากนี้ สภาพกรดอาจทำให้โปรตีนในลายนิ้วมือเกิดการเสียสภาพ และรวมตัวกัน ส่งผลให้เกิดการดัดกลืนและกระเจิงแสงเพิ่มขึ้น จึงทำให้ลายเส้นของลายนิ้วมือปรากฏชัดเจนมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม เครื่องดื่มที่มีองค์ประกอบซับซ้อน เช่น น้ำอัดลมและกาแฟ ซึ่งมีน้ำตาล สี และสารอินทรีย์ รวมถึงไขมันและสารอิมัลซิไฟเออร์ สามารถทั้งคราบหรือรบกวนองค์ประกอบของลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวกระดาษ ส่งผลให้ลายเส้นถูกปิดทับหรือสูญเสียความคมชัด แม้ภายหลังการให้ความร้อนแล้วก็ตาม

ดังนั้นเทคนิคการให้ความร้อนเป็นวิธีการที่ง่าย ใช้อุปกรณ์ทั่วไป ต้นทุนต่ำ แต่สามารถให้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้ในงานนิติวิทยาศาสตร์ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถเป็นแนวทางเบื้องต้นในการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการตรวจพิสูจน์หลักฐาน และสามารถต่อยอดสู่การศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับผลขององค์ประกอบทางเคมีของกระดาษและสารปนเปื้อนต่อประสิทธิภาพการพัฒนาลายนิ้วมือด้วยความร้อน ซึ่งจะช่วยเสริมความเข้าใจทางวิชาการและสนับสนุนการประยุกต์ใช้งานจริงในการพิสูจน์อัตลักษณ์บุคคลอย่างเป็นระบบและยั่งยืน

6. ข้อเสนอแนะ

1. ควรเพิ่มจำนวนอาสาสมัคร เพื่อประเมินผลกระทบของความแตกต่างเชิงชีวภาพของสารคัดหลั่งต่อคุณภาพลายนิ้วมือแฝง
2. เปรียบเทียบวิธีการให้ความร้อนกับเทคนิคการพัฒนาลายนิ้วมือแฝงอื่น ๆ เช่น วิธีทางเคมีหรือวิธีผสมผสาน เพื่อประเมินประสิทธิภาพและข้อจำกัดในเชิงปฏิบัติ

7. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย โครงการหลักสูตรบัณฑิตศึกษา สาขานิติวิทยาศาสตร์ จากกองทุนพัฒนามหาวิทยาลัยศิลปากรในส่วนของคณะวิทยาศาสตร์ สาขานิติวิทยาศาสตร์ สัญญาเลขที่ SC-FS-2568-02

8. เอกสารอ้างอิง

- Bécue, A. (2018). Chemical enhancement of latent fingerprints. *Forensic Science International*, 288, 13–27.
- Bécue, A. (2021). Recent advances in fingermark detection and interpretation. *Forensic Science International*, 328, 111038.
- Bleay, S., Croxton, R., & Puit, M. (2021). *Fingerprints and other ridge skin impressions* (2nd ed.). CRC Press.
- Bond, J. W. (2014). Visualization of latent fingerprints on thermal paper by heat. *Journal of Forensic Identification*, 64(2), 123–134.
- Braun, M., Fritzsche, J., & Müller, K. (2019). Emulsifiers and their interactions with lipids and proteins. *Food Chemistry*, 274, 203–212.
- Cantu, A. A., & Johnson, J. L. (2021). Thermal paper: Chemistry, imaging, and forensic challenges. *Forensic Chemistry*, 23, 100327.
- Champod, C., Lennard, C., Margot, P., & Stoilovic, M. (2016). *Fingerprints and other ridge skin impressions* (2nd ed.). CRC Press.
- Daluz, H. M. (2014). *Fundamentals of fingerprint analysis*. CRC Press.
- Girod, A., & Weyermann, C. (2022). *Fingerprint evidence evaluation and interpretation*. Wiley.
- Girod, A., Ramotowski, R., & Weyermann, C. (2021). Chemical analysis of fingermarks: Current status and future perspectives. *Forensic Chemistry*, 23, 100312.
- Houck, M. M. (2022). *Forensic science: Modern methods and applications* (2nd ed.). Academic Press.
- Houck, M. M., & Siegel, J. A. (2015). *Fundamentals of forensic science* (3rd ed.). Academic Press.
- James, S. H., Nordby, J. J., & Bell, S. (2019). *Forensic science: An introduction to scientific and investigative techniques* (5th ed.). CRC Press.
- Johnson, J. L., Cantu, A. A., & Bartick, E. G. (2020). Effects of liquid contamination on latent fingerprints on thermal paper. *Journal of Forensic Sciences*, 65(2), 546–553.
- Ninsuwan, S. (2018). *Development of latent fingerprints on thermal paper using heat treatment* (Master's thesis, Silpakorn University).
- Ramotowski, R. (2020). *Lee and Gaensslen's advances in fingerprint technology* (3rd ed.). CRC Press.
- Saferstein, R. (2020). *Criminalistics: An introduction to forensic science* (13th ed.). Pearson Education.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ชื่อ-สกุล : ortsay chiewpum
คุณวุฒิสูงสุด : ปริญญาเอก
ตำแหน่งงาน : อาจารย์
หน่วยงานที่สังกัด : ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
E-Mail : kheawpum_o@su.ac.th



ชื่อ-สกุล : huthai panthasang
คุณวุฒิสูงสุด : ปริญญาโท
สถานศึกษา : โครงการนิติวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
E-Mail : puifaiharuthai@gmail.com



ชื่อ-สกุล : sirirattana chusakoonkrian
คุณวุฒิสูงสุด : ปริญญาเอก
ตำแหน่งงาน : อาจารย์
หน่วยงานที่สังกัด : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
E-Mail : choosakoonkrian_s@su.ac.th



ชื่อ-สกุล : pashrapon srisuvarn
คุณวุฒิสูงสุด : ปริญญาเอก
ตำแหน่งงาน : ตำรวจพิสูจน์หลักฐาน
หน่วยงานที่สังกัด : ศูนย์พิสูจน์หลักฐาน 7 สำนักงานตำรวจแห่งชาติ
E-Mail : pashrapon38@hotmail.com

การประยุกต์ใช้กระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจาก
เส้นใยฟางข้าวผสมกับกระดาษรีไซเคิลเพื่อชะลอการสุกของกล้วย
Application of Activated Carbon-Coated Paper Produced from
a Blend of Rice Straw Fibers and Recycled Paper to Delay Banana Ripening

แววบุญ แยมแสงสังข์

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

บางพูด ปากเกร็ด นนทบุรี 11120, weawboon.yam@stou.ac.th

Weawboon Yamsaengsung

School of Science and Technology Sukhothai Thammathirat Open University, Bang Phut, Pak Kret,

Nonthaburi 11120, weawboon.yam@stou.ac.th

วันที่รับบทความ 29 มกราคม 2569

วันแก้ไขบทความ 6 กุมภาพันธ์ 2569

วันตอบรับบทความ 11 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระดาษเคลือบถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากฟางข้าวผสมกับกระดาษรีไซเคิล ที่อัตราส่วน 75:25 โดยน้ำหนัก โดยเคลือบผิวกระดาษด้วยสารละลายที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรผสมกับผงถ่านกัมมันต์ร้อยละ 30 เพื่อใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษากล้วยหอมทอง โดยศึกษาสมบัติของกระดาษที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษากล้วยหอม เปรียบเทียบกับสารดูดซับเอทิลีนที่จำหน่ายทางการค้า โดยทำการทดลองบรรจุกล้วยลงในกล่องกระดาษลูกฟูก ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3, 6, 9, 12 และ 15 วัน จากนั้นนำกล้วยออกมาตรวจสอบค่าการสูญเสีย น้ำหนัก การเปลี่ยนแปลงของสี ความแน่นเนื้อ และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดของกล้วย ผลการทดลองพบว่ากล้วยในกล่องกระดาษลูกฟูก (ควบคุม) มีอายุการเก็บรักษา 3 วัน ในขณะที่กล้วยที่เก็บรักษาในกล่องกระดาษลูกฟูกที่บรรจุกระดาษเคลือบถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากฟางข้าวผสมกับกระดาษรีไซเคิล มีอายุการเก็บรักษา 6 วัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกล่องกระดาษลูกฟูกที่บรรจุสารดูดซับเอทิลีนทางการค้า มีอายุการเก็บรักษา 6 วัน ทำให้ทราบว่ากระดาษเคลือบถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากฟางข้าวผสมกับกระดาษรีไซเคิล ที่อัตราส่วน 75:25 มีสมบัติช่วยชะลอการสุกของกล้วยใกล้เคียงกับสารดูดซับเอทิลีนทางการค้า

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์, กล้วยหอม, กระดาษฟางข้าว, กระดาษรีไซเคิล

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the efficacy of an activated carbon-coated paper, fabricated from a 75:25 (w/w) blend of rice straw and recycled paper, in extending the shelf life of Gros Michel bananas (*Musa acuminata*). The coating solution was prepared using modified cassava starch blended with 30% activated carbon powder. To assess its potential for maintaining postharvest quality, the properties of the developed paper were analyzed and compared with those of commercial ethylene absorbers. Bananas were stored in corrugated boxes at 25 °C and monitored on days 3, 6, 9, 12, and 15 to evaluate weight loss, colorimetric changes, firmness, and total soluble solids (TSS). The results indicated that the control group had a shelf life of only 3 days. In contrast, bananas packaged with the activated carbon-coated paper maintained their quality for 6 days, a performance comparable to that of commercial ethylene absorbers.

These findings demonstrate that the developed paper serves as a promising and sustainable alternative for active packaging applications.

