

วารสารวิศวกรรม และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology,
Kalasin University

ปีที่ 3 ฉบับที่ 4 (2025)

กรกฎาคม – สิงหาคม 2568

ISSN 2985 0274 (Print)

ISSN 2985 0282 (Online)



กำหนดการเผยแพร่

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

ปีที่ 3 ฉบับที่ 4 (กรกฎาคม – สิงหาคม 2568)

Vol. 3 No. 4 (July – August 2025)

ISSN 2985-0274 (Print)

ISSN 2985-0282 (Online)

วัตถุประสงค์

จัดทำขึ้นโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research Article) และบทความวิชาการ (Academic Article) เปิดรับทั้งบทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ที่มีคุณภาพในด้านวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง และเพื่อส่งเสริมและเป็นแหล่งในการเผยแพร่ผลงานวิจัยและบทความวิชาการที่เป็นองค์ความรู้ เทคโนโลยีและนวัตกรรมที่ทันสมัย นอกจากนี้ยังเป็นสื่อกลางแลกเปลี่ยนความรู้และแนวคิดทางวิชาการ ของบุคลากรทั้งภายในและนอกสถาบัน โดยมีขอบเขตของวารสาร ดังนี้

- วิศวกรรมทั่วไป (General Engineering)
- วิศวกรรมอุตสาหกรรมและวิศวกรรมการผลิต (Industrial and Manufacturing Engineering)
- วิศวกรรมเครื่องกล (Mechanical Engineering)
- เทคโนโลยีสื่อและประยุกต์ใช้ (Media Technology and Application)
- สถาปัตยกรรม (Architecture)

เงื่อนไขการตีพิมพ์

บทความที่ส่งเข้ามายังวารสารจะได้รับการประเมินคุณภาพของผลงานทางวิชาการโดยหัวหน้ากองบรรณาธิการ (Editor in Chief) ถ้าบทความมีคุณภาพที่อาจได้รับการตีพิมพ์ หัวหน้ากองบรรณาธิการจะมอบหมายให้บรรณาธิการประจำเรื่อง (Section editor) เป็นผู้พิจารณาและดำเนินการส่งบทความให้ผู้ประเมินบทความ (Peer reviewers) ซึ่งเป็นผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง จำนวนอย่างน้อย 3 ท่าน ต่างสถาบัน ซึ่งบทความที่ถูกส่งไปยังผู้ประเมินจะเป็นแบบปกปิดรายชื่อทั้งผู้เขียนบทความ และผู้ประเมิน (Double -Blinded Review) เมื่อผู้ประเมินบทความส่งข้อคิดเห็นมายังบรรณาธิการประจำเรื่อง บทความที่ถูกประเมินจะได้รับการตัดสินใจจากกองบรรณาธิการโดยอาศัยความคิดเห็นของผู้ประเมินเสียงข้างมาก ดังนี้ ยอมรับให้ตีพิมพ์โดยไม่มีการแก้ไข (Accept Submission) บทความมีการแก้ไข (Revisions Required) และ ปฏิเสธการตีพิมพ์บทความ (Decline Submission)

ที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

รองอธิการบดีมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

รองศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์ลิขิต แก้วหานาม

ศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส

ดร.วิจิตร โพธิสาร

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

บรรณาธิการ

ดร.สรายุทธ จิตะภาส

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สฤติพงศ์ เสงี่ยมศักดิ์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ดร.สวลี อุดรา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.วรวรรณ เสงี่ยมวิบูล

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ปัตติยะ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รองศาสตราจารย์ ดร.ชูพงษ์ ทองคำสมุทร

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สุทธิปาก

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญญา ประเมษฐานวัฒน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.สกุลดล วรรณปะเข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.สัจจาภจ จอมโนนเขวา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รองศาสตราจารย์ ดร.เกตุร ดวงอุปมา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

รองศาสตราจารย์ ดร.นรงค์ วิชาผา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย เหลาหา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วิทยาเขตขอนแก่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ แก้ววินิต