Keywords: Activated carbon, Bananas, Rice straw paper, Recycled Paper

1. บทนำ

กล้วยหอม (*Musa acuminata*.) เป็นผลไม้ที่มีการบริโภคและเพาะปลูกอย่างแพร่หลายที่สุดในโลก (Oliveira et al., 2025) ในประเทศไทยกล้วยหอมทองเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีศักยภาพสูง และเป็นทางเลือกสำคัญเพื่อความมั่นคงทางอาหาร ในอนาคต การสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว (Postharvest losses) และขยะอาหาร (Food waste) ในห่วงโซ่อุปทานเกษตรกรรม จัดเป็นประเด็นท้าทายเร่งด่วนที่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางอาหาร และเสถียรภาพทางเศรษฐกิจ ข้อจำกัดสำคัญของการส่งออกกล้วยหอมทองทั้งในตลาดภายในประเทศและต่างประเทศ คือ อายุการเก็บรักษาที่จำกัด เนื่องจากกล้วยหอมเป็นผลไม้ประเภท Climacteric fruit จึงมีกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในระยะการสุก (Ripening stage) ที่มีอัตราการหายใจและการสังเคราะห์แก๊สเอทิลีนเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาทางชีวเคมี และสรีรวิทยาในผลกล้วย เช่น การเปลี่ยนแปลงของรงควัตถุ รสชาติ และความแน่นเนื้อ นำไปสู่การเสื่อมสภาพ และการเน่าเสีย (Soutthixaiyalath et al., 2022) ซึ่งจำเป็นต้องมีการแก้เพื่อให้สอดคล้องกับแผนยุทธศาสตร์ชาติ และแนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืนของสหประชาชาติ (SDG) ข้อที่ 12 การสร้างหลักประกันให้มีแบบแผนการผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน และ SDG ข้อที่ 2 ความมั่นคงทางอาหาร เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีแนวคิดในการยับยั้งการทำงานและควบคุมปริมาณเอทิลีน ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการสุกตัวของกล้วย เช่น การเก็บรักษาในห้องเย็น การดัดแปลงสภาพบรรยากาศ (Modified Atmosphere) การใช้เทคโนโลยีทางเคมีและเทคโนโลยีวัสดุ เช่น การใช้สาร 1-MCP โฟแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต การใช้บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active Packaging) การเคลือบผิวหรือการผสมด้วยวัสดุที่มีรูพรุน เช่น Biochar ถ่านกัมมันต์ และ Zeolite (Charoensuk et al., 2024) แต่ยังคงพบข้อจำกัดในเชิงปฏิบัติ เช่น การเก็บรักษาในห้องเย็นมีต้นทุนสูง และเสี่ยงต่อการเกิดอาการสะท้านหนาว (Chilling Injury) การใช้ สาร 1-MCP ต้องควบคุมอย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำหรับเกษตรกรรายย่อย การใช้โฟแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต มีสีและมีความเป็นพิษ (Xiao et al., 2024)

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการเปลี่ยนเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีมูลค่าต่ำอย่างฟางข้าว ซึ่งมักถูกกำจัดด้วยการเผาในที่โล่งจนก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศในวงกว้าง ให้กลายเป็นทรัพยากรต้นน้ำที่มีมูลค่าสูง ทั้งในบทบาทของเส้นใยเสริมแรงเชิงกลและสารดูดซับเอทิลีน และการผสมเส้นใยฟางข้าวกับเยื่อกระดาษรีไซเคิล ช่วยยกระดับมูลค่าขยะจากกระบวนการอุตสาหกรรมและชุมชน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติในการควบคุมบรรยากาศและ ชะลอการเสื่อมสภาพของผลผลิตทางการเกษตรได้และมีคุณสมบัติในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ส่งเสริมแนวคิดวัสดุหมุนเวียนซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการลดการพึ่งพาพลาสติกสังเคราะห์ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร

งานวิจัยนี้เป็นการนำกระดาษเคลือบถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากฟางข้าวผสมกับกระดาษรีไซเคิล นำมาเป็นวัสดุดูดซับเอทิลีน เพื่อศึกษาสมบัติในการชะลอการสุกของกล้วยหอมที่บรรจุในกล่องกระดาษลูกฟูก โดยเปรียบเทียบกับสารดูดซับเอทิลีนทางการค้า โดยพื้นฐานเป็นกระดาษที่ผลิตจากฟางข้าวผสมกับกระดาษรีไซเคิล นำมาเคลือบด้วยถ่าน กัมมันต์ 30% โดยกระดาษรีไซเคิลเป็นของเสียแบบปฐมภูมิที่ได้จากการตัดเจียนภายในสำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาสมบัติในการชะลอการสุกของกล้วยหอมทอง โดยใช้กระดาษเคลือบถ่านกัมมันต์ ร้อยละ 30 ที่ผลิตจากฟางข้าวผสมกับกระดาษรีไซเคิล

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กลไกการสุกของกล้วย กล้วยเป็นผลไม้ในกลุ่ม Climacteric ที่มีวงจรการเจริญเติบโตจนถึงระยะเก็บเกี่ยวทางพาณิชย์ประมาณ 10–11 เดือนหลังปลูก โดยแบ่งเป็นระยะการพัฒนาดังแต่ปลูกจนถึงแทงปลี 7–8 เดือน และระยะพัฒนาการของผลหลังแทงปลี จนกระทั่งถึงระยะการเก็บเกี่ยวอีกประมาณ 70–80 วัน กล้วยจะเข้าสู่กระบวนการสุก การสุกของกล้วยควบคุมโดยปฏิกิริยาทางสรีรวิทยาและชีวเคมีโดยมีตัวเร่งคือ อัตราการหายใจการของกล้วยที่เพิ่มขึ้น และก๊าซเอทิลีนที่มีปริมาณสูงขึ้น การสุกของกล้วยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่สีของเปลือก เนื้อสัมผัสและกลิ่นรส กล่าวคือ กระบวนการเปลี่ยนสีของเปลือก ในกล้วยผลดิบบริเวณเปลือกจะเห็นเป็นสีเขียวของสารกลุ่มคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) อย่างเด่นชัด โดยคลอโรฟิลล์จะบดบังสีของ สารสีกลุ่มแคโรทีนอยด์ (Carotenoids) และแซนโทฟิลล์ (Xanthophylls) ไว้ เมื่อกล้วยสุกจะเห็นเปลือกกล้วยเป็นสีเหลืองเนื่องจากสารแคโรทีนอยด์ ที่เห็นสีเหลืองชัดเจนเนื่องจากคลอโรฟิลล์สลายตัวไป (จริงแท้, 2546) กระบวนการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัส พบว่าเกิดการอ่อนนุ่มของเนื้อเยื่อกล้วยอย่างรวดเร็ว เมื่อกล้วยสุกโครงสร้างผนังเซลล์ เช่น สารประกอบเพกทิน (Pectin) เกิดการย่อยสลาย มีการเปลี่ยนรูปจากแป้งในผลกล้วย (Starch) กลายเป็นน้ำตาล (Sugars) ตามลำดับ กระบวนการพัฒนาของกลิ่นรส เมื่อกล้วยสุกจะเกิดกลิ่นหอมเฉพาะตัวของกล้วยสุก เนื่องจากมีสารอินทรีย์ระเหยง่ายเกิดขึ้น (Seymour et al., 1993; Goulao & Oliveira, 2008)

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่ภายในเป็นจำนวนมาก ถ่านกัมมันต์เกิดจากการนำเอาวัตถุดิบจากธรรมชาติ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมาผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์แล้วทำให้วัตถุดิบนั้นมีโครงสร้างรูพรุน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะภายในสูงขึ้น ซึ่งโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์จะมีลักษณะคล้ายรังผึ้ง โดยถ่านกัมมันต์จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก 87–90% และมีธาตุอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน เป็นองค์ประกอบด้วย ปริมาณที่พบจะมีมากหรือน้อยเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุดิบ ถ่านกัมมันต์ เป็นวัสดุคาร์บอนที่มีลักษณะเด่นด้านพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (High specific surface area) และมีโครงสร้างรูพรุนภายในหนาแน่น ถ่านกัมมันต์สังเคราะห์ขึ้นจากวัตถุดิบธรรมชาติที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ผ่านกระบวนการกระตุ้น (Activation process) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุนภายในให้มีลักษณะคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb-like porous network) ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น ถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นธาตุหลักในสัดส่วนร้อยละ 87–90 โดยมวล โดยมีธาตุอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ และไนโตรเจน ผสมอยู่ในปริมาณน้อย โดยลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จะแปรผันตรงตามประเภทและคุณสมบัติเฉพาะของวัตถุดิบตั้งต้น ที่นำมาผ่านกระบวนการกระตุ้น (Alfatah et al., 2021) ถ่านกัมมันต์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ใช้ในกระบวนการทำสารเคมีให้บริสุทธิ์ หรือในกระบวนการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ดูดซับก๊าซ เนื่องจากมีสมบัติที่ดี เหมาะสมแก่การใช้งาน และมีราคาไม่แพงมาก (Devi et al., 2023) ทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับการผลิตกระดาษจากเส้นใยชนิดต่างๆ เช่น กระดาษจากกากกล้วย กระดาษจากเปลือกทุเรียน กระดาษจากตอซังข้าวโพด เพื่อใช้ในการดูดซับเอทิลีน ดังนี้ ศิริพร เติ่งรัง และคณะ (2561) ศึกษาการผลิตกระดาษดูดซับเอทิลีนจากเปลือกทุเรียนเพื่อใช้ยืดอายุการเก็บรักษาผัก และผลไม้ โดยใช้ผงถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับ 3 แบบ ในปริมาณที่เท่ากัน คือ ชนิดผง เม็ด และแท่ง พบว่ากระดาษดูดซับเอทิลีนที่ใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงมีประสิทธิภาพในการยืดอายุการเก็บรักษามะม่วงที่อุณหภูมิห้องได้ดีที่สุด จิตตา สาตร์เพชร และคณะ (2563) ศึกษาประสิทธิภาพของกระดาษดูดซับเอทิลีนจากกากกล้วย เพื่อยืดอายุการเก็บรักษากล้วยหอมทอง โดยเติมผงถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้น 0, 10, 20 และ 30% โดยน้ำหนักเยื่อแห้ง พบว่ากระดาษกากกล้วยผสมผงถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ยืดอายุการเก็บรักษากล้วยหอมทองได้นานที่สุด สุประภาดา วาตวงศ์ศรี และคณะ (2564) ได้พัฒนาและผลิตกระดาษจากตอซังข้าวโพดเพื่อชะลอการสุกของผลไม้ พบว่ากระดาษจากตอซังข้าวโพดแบบรวมมีคุณภาพดีที่สุด และผลการศึกษาการชะลอการสุกของกล้วยหอมทองเมื่อครบ 15 วัน พบว่ากล้วยหอมทองมีลักษณะของการสุกช้า เนื่องจากสีของเปลือกเปลี่ยนแปลงช้า เกิดการเปลี่ยนแปลงของกลิ่นหอมเล็กน้อย และมีการสูญเสียน้ำหนัก มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุด 0.3 กรัมเมื่อเทียบกับไม่มีการห่อผลกล้วยหอมทอง

การศึกษาเกี่ยวกับการใช้สารเคมีชนิดต่างๆ ในการดูดซับเอทิลีน เช่น ผงถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ดังนี้ ปริญญ์ ไกรวุฒินันท์ และคณะ (2563) ศึกษากระดาษดูดซับเอทิลีนผสมผงถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ไผ่และตอซังข้าวโพด เพื่อชะลอการสุกของกล้วยหอมทอง โดยเติมผงถ่านกัมมันต์ต่อปริมาณเยื่อกระดาษร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 พบว่ากระดาษผสมผงถ่านกัมมันต์สามารถยืดอายุการเก็บรักษาและการเปลี่ยนสีของกล้วยหอมทองได้นานกว่าชุด

ควบคุม โดยสามารถเก็บได้ถึง 12 วัน โดยสภาพเปลือกกล้วยยังมีสีเหลือง ขณะที่กล้วยในชุดควบคุมสามารถเก็บรักษาได้เพียง 6 วัน Jaimun and Sangsuwan (2019) ศึกษาการชะลอการสุกของผลไม้และการควบคุมโรคแอนแทรกโนส โดยนำกระดาษมาเคลือบด้วยสารละลาย vanillin chitosan ที่ปริมาณซีโอไลต์และถ่านกัมมันต์ที่ 0.1%, 0.2%, และ 0.4% ของปริมาณสารดูดซับ เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของสารดูดซับที่เหมาะสมและปริมาณเอทิลีนที่ถูกดูดซับได้ จากนั้นเลือกสภาวะที่ดีที่สุดนำมาทดลองห่อมะม่วงน้ำดอกไม้ ที่อุณหภูมิ 13 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 90% เป็นเวลา 30 วัน พบว่ากระดาษที่เคลือบด้วยซีโอไลต์ที่ 0.2% ดูดซับเอทิลีนได้ดีที่สุด ร่องรอยการเกิดเชื้อราบน้อยลง Warsiki et al. (2019) ศึกษาการเคลือบกระดาษลูกฟูกด้วยสารดูดซับเอทิลีนเพื่อใช้ห่ออะโวคาโด โดยนำมะม่วงบรรจุลงในกล่องที่ภายในกล่องที่เคลือบด้วยสารดูดซับเอทิลีน เป็นเวลา 10 วัน ทำการทดลองบรรจุมะม่วงลงในกล่องลูกฟูก 3 รูปแบบ คือ กล่องที่ไม่มีสารเคลือบ กล่องที่มีสารเคลือบถ่านกัมมันต์ และกล่องที่มีสารเคลือบถ่านกัมมันต์ผสมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต แล้วศึกษาสี ความแน่นเนื้อ ค่าของแข็งที่ละลายได้ของผลมะม่วง พบว่ามะม่วงที่บรรจุในกล่องเคลือบสารดูดซับเอทิลีนจะเก็บได้นานกว่าแบบไม่เคลือบ

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้วัสดุชนิดอื่น ในการดูดซับเอทิลีน เช่น โฟมยางพารา ในงานวิจัยของ Phatchariya (2566) ศึกษาวัสดุบรรจุภัณฑ์โฟมคอมพอสิตจากยางธรรมชาติ โดยเติมถ่านกัมมันต์เพื่อดูดซับก๊าซเอทิลีนจากกล้วยหอม โดยศึกษาการเติมถ่านกัมมันต์ในปริมาณ 0-20 phr พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์สมบัติเชิงกลของวัสดุจะลดลง พบว่าเมื่อเติมถ่านกัมมันต์ที่ 15 phr สามารถดูดซับเอทิลีนได้มากที่สุด

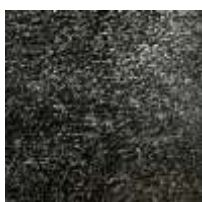
แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาจะมีการศึกษาการเคลือบถ่านกัมมันต์บนกระดาษเชิงพาณิชย์ หรือการผลิตกระดาษจากเส้นใยพืชชนิดต่างๆ แต่ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ เส้นใยฟางข้าวผสมกับเยื่อกระดาษรีไซเคิล เพื่อเป็นโครงสร้างฐาน (Substrate) สำหรับการเคลือบผิวด้วยถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้งานวิจัยส่วนใหญ่มักจำกัดขอบเขตเพียงการวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นฐานของวัสดุในห้องปฏิบัติการ แต่ยังไม่มีการประเมินและการยืนยันผลเชิงประจักษ์ เกี่ยวกับกลไกและประสิทธิภาพการชะลอการสุกของผลไม้ในสภาวะจำลองห่วงโซ่การขนส่งและการกระจายสินค้าจริง ซึ่งถือเป็นข้อมูลสำคัญอย่างยิ่งในการขยายผลสู่การใช้งานในระดับอุตสาหกรรม

4. วิธีดำเนินงานวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ กระดาษที่ผลิตจากเส้นใยฟางข้าวผสมเส้นใยกระดาษรีไซเคิล นำมาเคลือบด้วยผงถ่านกัมมันต์ เริ่มจากการผลิตกระดาษที่ผสมเส้นใย 2 ชนิดเข้าด้วยกัน ได้แก่ เส้นใยฟางข้าวและเส้นใยกระดาษ รีไซเคิลที่อัตราส่วนต่างๆ โดยเลือกอัตราส่วนระหว่างเส้นใยฟางข้าวผสมกับเส้นใยกระดาษรีไซเคิลที่ 75:25 โดยน้ำหนัก นำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษบนตะแกรงตากให้แห้ง นำกระดาษที่ได้มาเคลือบผิวด้วยผงถ่านกัมมันต์ 30% ผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ที่ความหนาในการเคลือบเท่ากับ 60 ไมครอน โดยใช้บาร์โค้ด (Barcode) เป็นอุปกรณ์ในการเคลือบ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นแบบผง ชนิด Activated charcoal AR (Carbokam Co.,Ltd.) อนุภาคขนาด 150-179 ไมครอน โดยกระดาษเคลือบถ่านกัมมันต์ 30% ที่ผลิตจากฟางข้าวผสมกับกระดาษรีไซเคิล มีค่าการหลุดลอกเท่ากับ 36% กระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ แบ่งเป็น 2 ขนาด คือ กระดาษแผ่นเล็กขนาด 5 x 5 เซนติเมตร และกระดาษแผ่นใหญ่ขนาด 10 x 10 เซนติเมตร โดยปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่เคลือบลงบนกระดาษแผ่นเล็กมีน้ำหนักเฉลี่ย 0.535 ± 0.077 กรัม และกระดาษแผ่นใหญ่ มีน้ำหนักเฉลี่ย 2.1475 ± 0.298 กรัม เคลือบด้วยผงถ่านกัมมันต์ จากนั้นนำกระดาษที่ผลิตได้ไปติดไว้ที่ฝากล่องด้านในของกล่องกระดาษลูกฟูก สารดูดซับเอทิลีนทางการค้า เลือกใช้รูปแบบของ ยี่ห้อ BeFresh® กล่องกระดาษลูกฟูก กล่องกระดาษลูกฟูกสำเร็จรูป ขนาด 17 x 25 x 9 เซนติเมตร เป็นกระดาษลูกฟูกลอน C แบบ 3 ชั้น จัดจำหน่ายโดยบริษัทไพรัชนิยไทย จำกัด โดยทุกชุดทดลองใช้กล่องลูกฟูกแบบเดียวกัน วัสดุที่ใช้ในการทดลองแสดงใน ภาพที่ 1 และ ภาพที่ 2



(ก) กระดาษที่ผลิตจากเส้นใยฟางข้าวผสมเส้นใยกระดาษรีไซเคิล



(ข) สารดูดเอทิลีนทางการค้า



(ค) กล่องกระดาษลูกฟูก

ภาพที่ 1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง



(ง) ก้วย



(จ) ทำเครื่องหมายที่ผลก้วย

ภาพที่ 2 ก้วยที่ใช้ในการทดลอง

ก้วยหอมทอง คัดเลือกก้วยหอมที่ระยะเก็บเกี่ยวเพื่อการค้า ที่มีขนาด สี รูปร่าง และน้ำหนัก ใกล้เคียงกัน เก็บมาจากสวนเดียวกัน ปราศจากแมลงและรอยตำหนิ ความสมบูรณ์ของก้วยหอมร้อยละ 75-80 นำมาเช็ดทำความสะอาดด้วยผ้าแห้ง ทำการติตรหัส ติดสติ๊กเกอร์แสดงตำแหน่งในการวัดค่าสี เพื่อให้วัดที่จุดเดียวกัน โดยกำหนด 3 ตำแหน่งได้แก่ ตำแหน่งด้านหัว ตำแหน่งตรงกลาง และตำแหน่งด้านปลายของผลก้วย