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว วัฒนกลาง

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ แสงผ่อง

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศณุ ชัยจิตวินิชกุล

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลยา กิตติเลิศไพศาล

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑนา ทองสุพล

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉรา ชุมพล

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไทยทัศน์ สุดสวนสี

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วรพจน์ สมมูล

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปิยณัฐ โตอ่อน

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ทีมจัดการบทความและรูปแบบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรี อนุชา ศรีบุญรัมย์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

นางสาวนภัทรธิดา พรหมดิราข

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ออกแบบปกวารสาร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพนธ์ เนียมสา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

กำหนดการเผยแพร่ :

ปีละ 6 ฉบับ

ฉบับที่ 1 มกราคม - กุมภาพันธ์

ฉบับที่ 2 มีนาคม - เมษายน

ฉบับที่ 3 พฤษภาคม - มิถุนายน

ฉบับที่ 4 กรกฎาคม - สิงหาคม

ฉบับที่ 5 กันยายน - ตุลาคม

ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน – ธันวาคม

สำนักงาน

กองบรรณาธิการวารสาร "วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์"

"Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University"

คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

62/1 ถนนเกษตรสมบูรณ์ ต.กาฬสินธุ์ อ.เมือง จ.กาฬสินธุ์ 46000

บรรณาธิการ

ดร.สรายุทธ จิตะภาส

โทร: 088-574-2199

Email: jeit@ksu.ac.th

ISSN 2985-0274 (Print)

ISSN 2985-0282 (Online)

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 3 ฉบับที่ 4 เดือนกรกฎาคม – เดือนสิงหาคม ปีพุทธศักราช 2568 จัดทำขึ้นตามเป้าหมายและยุทธศาสตร์ของการดำเนินงานตามแนวทางการพัฒนาและขับเคลื่อนของมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ซึ่งวารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research Article) และบทความวิชาการ (Academic Article) ที่มีคุณภาพในด้านวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อส่งเสริมและเป็นแหล่งในการเผยแพร่ผลงานวิจัยและบทความวิชาการที่เป็นองค์ความรู้เทคโนโลยีและนวัตกรรมที่ทันสมัย สนับสนุนให้คณาจารย์ นักวิชาการ และผู้ทรงคุณวุฒิในด้านวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรมและอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องเสนอผลงานวิชาการ นอกจากนี้ยังเป็นสื่อกลางแลกเปลี่ยนความรู้และแนวคิดทางวิชาการ ของบุคลากรทั้งภายในและนอกสถาบัน

ในโอกาสนี้ขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง รวมทั้งผู้เขียนบทความทุกท่านที่ส่งบทความมาลงตีพิมพ์เผยแพร่และขอขอบพระคุณผู้อ่านทุกท่าน หวังเป็นอย่างยิ่งว่าผู้อ่านทุกท่านจะได้รับประโยชน์จากผลงานทางวิชาการในวารสารฉบับนี้

ดร.สรายุทธ จิตะภาส

บรรณาธิการ

สารบัญ (Content)

	หน้า
กองบรรณาธิการ	II
บทบรรณาธิการ	IV
บทความวิจัย	
การศึกษาแผ่นวัสดุคอมโพสิตทดแทนไม้จากชิ้นไม้ยางพารากับอีพ็อกซีเรซิน อชิพันธ์ ลอยเมืองกลาง จามร วสุรัตน์มณี ศิริชัย ยศวังใจ และ ทรงวิทย์ ศรีจันทร์รักษ์	1-16
การพัฒนาวัสดุดูดซับเสียงจากเส้นใยกกซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการทอเสื่อ ของวิสาหกิจชุมชนผลิตภัณฑ์แปรรูปเสื่อกกชุมชนดีบางสระเก้า จังหวัดจันทบุรี เบญจมาศ เนติวรรักษา สามารถ จันทนา วิทวัส สิงห์สังข์ อนุรักษ์ รอดบำรุง สุรพงษ์ ปัญญาหา และ นฤมล เลิศคำฟู	17-28
การประเมินจลนพลศาสตร์และการใช้พลังงานในการอบแห้งเนื้อหมูด้วยลมร้อน กานต์ กอมณี รัฐพงศ์ ปฏิภาณัง ชาคริต โพธิ์งาม อำไพศักดิ์ ที่บุญมา อภินันต์ นามเขต ทรงสุภา พุ่มชุมพล และ กฤตยา ไชยยศ	29-44
Face and Hand Gesture Recognition System Using MediaPipe Sethakarn Prongnuch Tanawat Sangkhakul Nutchanon Angchoun Wuttipong Pinsarmsak and Kant Charoenjit	45-58
การพัฒนาระบบคัดแยกระดับความสุกของฟักทองด้วยการผสมผสานข้อมูลภาพและเสียง โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง ฐานันดร มูลสาร วิกรม วรรณสุทธิ และ ดนู วิโรจน์อุไรเรือง	59-75