4.2 การออกแบบการทดลอง

ได้ออกแบบการทดลอง 4 ชุดการทดลอง แสดงในภาพที่ 3 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

(1) ชุดควบคุม บรรจุก้วยหอม 1 ลูก ลงในกล่องกระดาษลูกฟูก

(2) บรรจุก้วยหอม 1 ลูก ลงในกล่องกระดาษลูกฟูก ที่ผาด้านบนของกล่องกระดาษลูกฟูก มีกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบผงถ่านกัมมันต์ แผ่นเล็กติดไว้

(3) บรรจุก้วยหอม 1 ลูก ลงในกล่องกระดาษลูกฟูก ที่ผาด้านบนของกล่องกระดาษลูกฟูก มีกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบผงถ่านกัมมันต์ แผ่นใหญ่ติดไว้

(4) บรรจุก้วยหอม 1 ลูก ลงในกล่องกระดาษลูกฟูก และใส่สารดูดเอทิลีนทางการค้า จำนวน 1 ซอง

ทำการเก็บก้วยหอมในกล่องกระดาษลูกฟูก จำนวน 1 ผลต่อกล่อง คิดเป็น 1 ชุดการทดลอง โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ เก็บในห้องอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 วัน และบันทึกผล

	Day0	Day3	Day6	Day9	Day12	Day15
ก้วย+กล่อง						
ก้วย+AC5+กล่อง						
ก้วย+AC10+กล่อง						
ก้วย+EA+กล่อง						

AC = กระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิล

EA= ซองสารดูดเอทิลีน

ภาพที่ 3 การออกแบบการทดลอง

4.3 การทดสอบสมบัติของกล้วย

การศึกษาร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของกล้วยหอม โดยชั่งน้ำหนักกล้วยในแต่ละชุดทดลอง โดยวัดผลทุก 3 วัน ซึ่งจะหยุดบันทึกผลเมื่อเปลือกของกล้วยหอมเปลี่ยนเป็นสีดำเกินกว่าร้อยละ 70 และทำการบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดการเก็บรักษา โดยคิดเป็นร้อยละการสูญเสียน้ำหนักดังนี้

$$\text{ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก} = \frac{\text{น้ำหนักที่ลดลง}}{\text{น้ำหนักเริ่มต้น}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (1)$$

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีที่ผิวกล้วยหอม แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสีของกล้วยหอม บันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล ทุก 3 วันเป็นระยะเวลา 15 วัน และใช้เครื่องวัดสี (Hunter Lab, Color Quest XE) แสดงผลเป็นค่า $L^* a^* b^*$

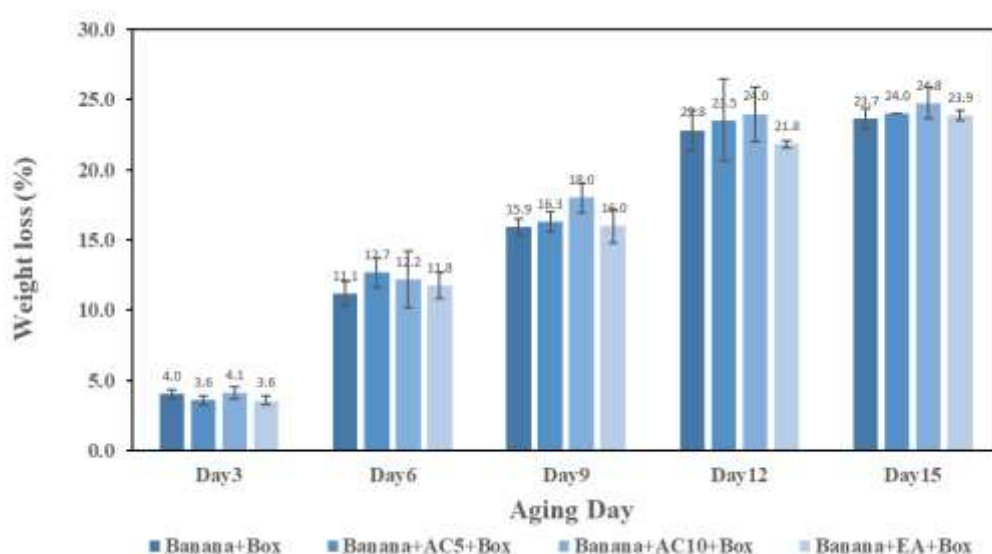
การศึกษาความแน่นเนื้อของกล้วย โดยใช้เครื่อง Universal Testing machine (Hounsfield) ทดสอบการต้านทานแรงกด (Crush test)

การศึกษาปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของกล้วย โดยใช้เครื่อง Hand Refractometer (MASTER-M Brix Atago)

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

5.1 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของกล้วยหอม

ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของกล้วยหอมดังแสดงในภาพที่ 4 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของกล้วยหอม ภายในระยะเวลาในการเก็บรักษา 15 วัน ของชุดการทดลอง 4 รูปแบบ



ภาพที่ 4 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของกล้วยหอม

จากผลการทดลองพบว่า การสูญเสียน้ำหนักของกล้วยหอมทองเพิ่มขึ้นตามจำนวนวันในการเก็บรักษา ที่เกิดจากกระบวนการหายใจของกล้วย (Respiration) (Souththixaiyalath et al., 2022) ซึ่งคายความร้อน ร่วมกับการคายน้ำ (Transpiration) เมื่ออัตราการหายใจสูงขึ้น ทำให้กล้วยมีน้ำหนักลดลง และเกิดการเหี่ยวตัว (Charoensuk et al., 2024)

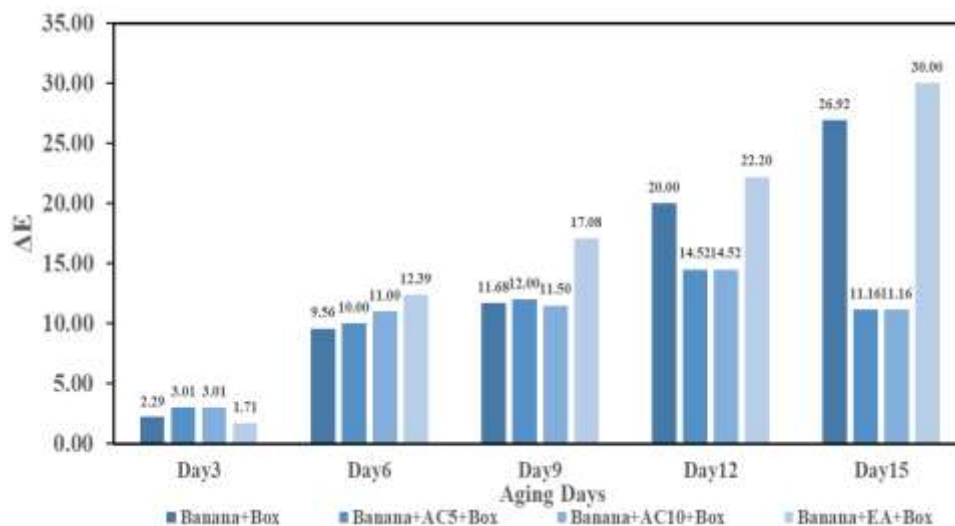
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองพบว่าชุดใส่สารดูดซับเอทิลีนมีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด รองลงมาคือชุดควบคุมที่ไม่ใส่สารดูดซับเอทิลีน กระดาษเคลือบผงถ่านขนาดเล็กและขนาดใหญ่ตามลำดับ (AC5 และ AC10) ซึ่ง

สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Oliverira et al., 2025) สารดูดซับเอทิลีน มีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด เนื่องจากการใส่สารดูดซับเอทิลีนส่งผลให้กล้วยชลอการสุกตัว และลดการคายน้ำ ส่วนกระดาษเคลือบผงถ่านขนาดเล็กและขนาดใหญ่ (AC5 และ AC10) มีค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักมากกว่าเนื่องจากผงถ่านกัมมันต์ที่นำไปเคลือบบนผิวหน้าของกระดาษ มีความสามารถในการดูดซับได้ทั้งก๊าซเอทิลีน และความชื้น ทำให้สามารถดูดซับน้ำได้ดี น้ำหนักของกล้วยหอมจึงลดลงได้มากกว่าแบบที่ไม่มีผงถ่านกัมมันต์

5.2 การเปลี่ยนแปลงของค่าสีของกล้วยหอม

การเปลี่ยนแปลงค่าสีของกล้วยหอมที่คำนวณจากค่าสี $L^*a^*b^*$ แสดงในภาพที่ 5 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าสีของกล้วยหอมภายในระยะเวลาในการเก็บรักษา 15 วัน ของชุดการทดลอง 4 รูปแบบ