การศึกษาแผ่นวัสดุคอมโพสิตทดแทนไม้จากชิ้นไม้ยางพารากับอีพ็อกซีเรซิน

อติพันธ์ ลอยเมืองกลาง^{1,*}, จามร วสุรัตน์มณี¹, ศิริชัย ยศวังใจ¹ และ ทรงวิทย์ ศรีจันทร์รักษ์¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: atipunt.l@cit.kmutnb.ac.th โทรศัพท์: 086-9759289

(รับบทความ: 1 เมษายน 2568; แก้ไขบทความ: 1 มิถุนายน 2568; ตอรับบทความ: 30 มิถุนายน 2568)

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการขึ้นรูปแผ่นวัสดุคอมโพสิตทดแทนไม้จากชิ้นไม้ยางพารา กับอีพ็อกซีเรซิน ขึ้นรูปโดยใช้อีพ็อกซีเรซินเป็นตัวประสานให้ติดกันภายใต้ความร้อนและแรงอัด ทำการศึกษาสูตรและอัตราส่วนผสมของ วัสดุ คือ อีพ็อกซีเรซิน 15, 35 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ความหนาแน่น 500, 700 และ 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลตามมาตรฐาน EN312 Particle Boards – Specifications ได้แก่ การทดสอบปริมาณความชื้น การดูดซึมน้ำ การพองตัวตามความหนา ความต้านแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น ความต้านแรงดึง ตั้งฉากกับผิวหน้า ความยืดหยุ่นของผิวหน้า และการทดสอบมุมสัมผัส (Air-Water Contact Angle Measurement) ซึ่งแสดงสมบัติการกันน้ำของแผ่นผลิตภัณฑ์ อีกทั้งทำการวิเคราะห์รูพรุนบนพื้นผิวด้วยกล้อง Digital Microscope กำลังขยาย 1000 เท่า ตรวจสอบความหยาบผิวด้วยวิธีการประมวลผลจากภาพสแกน (Surface Roughness) พร้อมทั้ง ทดสอบความทนทานของพื้นผิววัสดุต่อการขัดถู (Abrasion Resistance) เพื่อทดสอบความคงทนของพื้นผิว ซึ่งผลของ งานวิจัยนี้สามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตชนิดใหม่ขึ้นมาแทนแผ่นชิ้นไม้อัด (Particle Board) ที่มีจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นจาก การใช้แผ่นชิ้นไม้อัดไปนาน ๆ แล้วเกิดการหลุดล่อนออกของตัวชิ้นไม้ มีการบวมพองที่เกิดจากความชื้นหรือน้ำ โดยแผ่น วัสดุทดแทนไม้ที่ได้ทำการศึกษานี้ มีคุณสมบัติที่ทนทาน ป้องกันรอยขีดข่วนได้ดี และทำให้แผ่นวัสดุทดแทนไม้มีความ แข็งแรงเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: แผ่นวัสดุคอมโพสิต แผ่นวัสดุทดแทนไม้ อีพ็อกซีเรซิน

การอ้างอิงบทความ: อติพันธ์ ลอยเมืองกลาง, จามร วสุรัตน์มณี, ศิริชัย ยศวังใจ และ ทรงวิทย์ ศรีจันทร์รักษ์, "การศึกษาแผ่น วัสดุคอมโพสิตทดแทนไม้จากชิ้นไม้ยางพารา กับอีพ็อกซีเรซิน," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย กาฬสินธุ์, ปีที่ 3, ฉบับที่ 4, หน้า 1-16, 2568.