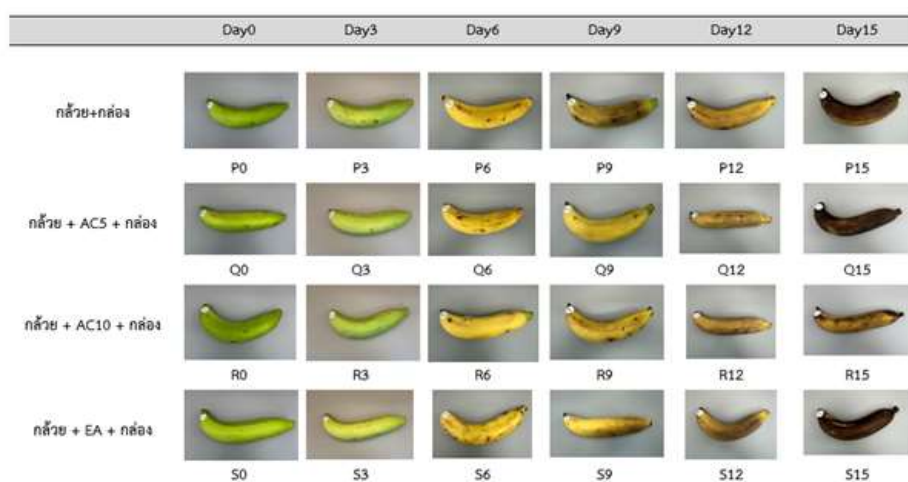
ผลการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาการบรรจุกล้วยเพิ่มมากขึ้น กล้วยหอมจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าสีเพิ่มขึ้นในทุกชุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองพบว่า การบรรจุกล้วยพร้อมกับกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ขนาด มีแนวโน้มที่จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสีน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับบรรจุกล้วยในชุดควบคุมที่ไม่ใส่สารดูดซับเอทิลีน ตามด้วยการบรรจุพร้อมสารดูดซับเอทิลีนทางการค้าตามลำดับแสดงว่าการติดแผ่น ดูดซับเอทิลีนที่ฟากล่างด้านใน ช่วยให้กล้วยหอมมีการเปลี่ยนแปลงสีที่ช้าลง เพราะมีปริมาณเอทิลีนที่น้อยลงเนื่องจากกระบวนการดูดซับทางกายภาพด้วยผงถ่านกัมมันต์ (Mariah et al., 2022) ซึ่งจะชะลอการทำลายคลอโรฟิลล์



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของค่าสีของกล้วยหอมที่คำนวณจากค่าสี $L^*a^*b^*$

ในเปลือกกล้วย ทำให้เปลือกกล้วยยังคงมีสีเขียว ได้นานขึ้น ไม่เปลี่ยนเป็นสีเหลืองเร็วเกินไป โดยชุดทดลองที่บรรจุกล้วยพร้อมกับกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบผงถ่านกัมมันต์ จะช่วยชะลอการสุกของกล้วยได้นานถึง 6 วัน จากกล้วยปกติที่จะสุกภายใน 3 วัน ซึ่งการรักษาความเขียวของผิวกล้วยได้นานขึ้น บอกถึงการยืดอายุการเก็บรักษา (Shelf life) ของกล้วยหอมทองได้ (Charoensuk et al., 2024)

จากภาพที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสีของกล้วยหอม โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยหอม ภายในระยะเวลาในการเก็บรักษา 15 วัน ของชุดการทดลอง 4 รูปแบบ ที่บันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล พบว่าสีเปลือกของกล้วยหอมเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีเขียวเป็นสีเหลืองเมื่อผ่านไปเป็นเวลา 6 วัน ในทุกชุดทดสอบ สำหรับกล้วยที่บรรจุในกล่องกระดาษลูกฟูก เริ่มเกิดรอยขีดสีดำบนเปลือกเมื่อเวลาผ่านไป 9 วัน กล้วยที่บรรจุสารดูดซับเอทิลีน และกล้วยที่บรรจุกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบผงถ่านกัมมันต์ เริ่มเกิดรอยขีดสีดำบนเปลือกเมื่อเวลาผ่านไป 12 วัน

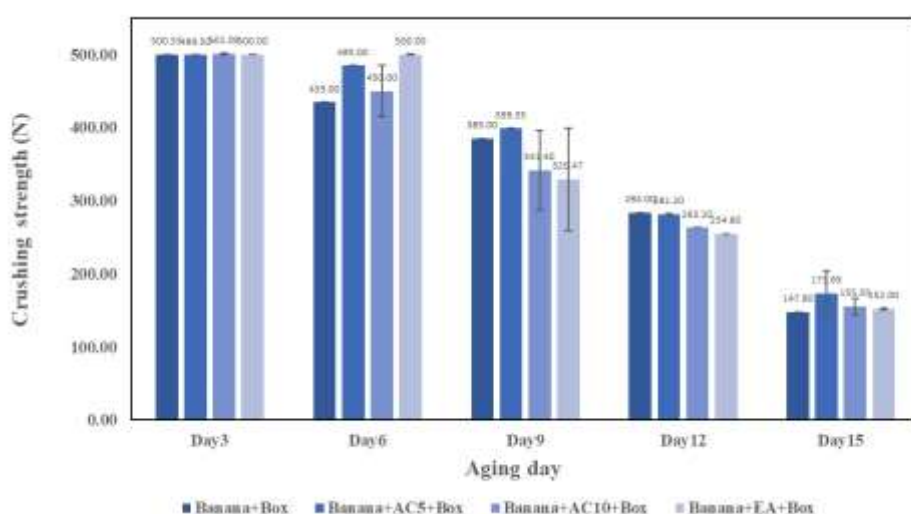


ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงสีของกล้วย

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทดลองพบว่า การบรรจุกล้วยพร้อมกับกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบผงถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ขนาด มีแนวโน้มที่จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสีน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับบรรจุกล้วยในกล่องกระดาษลูกฟูกธรรมดา และการบรรจุกล้วยพร้อมสารดูดซับเอทิลีนทางการค้า แสดงว่าการติดแผ่นดูดซับเอทิลีนจากกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบผงถ่านกัมมันต์ ที่ฝากล่องด้านใน ช่วยให้กล้วยหอมมีการเปลี่ยนแปลงของสีที่ช้าลง เมื่อเปรียบเทียบกับบรรจุในรูปแบบอื่น อาจอธิบายได้ว่าการกลไกการดักจับเชิงฟิสิกส์ภายในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของผงถ่านกัมมันต์ ที่สามารถกักเก็บโมเลกุลของก๊าซเอทิลีนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่กล้วยปล่อยออก ทำให้โมเลกุลก๊าซติดอยู่ภายในรูพรุนของผงถ่านกัมมันต์ (Xiao et al., 2024) และถูกดึงดูดไว้ด้วย แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) (Sarpetch et al., 2020) และส่งผลต่อให้เกิดการชะลอการสุกของกล้วยตามลำดับ ร่วมกับกลไกการชะลอการทำลายคลอโรฟิลล์ที่เปลือกกล้วย ทำให้สารสีกลุ่ม แคโรทีนอยด์ (สีเหลือง/ส้ม) ที่มีอยู่เดิมแต่ถูกสีเขียวบังไว้ ปรากฏเด่นชัดขึ้นมาแทน และชะลอการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล ทำให้เปลือกกล้วยยังคงมีสีเขียว ไม่เปลี่ยนเป็นสีเหลืองเร็วเกินไปเมื่อเทียบกับชุดควบคุม (Charoensuk et al., 2024)

5.3 ความแน่นเนื้อของกล้วย

ความแน่นเนื้อของกล้วยหอมแสดงในภาพที่ 7 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นเนื้อของกล้วยหอม ของชุดการทดลอง 4 รูปแบบ

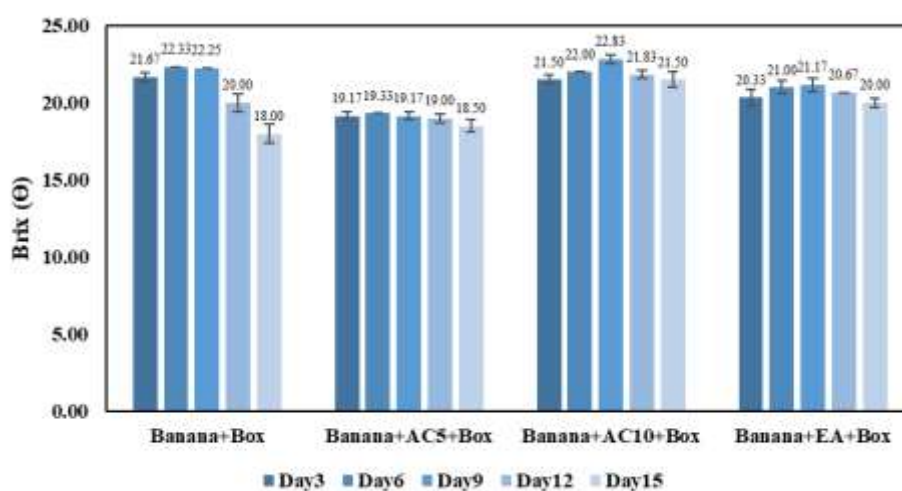


ภาพที่ 7 ความแน่นเนื้อของกล้วยหอม

ผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลามากขึ้นกล้วยจะมีความแน่นเนื้อลดลง (Siti Amirah et al., 2017) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองพบว่า เมื่อทดลองเก็บกล้วยเป็นเวลา 15 วัน การบรรจุกล้วยพร้อมกับกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบผงถ่านกัมมันต์ ทั้งขนาดเล็กและใหญ่และชุดควบคุมและการบรรจุกล้วยพร้อมสารดูดซับเอทิลีนทางการค้ามีความแน่นเนื้อใกล้เคียงกัน ซึ่งการที่ความแน่นเนื้อของกล้วยลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เกิดจากเมื่อกล้วยเริ่มสุกเอนไซม์ในกล้วย เช่น pectinesterase และ polygalacturonase จะเข้าไปย่อยสลายผนังเซลล์ ทำให้โครงสร้างของเซลล์และเพกตินในกล้วยเปลี่ยนแปลง (Charoensuk et al., 2024) โดยเปลี่ยนแปลงจากเพกตินในรูปที่ไม่ค่อยละลายน้ำ คือ โปรโตเพกติน (Protopectin) เป็นเพกตินที่ละลายน้ำได้มากขึ้น คือ เพกติน (Pectin) ที่มีโมเลกุลเล็กลงและละลายน้ำได้ ส่งผลให้โครงสร้างเซลล์หลวมและเนื้อสัมผัสนิ่มลง และอาจเกิดจากแบง์ในกล้วยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาลทำให้ความแน่นเนื้อของกล้วยมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังเกิดจากการออสโมซิสของน้ำจากเปลือกกล้วยเข้าไปยังเนื้อกล้วย ทำให้ความดันเต่ง (Turgor pressure) ลดลง ส่งผลให้กล้วยนิ่มลง (Siti Amirah et al., 2017) อีกทั้งชุดทดลองที่ใช้กระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบผงถ่านกัมมันต์ ช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักและรักษาความแน่นเนื้อของกล้วยได้ดีกว่ากลุ่มควบคุม (Souththixaiyalath et al., 2022)

5.4 ศึกษาปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้

ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของกล้วยหรือค่าความหวาน แสดงในภาพที่ 8 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ หรือค่าความหวานของกล้วย



ภาพที่ 8 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้

ผลการทดลองพบว่า ในทุกชุดการทดลองเมื่อเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น กล้วยจะมีค่าความหวานหรือปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากเอนไซม์ในกล้วยจะย่อยสลายแบง์ให้กลายเป็นน้ำตาลรูปแบบที่ละลายน้ำได้ เช่น กลูโคส (Tepamatr, 2023) และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น กล้วยเริ่มเกิดการเน่าเสีย ค่าความหวานจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากกระบวนการเมตาบอลิซึมและการหายใจของกล้วยรวมทั้งยีสต์และแบคทีเรียที่เพิ่มขึ้น (Al-Dairi et al., 2024)

6. สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

กระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบด้วยผงถ่านกัมมันต์มาเป็นวัสดุดูดซับเอทิลีน โดยศึกษาสมบัติในการชะลอการสุกของกล้วยหอมที่บรรจุในกล่องกระดาษลูกฟูก โดยเปรียบเทียบระหว่างกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบด้วยผงถ่านกัมมันต์กับการใช้สารดูดซับเอทิลีนทางการค้าและการทดลองชุดควบคุม พบว่ากล้วยหอมในทุกชุดการทดลองมีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา เมื่อเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 4 รูปแบบ พบการสูญเสียน้ำหนักของกล้วยน้อยที่สุดคือ กล่องกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ขนาด ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกัน รองลงมาคือ กล่องที่ใช้สารดูดซับ

เอทิลีนทางการค้า และสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดคือ ชุดควบคุมที่ไม่ใส่สารดูดซับเอทิลีน กล้วยทุกชุดมีการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา โดยประสิทธิภาพในการชะลอการเปลี่ยนสีที่ดีที่สุดคือ ชุดที่ใช้กระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบผงถ่านกัมมันต์ รองลงมาคือชุดใส่สารดูดซับเอทิลีนทางการค้าและที่เปลี่ยนแปลงเร็วที่สุดคือชุดควบคุมที่ไม่ใส่สารดูดซับเอทิลีน การใช้กระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบผงถ่านกัมมันต์ ช่วยชะลอการทำงานของเอนไซม์ จึงรักษาความแน่นเนื้อและน้ำหนักได้ดีกว่าชุดควบคุม ความหวานของกล้วยเพิ่มขึ้นตามเวลาเนื่องจากการที่เอนไซม์เปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล โดยกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบผงถ่านกัมมันต์ ช่วยดักจับเอทิลีนทำให้กระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาลและการสลายผนังเซลล์เกิดขึ้นช้าลง

สรุปได้ว่ากระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบผงถ่านกัมมันต์ มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการใช้สารดูดซับเอทิลีนทางการค้า สามารถชะลอการสุกได้นานถึง 6 วัน จากปกติ 3 วัน สามารถยืดอายุการเก็บรักษากล้วยหอมได้นานขึ้นอย่างน้อย 50% เมื่อเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นกล้วยจะมีความแน่นเนื้อลดลง กระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบผงถ่านกัมมันต์ ช่วยลดการสูญเสียน้ำหนักและรักษาความแน่นเนื้อของกล้วยได้ดีกว่ากลุ่มควบคุม และเมื่อเวลาในการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นกล้วยจะมีค่าความหวานหรือปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น จนกล้วยเริ่มเกิดการเน่าเสีย ค่าความหวานจะมีแนวโน้มลดลงในทุกชุดการทดลอง

งานวิจัยนี้ช่วยลดความสูญเสียทางเศรษฐกิจหลังการเก็บเกี่ยว เนื่องจากระบบดูดซับเอทิลีนจากฟางข้าวช่วยควบคุมการสุกและรักษาคุณภาพกล้วยได้อย่างมีประสิทธิภาพ การขยายอายุการเก็บรักษา ช่วยลดอัตราการเน่าเสียระหว่างการขนส่งส่งผลให้เกษตรกรและผู้ส่งออกลดความสูญเสียเชิงมูลค่าได้อย่างเป็นรูปธรรม ทั้งยังช่วยเพิ่มความปลอดภัยในอาหารและทดแทนพลาสติก เนื่องจากเป็นบรรจุภัณฑ์มาตรฐานชีวภาพที่ปลอดภัย ลดความเสี่ยงเรื่องสารเคมีรั่วไหลปนเปื้อนจากของดูดซับเอทิลีนเชิงพาณิชย์ และเป็นกระดาษที่ย่อยสลายได้ 100% ช่วยลดขยะพลาสติกชนิดใช้ครั้งเดียว และช่วยขับเคลื่อนเศรษฐกิจหมุนเวียนและลดมลพิษทางอากาศ ช่วยบรรเทาปัญหาฝุ่น PM2.5 โดยเปลี่ยนฟางข้าวจากการเผาในที่โล่งมาเป็นวัสดุดูดซับเอทิลีน ควบคู่กับการเพิ่มมูลค่าขยะกระดาษรีไซเคิล สอดคล้องกับโมเดลเศรษฐกิจ BCG อย่างยั่งยืน

7. ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยพบว่าผงถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุธรรมชาติที่ผลิตได้ภายในประเทศ มีศักยภาพในการชะลอการสุกของกล้วยหอม ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้านสมรรถนะการดูดซับเอทิลีนโดยตรง และการพัฒนารูปแบบการบรรจุผงถ่านกัมมันต์ลงในบรรจุภัณฑ์ ในการออกแบบเพื่อป้องกันผงถ่านไม่ให้หลุดร่วงลงไปสัมผัสกับผลไม้ที่บรรจุอยู่ภายใน หรือออกแบบให้สะดวกต่อการใช้งาน เช่น ทำเป็นสติ๊กเกอร์ติดภายในบรรจุภัณฑ์ หรือใส่ในรูปแบบซอง เพื่อขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้งานและให้ความหลากหลายมากยิ่งขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัยนวัตกรรม จากมหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีการพิมพ์และบรรจุภัณฑ์และกลุ่มวิจัย P-Prof มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย

9. เอกสารอ้างอิง

- Alfatah, T., Mistar, E. M., & Supardan, M. D. (2021). Porous structure and adsorptive properties of activated carbon derived from *Bambusa vulgaris striata* by two-stage KOH/NaOH mixture activation for Hg²⁺ removal. *Journal of Water Process Engineering*, 43, Article 102294. doi.org
- Al-Dairi, M., Pathare, P. B., Al-Yahyai, R., Jayasuriya, H., & Al-Attabi, Z. (2024). Evaluation of chemical quality attributes in bruised bananas during storage. *LWT - Food Science and Technology*, 197, Article 115904. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115904>

- Arj-yatha, C. (2023). Extension of quality gros michel banana production for export by collaborative farm members in Bueng Kan Province [Master's thesis, Sukhothai Thammathirat Open University].
- Avakiat, S. (2020, May 22). The situation and trend of Thai rice exporting to the United States of America from the year 2019 - 2023 [Paper presentation]. The 10th BENJAMITRA Network National & International Conference, North-Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand.
- Chaemsanit, S., Matan, N., & Matan, N. (2018). Activated carbon for food packaging application: Review. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, 15(12), 823-832.
- Charoensuk, P., Chaiwong, S., Suwunwong, T., Halley, P. J., & Suwantong, O. (2024). Preparation and utilization of biochar from agricultural wastes as ethylene absorber for 'Gros Michel' banana ripening. *Industrial Crops & Products*, 222(Part 4), Article 119860.
- Devi, R., Kumar, V., Kumar, S., & Singh, P. (2023). Recent advancement in biomass-derived activated carbon for waste water treatment, energy storage, and gas purification: a review. *Journal of Materials Science*, 58(30), 1–24. doi.org
- Gaikwad, K. K., Singh, S., & Negi, Y. S. (2020). Ethylene scavengers for active packaging of fresh food produce. *Environmental Chemistry Letters*, 18(2), 269–284.
- Goulao, L. F., & Oliveira, C. M. (2008). Cell wall modifications during fruit ripening: When a fruit is not the fruit. *Trends in Food Science & Technology*, 19(1), 4–25. doi.org
- Jaimun, R., & Sangsuwan, J. (2019). Efficacy of chitosan□coated paper incorporated with vanillin and ethylene adsorbents on the control of anthracnose and the quality of Nam Dok Mai mango fruit. *Packaging Technology and Science*, 32(8), 383–394. doi.org
- Jha, P., & Sinha, A. S. K. (2011). Application of rice-straw as raw material for production of handmade paper. *IPPTA Journal*, 23(2), 145–149.
- Kraivuttinun, P., Yindee, S., & Siriphap, A. (2020). Development of ethylene absorbent paper from activated carbons (bamboo and corn cob) for delay ripening of 'Hom Thong' banana (*Musax paradisiacal*). *Academic Journal of Science and Applied Science*, 2020(1), 41-48.
- Manalo, C. J. B., & Delos Reyes, J. A. (2025). Fresh banana export performance: A comparative analysis between the Philippines and Thailand. *Journal of the International Society for Southeast Asian Agricultural Sciences* (J. ISSAAS), 31(2), 132–148.
- Mariah, M. A. A., Vonnice, J. M., Erna, K. H., Nur'Aqilah, N. M., Huda, N., Abdul Wahab, R., & Rovina, K. (2022). The emergence and impact of ethylene scavengers techniques in delaying the ripening of fruits and vegetables. *Membranes*, 12(2), 117.
- Oliveira, A. C. J., Silva, F. A., Oliveira, T. F., & Valdés, H. (2025). Activated carbons from Baru (*Dipteryx alata* Vog.) waste impregnated with copper oxide: Application in the postharvest preservation of bananas. *Food Science and Technology*, 45, 1-9.
- Ratchadaporn Jaimun, & Jurmkwan Sangsuwan, (2562) Efficacy of chitosan□coated paper incorporated with vanillin and ethylene adsorbents on the control of anthracnose and the quality of Nam Dok Mai mango fruit. *Packag Technol Sci*, 32(8), 383–394.
- Sarapin, P., Netpae, T., Phothi, R., Sangon, A., & Chaothum, C. (2023). The relationship between hotspots from open field burning of rice straw and PM2.5 change in Nakhon Sawan Province. *PSRU Journal of Science and Technology*, 8(3), 54-68.
- Seymour, G. B., Taylor, J. E., & Tucker, G. A. (Eds.). (1993). *Biochemistry of fruit ripening*. Chapman & Hall. doi.org