Studies of Wood-Substituted Composite Boards from Rubber Wood Waste with Epoxy Resin

Atipunt Loymuangklang^{1,*}, Jamon Wasuratmanee¹, Sirichai Yodwangjai¹ and Songwit Srijunruk¹

¹Department of Industrial Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding Author: atipunt.l@cit.kmutnb.ac.th, Tel: 086-9759289

(Received: April 1, 2025; Revised: June 1, 2025; Accepted: June 30, 2025)

Abstract

This research investigates the process of forming wood-substituted composite boards from rubber wood waste bonded with epoxy resin. The epoxy resin serves as a binder under controlled heat and pressure. The study explores three different resin weight proportions—15%, 35%, and 50%—with board densities of 500, 700, and 900 kg/m³. Physical and mechanical properties were evaluated according to EN312 Particle Board Specifications, including moisture content, water absorption, thickness swelling, modulus of rupture, modulus of elasticity, internal bonding, surface soundness, and air–water contact angle, which indicates the water resistance of the board. Surface porosity was examined using a digital microscope at 1000x magnification, while surface roughness was analyzed through image-based processing. Abrasion resistance testing was conducted to assess surface durability. The results demonstrate that the composite boards exhibit enhanced mechanical strength, moisture resistance, and surface durability compared to conventional particle boards. The study presents a promising alternative to traditional wood-based particle boards, addressing common issues such as delamination and swelling due to moisture, and offering a durable, scratch-resistant solution from recycled rubber wood waste.

Keywords: Composite Board, Wood Substitute, Epoxy Resin

Please cite this article as: A. Loymuangklang, J. Wasuratmanee, S. Yodwangjai and S. Srijunruk, “Studies of Wood-Substituted Composite Boards from Rubber Wood Waste with Epoxy Resin,” *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 3, no. 4, pp. 1-16, 2025.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมายังมีความต้องการใช้ไม้ อยู่ในปริมาณมาก ในขณะที่ไม้ธรรมชาติมีราคาแพง และหายาก จึงได้มีการพัฒนาแผ่นไม้อัด ซึ่งมีลักษณะ เป็นไม้แผ่นประกอบเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการ ก่อสร้างหรือทำเป็นผลิตภัณฑ์ทดแทนไม้จริงที่ขาดแคลน เช่น แผ่นชั้นไม้อัด (Particle Board) แผ่นไม้อัดความหนาแน่นปานกลาง (Medium Density Fiberboard; MDF) ไม้อัดเรียงเส้นหรือโอเอสบี (Oriented Strand Board; OBS) ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งในการพัฒนาวัสดุผสมในปัจจุบันนอกจากมุ่งเน้นไปในเรื่องการปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุให้ดีขึ้นแล้ว ยังต้องคำนึงถึงผลกระทบที่เกิดต่อสิ่งแวดล้อมและผู้ใช้งานควบคู่กันไปด้วย โดยในการทำแผ่นชั้นไม้อัดมีกระบวนการในการผลิตจากการนำชิ้นไม้ หรือชิ้นวัสดุกลึงโนเซลลูโลสอื่น ๆ ที่ถูกย่อยให้มีขนาดต่าง ๆ มาขึ้นรูปเป็นแผ่น โดยมีกาวเป็นตัวประสานให้ติดกันภายใต้ความร้อนและแรงอัด กาวที่ใช้เป็นตัวประสานที่นำมาทำวัสดุทดแทนไม้ หรือไม้ประกอบ (Wood - Substitute Composites) ที่นิยมใช้ในงานไม้ ได้แก่ กาวยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ (UF, Urea Formaldehyde) เป็นกาวที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยกาวมีลักษณะใส และใช้กันมากในงานปิดผิวไม้บางสำหรับงานเครื่องเรือน เหมาะต่อการใช้งานที่ทนทานต่อความชื้นแต่ไม่ต้านทานน้ำ และกาวเมลามีน - ฟอร์มาลดีไฮด์ (MF, Melamine Formaldehyde) เป็นกาวที่คล้ายกับกาว UF โดยกาวมีลักษณะใส มีคุณสมบัติในการต้านทานต่อความชื้นและสภาพการใช้งานที่เปียกชื้น จึงนิยมใช้ในการผลิตแผ่นปาร์ติเกิ้ล (Particle Board) แต่ควรจะต้องระมัดระวังเพราะว่า สารฟอร์มาลดีไฮด์เป็นมลพิษทางอากาศสามารถพบได้ในอากาศภายในอาคาร โดยอุตสาหกรรมในประเทศไทยส่วนใหญ่จะมีการใช้ ฟอร์มาลดีไฮด์ เพื่อนำไปผลิตยูเรีย ฟอร์มาลดีไฮด์สูงถึงร้อยละ 70 ของการผลิตทั้งหมด ซึ่งปัจจัยที่ทำให้ฟอร์มาลดีไฮด์ถูกปล่อยออกจาก