- Souththixaiyalath, S., Jaturonglumlert, S., Nitatwichit, C., Varith, J., & Phimpimol, J. (2022). Effect of ozone exposure on ethylene biosynthesis inhibition and physical and chemical properties in banana (*Musa acuminata*). *Engineering Journal Chiang Mai University*, 29(2), 31-39.
- Siriphanich, J. (1995). *Postharvest physiology and technology of fruits and vegetables* (5th ed.). Kasetsart University Press.
- Siddiq, M., Ahmed, J., & Lobo, M. G. (2020). *Handbook of banana production, postharvest science, processing technology, and nutrition*. Wiley & Sons.
- Thompson, A. K., Supapvanich, S., & Sirison, J. (2019). *Banana ripening science and technology*. Springer.
- Warsiki, E., Aprilliani, F., & Iskandar, A. (2019). The effects of the use of corrugated cardboards covered with ethylene absorbers on mango fruit quality after short-term storage. *Journal of Horticultural Research*, 27(2), 65–70. doi.org
- Xiao, F., Xiao, Y., Ji, W., Li, L., Zhang, Y., Chen, M., & Wang, H. (2024). Photocatalytic chitosan-based bactericidal films incorporated with AgBr/Ag and activated carbon for ethylene removal and application to banana preservation. *Carbohydrate Polymers*, 328, 1-11.
- จรัสแท้ ศิริพานิช. (2546). สรีรวิทยาและเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้ (พิมพ์ครั้งที่ 5). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- จิตตา สาตร์เพ็ชร, และคณะ. (2020). ประสิทธิภาพของกระดาษดูดซับเอทิลีนจากกากกล้วยที่มีถ่านกัมมันต์ในการยืดอายุการเก็บรักษากล้วยหอมทอง. *Thai Journal of Science and Technology*, 9(4), 500–511.
- ปริญญา ไกรวุดินันท์, และคณะ. (2563). การพัฒนากระดาษดูดซับเอทิลีนจากถ่านกัมมันต์ (ไม้ไผ่และซังข้าวโพด) สำหรับการชะลอการสุกของกล้วยหอมทอง. *วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์*, 2563(1), 41–48.
- ศิริพร เต็งรัง, และคณะ. (2560). วิจัยและพัฒนากระดาษดูดซับเอทิลีนจากเปลือกทุเรียน. กรุงเทพฯ: กรมวิชาการเกษตร กองแผนงานและวิชาการ.
- สุประภาดา วาตวงษ์ศรี, กุลภัส แสงพลาย, และอัมพร นิตตะ. (2564, 30 สิงหาคม). การพัฒนาสมบัติของกระดาษจากตอซังข้าวโพดเพื่อชะลอการสุกของผลไม้. [เอกสารนำเสนอ] การประชุมวิชาการระดับชาติ ด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม ครั้งที่ 4 ผ่านระบบ ZOOM Cloud Meetings

คำแนะนำในการจัดเตรียมต้นฉบับสำหรับผู้เขียน

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

1. ข้อมูลเบื้องต้นของวารสาร

ขอบเขตเนื้อหา ประกอบด้วย

1.1 วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

1.2 วิศวกรรม

1.3 เทคโนโลยีอุตสาหกรรม

1.4 เทคโนโลยีสารสนเทศ

1.5 สหวิทยาการ

2. นโยบายการพิจารณาตีพิมพ์ผลงาน

2.1 คำแนะนำทั่วไป

2.1.1 ผลงานที่เสนอตีพิมพ์ต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร เอกสารการประชุม หรือสิ่งพิมพ์ใดมาก่อน (ยกเว้นรายงานวิจัย และวิทยานิพนธ์)

2.1.2 ผลงานที่เสนอตีพิมพ์ต้องไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารหรือสิ่งตีพิมพ์อื่นใด ทศนะและข้อคิดเห็นใดๆในบทความถือเป็นทัศนะของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นพ้องด้วยกับทัศนะเหล่านั้นและไม่ถือว่าเป็นความรับผิดชอบของกองบรรณาธิการ กรณีมีการฟ้องร้องเรื่องการละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงฝ่ายเดียว

2.1.3 ลิขสิทธิ์บทความเป็นของผู้เขียนและสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ได้รับการสงวนสิทธิตามกฎหมาย การตีพิมพ์ซ้ำต้องได้รับอนุญาตโดยตรงจากผู้เขียนและสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช เป็นลายลักษณ์อักษร

2.2 ประเภทผลงานที่รับตีพิมพ์

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช รับพิจารณาตีพิมพ์บทความทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ดังนี้

2.2.1 บทความวิชาการ (Academic Article)

2.2.2 บทความวิจัย (Research Article)

2.2.3 บทความปริทัศน์ (Review Article)

2.2.4 บทวิจารณ์หนังสือ (Book Review)

2.3 การพิจารณากลับกรองบทความ

2.3.1 บทความที่จะได้รับพิจารณาตีพิมพ์ ต้องเป็นบทความที่แสดงให้เห็นถึงคุณภาพทางวิชาการและมีประโยชน์ทั้งในเชิงทฤษฎีเพื่อให้นักวิจัยสามารถนำไปพัฒนาหรือสร้างองค์ความรู้ใหม่ และประโยชน์ในเชิงปฏิบัติที่นักปฏิบัติสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทั้งในภาคส่วนต่างๆ ทั้งภาครัฐ ภาคธุรกิจ และภาคสังคมและชุมชน

2.3.2 บทความที่จะได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่านกระบวนการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Reviewer) ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง จำนวน 3 ท่านและได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ

2.4 กระบวนการพิจารณากลั่นกรองบทความ (Peer Reviewer)

2.4.1 กองบรรณาธิการจะแจ้งให้ผู้เขียนทราบเมื่อกองบรรณาธิการได้รับบทความเรียบร้อยแล้ว กองบรรณาธิการจะตรวจสอบบทความว่าอยู่ในขอบเขตเนื้อหาวารสารหรือไม่ รวมถึงคุณภาพทางวิชาการ และประโยชน์ทั้งในเชิงทฤษฎีและปฏิบัติ

2.4.2 ในกรณีที่กองบรรณาธิการพิจารณาเห็นควรรับบทความไว้พิจารณาตีพิมพ์ กองบรรณาธิการ จะดำเนินการส่งบทความเพื่อกลั่นกรองต่อไป โดยจะส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง จำนวน 3 ท่าน ประเมินคุณภาพของบทความว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมจะลงตีพิมพ์หรือไม่ โดยกระบวนการกลั่นกรองนี้ ทั้งผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้เขียนจะไม่ทราบข้อมูลของกันและกัน เมื่อผู้ทรงคุณวุฒิประเมินคุณภาพบทความแล้ว กองบรรณาธิการจะตัดสินใจโดยอิงตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิว่าบทความนั้น 1 ควรนำลงตีพิมพ์ หรือ ควรจะส่งให้ผู้เขียนแก้ไขแล้วส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินอีกครั้งหนึ่ง หรือปฏิเสธ การตีพิมพ์

3. ข้อกำหนดต้นฉบับ

3.1 การจัดพิมพ์ต้นฉบับ

3.1.1 ผลงานที่เสนอพิจารณาตีพิมพ์ควรมีความยาวประมาณ 5 - 15 หน้ากระดาษ A4

3.1.2 บทความภาษาไทย พิมพ์ด้วย TH Sarabun New ขนาดตัวอักษร 14 Point บทความภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย TH Sarabun New ขนาดตัวอักษร 14 Point

3.1.3 ระยะขอบกระดาษ 1 นิ้ว (เท่ากันทุกด้าน)

3.1.4 ชื่อเรื่องบทความ ขนาดตัวอักษร 18 Point (ตัวหนา) จัดชิดซ้ายของกระดาษ

3.1.5 ชื่อหัวข้อ ขนาดตัวอักษร 16 Point (ตัวหนา) จัดชิดซ้ายของกระดาษ

3.1.6 บทคัดย่อภาษาไทย ความยาว 1 ย่อหน้า (250 คำ) ขนาดตัวอักษร 14 Point พิมพ์ 1 คอลัมน์ และต้องพิมพ์คำสำคัญต่อท้าย