เฟอร์นิเจอร์ต่าง ๆ คือ อุณหภูมิที่สูง และการระบายอากาศที่ไม่ดีพอ อาจต้องมีการสัมผัสกับสาร ฟอร์มาลดีไฮด์ที่แอบแฝงตามงานเฟอร์นิเจอร์ อุปกรณ์สำนักงาน และงานเครื่องเรือน เป็นต้น [1] ทั้งนี้ยังพบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้งานแผ่นวัสดุทดแทนไม้หรือไม้ประกอบไปนาน ๆ เกิดการหลุดล่อนออกของตัวชิ้นไม้ และเกิดการบวมพองที่เกิดจากความชื้นหรือน้ำ ส่งผลต่อความแข็งแรงของแผ่นชั้นไม้อัด และวัสดุปิดผิวล่อนออกได้

ไม้ยางพาราเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยอีกชนิดหนึ่ง มีผู้ประกอบการและเกษตรกรทำธุรกิจที่เกี่ยวข้องกับยางพารา ประมาณ 1 ล้านครัวเรือน หรือประมาณ 6 ล้านคน ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกไม้ยางพาราและผลิตภัณฑ์ยางพาราเป็นอันดับ 1 ของโลก นับตั้งแต่ พ.ศ. 2534 เป็นต้นมา โดยใน พ.ศ. 2561 มีการผลิตยางพาราจำนวน 14.56 ล้านตัน มีการส่งออกจำนวน 12.67 ล้านตัน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 87 ของผลผลิตทั้งหมดสามารถทำรายได้เข้าประเทศได้ปีละกว่า 500,000 ล้านบาท แต่ในขั้นตอนการแปรรูปไม้ยางพารา ก่อให้เกิดของเสียต่อสิ่งแวดล้อม คือ เศษไม้ยางพารา ซึ่งที่ผ่านมามีการใช้ประโยชน์ในการนำมาผลิตแผ่นชั้นไม้อัด หรือเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลของ โรงไฟฟ้าชีวมวล (Biomass) เป็นต้น [2]

อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) จัดอยู่ในกลุ่มเทอร์โมเซตติงโพลิเมอร์ (Thermosetting Polymer) คือ เมื่อผ่านกระบวนการผลิตในครั้งแรกแล้วจะมีความแข็งแรงทนทานเป็นอย่างมาก ไม่คืนรูป และไม่สามารถรีไซเคิล หรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยทั่วไปอีพ็อกซีเรซิน ได้จากการทำปฏิกิริยาของบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A) กับอีพิคลอโรไฮดรินโมโนเมอร์ (Epichlorohydrin Monomer) และสารเพิ่มความแข็ง (Hardener) ซึ่งเป็นสารประเภทโพลิเอมีน (Polyamine) ที่มีคุณสมบัติในการอุดช่องว่างได้ดี [3] โดยหากใช้ในงานไม้ จะใช้อีพ็อกซีเรซินที่เป็นของเหลว มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และไม่ใส่ตัวทำละลาย

บทความวิจัย (Research Article)

อื่นซึ่งจะแข็งตัวโดยปฏิกิริยาแบบรวมตัว (Addition Reaction) และไม่มีการสูญเสีย ผลผลิตจากปฏิกิริยา หรือมีการสูญเสียปริมาณเพียงเล็กน้อยขณะที่แข็งตัว [4] โดยประโยชน์และการนำไปใช้ของอีพ็อกซีเรซิน คือ ใช้เป็นกาวและสารยึดติด สามารถใช้ยึดติดกับวัสดุได้หลากหลายประเภท เช่น ไม้ เหล็ก ไฟเบอร์ แก้ว พลาสติก คอนกรีต เนื่องจากอีพ็อกซีเรซินมีคุณสมบัติ ทนต่อแรงกระแทก การขีดขูด เสียดสี ทนกรดและเบส ทนความร้อนได้ดี จึงมักถูกประยุกต์นำมาใช้ในงานภายในอาคาร

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดในการทดลองผลิตแผ่นวัสดุคอมโพสิตทดแทนไม้จากชิ้นไม้ยางพาราที่มีอีพ็อกซีเรซิน เป็นตัวประสาน แทนการใช้กาวยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ หรือ กาวเมลามีน – ฟอร์มาลดีไฮด์ โดยที่อีพ็อกซีเรซินมีคุณสมบัติที่แข็งแรงทนทาน ป้องกันรอยขีดข่วนได้ดี ยึดเกาะได้ดี ทนความชื้น ทนความร้อน และทนทานต่อสารเคมี กรด ด่าง น้ำมัน ด้วยคุณสมบัติต่าง ๆ ที่กล่าวมา จะทำให้ช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้งานแผ่นวัสดุทดแทนไม้หรือไม้ประกอบได้

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลักษณะโครงสร้างของแผ่นวัสดุคอมโพสิต เป็นการแบ่งตามการกระจายตัวของขนาดชิ้นไม้ ทางด้านความหนา คือ

1) แผ่นชิ้นไม้อัดแบบชั้นเดียว (Single Layer or Homogeneous Particleboard) หมายถึง แผ่นชิ้นไม้อัดที่ทำจากชิ้นไม้ที่มีลักษณะและขนาดเหมือนกัน มีส่วนผสมของกาวและสารเติมแต่งอย่างเดียวกัน ตลอดจนความหนาแน่นของแผ่นชิ้นไม้อัด

2) แผ่นชิ้นไม้อัดแบบ 3 ชั้น (Three Layer Particleboard) หมายถึง แผ่นชิ้นไม้อัดที่แบ่งตามลักษณะของชิ้นไม้ ออกเป็น 3 ชั้น ตลอดความหนาแน่นของแผ่นในแต่ละชั้นประกอบด้วย ชิ้นไม้

ที่ลักษณะและขนาด ตลอดจนส่วนผสมของกาวเหมือนกัน ปกติใช้ไม้ชิ้นขนาดเล็กและบางเป็นชั้น ผิวหน้าและหลัง ส่วนชั้นไส้ใช้ไม้ชิ้นขนาดใหญ่และหยาบกว่าปริมาณกาวที่ใช้ผสมในชั้นผิวทั้ง 2 หน้า มักมีมากกว่าในชั้นไส้ เพื่อให้เกิดโครงสร้างที่สมดุลกัน มีผิวที่แข็งและแน่นขึ้น [5]

มาตรฐานการทดสอบแผ่นชิ้นไม้อัดชนิดอัดราบ EN312 Particle Boards – Specifications ได้แก่ การทดสอบปริมาณความชื้น การดูดซึมน้ำ การพองตัวตามความหนา ความต้านแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น ความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้า ความยึดแน่นของผิวหน้า