3.1.7 บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ความยาว 1 ย่อหน้า (250 คำ) ขนาดตัวอักษร 14 P 1 คอลัมน์ และต้องพิมพ์คำสำคัญต่อท้าย

3.1.8 เนื้อหาพิมพ์ 1 คอลัมน์ ขนาดตัวอักษร 14 Point

3.1.9 ชื่อและหมายเลขกำกับตาราง ขนาดตัวอักษร 14 Point (ตัวหนา ให้พิมพ์ไว้บนตารางจัดชิดซ้าย ใต้ตารางบอกแหล่งที่มา จัดชิดซ้าย

3.1.10 ชื่อภาพและหมายเลขกำกับภาพ ชื่อแผนภูมิและหมายเลขกำกับแผนภูมิ ขนาดตัวอักษร 14 Point (ตัวหนา) ให้พิมพ์ไว้ใต้ภาพ (ควรเป็นภาพที่ชัดเจน และควรแนบ File ภาพมาด้วย)

3.1.11 แผนภูมิ จัดกึ่งกลางหน้ากระดาษ ใต้ภาพ แผนภูมิบอกแหล่งที่มา จัดกึ่งกลางหน้ากระดาษ

3.1.12 ชื่อบรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง ขนาดตัวอักษร 14 Point (ตัวหนา) จัดชิดซ้าย ส่วนเนื้อหา บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง ขนาดตัวอักษร 14 Point พิมพ์ 1 คอลัมน์

3.1.13 พิมพ์ชื่อและนามสกุลของผู้เขียนทุกคน พร้อมระบุคุณวุฒิสูงสุด ตำแหน่งทางวิชาการ (ถ้ามี) ตำแหน่งงาน และหน่วยงานที่สังกัด หรือสถานศึกษา และแนบ File JPG ภาพถ่ายผู้เขียนมาด้วย

3.1.14 ผู้เขียนต้องตรวจสอบความถูกต้องของการพิมพ์ต้นฉบับ เช่น ตัวสะกด วรรคตอน และความสละสลวยของการใช้ภาษา

3.2 ส่วนประกอบของบทความ

3.2.1 บทความวิชาการ หัวข้อและเนื้อหาควรชี้ประเด็นที่ต้องการนำเสนอให้ชัดเจนและมีลำดับเนื้อหาที่เหมาะสมเพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจได้ชัดเจน รวมถึงมีการใช้ทฤษฎีวิเคราะห์และเสนอแนะประเด็นอย่างสมบูรณ์ โดยควรมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้ (สามารถมีหัวข้อหรือองค์ประกอบที่แตกต่างได้)

(1) ชื่อเรื่อง (Title)

(2) บทคัดย่อ (Abstract)

สรุปเนื้อหาของบทความให้ได้ใจความชัดเจน กำหนดให้มีทั้งบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยเขียนเป็นภาษาไทยก่อน ความยาว 1 ย่อหน้า ไม่เกิน 250 คำ

(3) คำสำคัญ (Keyword)

ระบุคำที่เป็นคำสำคัญของเนื้อหาเหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นคำค้นในระบบฐานข้อมูล

(4) บทนำ (Introduction)

เป็นส่วนแนะนำและปูพื้นเรื่องเพื่อให้ผู้อ่านทราบข้อมูลเบื้องต้นของเนื้อหา เป็นการจูงใจให้ผู้อ่านเกิดความสนใจในเรื่องนั้น ๆ

(5) เนื้อหา (Body of Text)

เป็นส่วนหลักของเนื้อหาบทความ การจัดลำดับเนื้อหา ควรมีการวางแผนจัดโครงสร้างของเนื้อหา ที่นำเสนอให้เหมาะสมกับธรรมชาติของเนื้อหานั้น การนำเสนอเนื้อหาควรมีความต่อเนื่องเพื่อช่วยให้ผู้อ่านเข้าใจสาระนั้นได้โดยง่าย

(6) สรุป (Conclusion)

เป็นการสรุปเนื้อหาในบทความทั้งหมดออกมาอย่างชัดเจน และกระชับโดยมีการสรุปปิดท้ายเนื้อหาที่เราได้นำเสนอไปแล้วว่ามีผลดี หรือผลเสียอย่างไร

(7) เอกสารอ้างอิง (Reference)

เขียนบรรณานุกรมในรูปแบบ APA (American Psychological Association)

3.2.2 บทความวิจัย ควรมีการนำเสนอผลการวิจัยที่ได้รับอย่างเป็นระบบ โดยควรมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้ (สามารถมีหัวข้อหรือองค์ประกอบที่แตกต่างได้)

(1) ชื่อเรื่อง (Title)

ชื่อเรื่องควรมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยพิมพ์ชื่อเรื่องเป็นภาษาไทยและตามด้วยชื่อเรื่องภาษาอังกฤษในบรรทัดต่อมา

(2) บทคัดย่อ (Abstract)

กำหนดให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยเขียนเป็นภาษาไทยก่อน ความยาว 1 ย่อหน้า ไม่เกิน 250 คำ (การเขียนบทคัดย่อ คือ การสรุปสาระสำคัญของเรื่องโดยเฉพาะวัตถุประสงค์ วิธีการ และผลการวิจัย)

(3) คำสำคัญ (Keyword)

ระบุคำที่เป็นคำสำคัญของเนื้อหาเหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นคำค้นในระบบฐานข้อมูล

(4) บทนำ (Introduction)

เป็นการอธิบายถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา และเหตุผลที่นำไปสู่การวิจัยมีข้อมูลทางวิชาการสนับสนุนหรือโต้แย้ง รวมถึงแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

(5) วัตถุประสงค์ (Research Objectives)

ระบุถึงวัตถุประสงค์และเป้าหมายของการวิจัย

(6) วิธีการวิจัย (Research Methodology)

อธิบายถึงกระบวนการดำเนินการวิจัยอย่างละเอียดและชัดเจน

(7) ผลการวิจัย (Results)

เสนอผลการวิจัยที่ตรงประเด็นตามลำดับขั้นของการวิจัย การใช้ตารางหรือแผนภูมิไม่ควรเกิน 5 ตารางหรือแผนภูมิโดยมีการแปลความหมายและวิเคราะห์ผลที่ค้นพบอย่างชัดเจน

(8) อภิปรายผลการวิจัย (Discussion)

ผสมผสานเปรียบเทียบและตีความผลการวิจัยให้เข้ากับหลักทฤษฎี แนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งเชื่อมโยงผลการวิจัยให้สอดคล้องกับประเด็นปัญหาการวิจัย

(9) สรุป (Conclusion)

สรุปสาระสำคัญของผลการวิจัย และให้ข้อเสนอแนะที่จะนำผลการวิจัยนั้นไปใช้ประโยชน์

(10) เอกสารอ้างอิง (Reference)

เขียนบรรณานุกรมในรูปแบบของ APA (American Psychological Association)

3.3 การอ้างอิง

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ใช้รูปแบบการอ้างอิงของ APA (American Psychological Association)

3.3.1 การอ้างอิงในเนื้อหาให้ใช้รูปแบบ ดังนี้

(ชื่อ-นามสกุลผู้แต่ง, ปีที่พิมพ์, เลขหน้า)

ตัวอย่าง

(เกียรติศักดิ์ เจริญวงศ์ศักดิ์, 2546, 64)

3.3.2 บรรณานุกรมท้ายบทให้ใช้รูปแบบ ดังนี้

(1) หนังสือ

ชื่อผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อหนังสือ. สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์.

ตัวอย่าง

Bolinger, Dwinght (1977). The Form of Language. London: Longmans

(2) บทความจากวารสาร

ชื่อผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. ชื่อวารสาร ปีที่(ฉบับที่), เลขหน้าที่อ้างถึง

ตัวอย่าง

Klimoski, R., & Palmer, S. (1993). The ADA and the hiring process in organizations. Consulting Psychology Journal: Practice and Research, 45(2), 10-36

(3) วิทยานิพนธ์

ชื่อผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อวิทยานิพนธ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท/ปริญญาเอก, ชื่อมหาวิทยาลัย

ตัวอย่าง

สรรพพงษ์ จันทเลิศ (2546) การสร้างเว็บไซต์ท่องเที่ยวของจังหวัดเชียงราย
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

(4) เว็บไซต์

ชื่อผู้แต่งหรือหน่วยงานเจ้าของเว็บไซต์. (ปีที่จัดทำ). ชื่อเรื่อง. สืบค้นเมื่อจาก URL.

ตัวอย่าง

ชนะ ภาวนันท์. (2548). ธุรกิจสปาไทยนำก้าวไกลไปกว่านี้. สืบค้นเมื่อ 25 ธันวาคม
2548, จาก <https://www.businessthai.co.th/content.php?data=407720-Opinion>

4. ข้อพิจารณาทางด้านจริยธรรม

ค่านึงหลักจริยธรรมโดยเคารพในบุคคล (Respect to person) เช่น ยินยอม ความเป็นส่วนตัว การเก็บรักษาความลับ

5. การส่งต้นฉบับ

ผู้เขียนส่งต้นฉบับพร้อมไฟล์ (Microsoft Word) และแบบฟอร์มเสนอแนะบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ไปที่ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/stouscitech> เพื่อทำการลงทะเบียนสมาชิกวารสาร และดำเนินการส่งบทความเข้าฐานข้อมูลระบบออนไลน์ของวารสาร จึงสามารถดาวน์โหลดคำแนะนำการได้ที่ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/stouscitech/about/submissions>