ตารางที่ 1 มาตรฐานการทดสอบ ตามมาตรฐาน European Standards

ลำดับ	มาตรฐานการทดสอบ EN312 Particle Boards	
	การทดสอบสมบัติไม้อัดประกอบ	มาตรฐานการทดสอบ
1	ค่าความหนาแน่น (Density)	EN323
2	ความชื้น (Moisture Content)	EN322
3	พองตัวตามความหนา (Thickness Swelling)	EN317
4	ความต้านแรงดัด (MOR) (Modulus of Rupture)	EN310
5	โมดูลัสยืดหยุ่น (MOE) (Modulus of Elasticity)	EN310
6	ความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้า (Internal Bonding)	EN319
7	ความยึดแน่นของผิวหน้า (Surface Soundness)	EN311
8	การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)	EN317

บทความวิจัย (Research Article)

2.1 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัสหยดน้ำกับระดับความไม่ชอบน้ำ (Contact Angle)

มุมสัมผัสหยดน้ำเป็นมุมระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิว ณ จุดที่ทั้งสองพื้นผิวสัมผัสกัน ซึ่งจะมีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินระดับความไม่ชอบน้ำและวิธีการวัดค่ามุมสัมผัส สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของของเหลวบนพื้นผิว เป็นการวัดมุมระหว่างเส้นสัมผัสรอบนอกของหยดของเหลวที่อยู่บนพื้นผิวกับพื้นผิวแผ่นผลิตภัณฑ์ วิธีการในการวัดมุมสัมผัสสามารถทำได้โดยการวัดและปรับมุมเพื่อหาเส้นสัมผัสและอ่านค่ามุมผ่านช่องมองภาพ วิธีนี้ใช้กล้องถ่ายภาพของหยดน้ำแล้วนำรูปภาพของหยดน้ำมาเข้าโปรแกรมเพื่อคำนวณหามุมของหยดน้ำออกมาโดยชุดการทดสอบจะประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสง ฐานตั้งรองรับพื้นผิวทดสอบ อุปกรณ์สำหรับหยดของเหลว และกล้องถ่ายภาพ เกณฑ์การประเมินระดับความไม่ชอบน้ำจากมุมสัมผัส ตามมาตรฐาน STRI Guide 92/1 [6] ได้แบ่งระดับไฮโดรโฟบิกออกเป็น 7 ระดับ โดยระดับ 1 จะมีค่าความไม่ชอบน้ำสูงสุด และระดับ 7 จะมีค่าความไม่ชอบน้ำต่ำสุด ซึ่งวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ [7] ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การแบ่งระดับคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ

ระดับความไม่ชอบน้ำ	นิยาม
1	- มีเพียงหยดน้ำเป็นเม็ด ๆ กระจายแยกกันตามผิว - หยดน้ำส่วนใหญ่จะมีมุม $\theta > 80^\circ$
2	- มีเพียงหยดน้ำเป็นเม็ด ๆ กระจายแยกกันตามผิว - หยดน้ำส่วนใหญ่จะมีมุม $50^\circ < \theta < 80^\circ$
3	- มีเพียงหยดน้ำเป็นเม็ด ๆ กระจายแยกกันตามผิว - หยดน้ำส่วนใหญ่จะมีมุม $20^\circ < \theta < 50^\circ$ มีลักษณะเป็นหยดเพียงระยะเวลาสั้น ๆ

ตารางที่ 2 การแบ่งระดับคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (ต่อ)

ระดับความไม่ชอบน้ำ	นิยาม
4	- มีทั้งหยดน้ำและรอยเปียกจากทางน้ำไหลให้เห็น - บริเวณที่เปียกตลอดน้อยกว่า 2 cm^2 พร้อมกับครอบคลุมพื้นที่น้อยกว่า 90% ของพื้นที่ทดลอง
5	- มีบริเวณที่เปียกตลอดบางแห่งมีพื้นที่มากกว่า 2 cm^2 แต่ยังครอบคลุมพื้นที่น้อยกว่า 90 % ของพื้นที่ทดลอง
6	- มีบริเวณที่เปียกตลอดครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 90 % ของพื้นที่ทดลอง แต่ยังมีบริเวณที่ไม่เปียกให้สังเกตได้ (เป็นจุดหรือรอยเล็ก ๆ)
7	- มีลักษณะเป็นฟิล์มน้ำปกคลุมพื้นที่ทดลองทั้งหมด

2.2 ความหยาบผิว (Surface roughness)

ผิวแผ่นผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการขึ้นรูปมาแล้วนำมาส่องดูด้วยกล้อง Digital Microscope จะพบว่าผิวของชิ้นงานนั้นขรุขระเป็นลูกคลื่น ซึ่งชิ้นงานใดที่มีลูกคลื่นสูงก็แสดงว่าชิ้นงานนั้นมีความหยาบ ส่วนชิ้นงานที่มีคลื่นต่ำแสดงว่าผิวงานนั้นเรียบ ความหยาบผิวมีผลต่อการใช้งานเป็นอย่างมาก และมีความจำเป็นที่ต้องมีความรู้ความเข้าใจถึงความหมายของคำว่า

- ความหยาบผิว (Roughness) ประกอบด้วยความไม่สม่ำเสมอของผิวชิ้นงาน ซึ่งรูปแบบของรอยที่เกิดความสูงหรือความลึกของร่องรอยความไม่สม่ำเสมอ เป็นค่าที่ได้จากการวัด

- ความเป็นคลื่น (Waviness) คือ บริเวณระหว่างความหยาบผิว โดยมองในพื้นที่ขนาดใหญ่ (ประมาณ 1 มิลลิเมตร) ซึ่งอาจเกิดจากการขนาดของเศษชิ้นไม้

บทความวิจัย (Research Article)

การยึดเกาะของตัวประสานหรือการขึ้นรูป เนื่องจากการสั่นของเครื่องอัด [8]

2.3 ความทนทานของพื้นผิววัสดุต่อการขัดถู (Abrasion Resistance)

การทดสอบการสึกหรอ (Abrasion Test) ของวัสดุดำเนินการตามมาตรฐาน EN 13696 [9] ซึ่งใช้วิธีการทดสอบเฉพาะเพื่อประเมินความทนทานของวัสดุต่อการสึกหรอภายใต้สภาวะที่มีการใช้งานจริง มาตรฐานนี้มักใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการทดสอบวัสดุที่มีการเคลือบหรือชั้นเคลือบที่ต้องมีคุณสมบัติต้านทานการขัดถู โดยใช้เครื่อง Taber Abrasion ในการทดสอบแผ่นผลิตภัณฑ์ ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบ

2.3.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss)

เทคนิคนี้ใช้วัดปริมาณวัสดุที่ถูกขจัดออกไปโดยการเสียดสี และโดยปกติจะรายงานในหน่วยมิลลิกรัม แสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$L = A - B \quad (1)$$

โดยที่ L = การสูญเสียน้ำหนัก

A = น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการขัดถู

B = น้ำหนักของชิ้นงานหลังจากการขัดถู

ดัชนีการสึกหรอ (Wear Index) ระบุอัตราการสึกหรอ คำนวณโดยการวัดการสูญเสียน้ำหนัก (มิลลิกรัม) ต่อการสึกหรอหนึ่งพันรอบ ยิ่งดัชนีการสึกหรอต่ำ ความต้านทานการสึกหรอก็จะยิ่งดีขึ้น แสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$I = [(A - B) * 1000] / C \quad (2)$$

โดยที่ I = ดัชนีการสึกหรอ (Wear Index)

A = น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการขัดถู

B = น้ำหนักของชิ้นงานหลังจากการขัดถู

C = จำนวนรอบการทดสอบ

2.3.2 ค่าการสูญเสียความลึก (Depth Loss)

เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของความหนาหรือความลึกของพื้นผิวแผ่นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการขัดถู ในระหว่างการทดสอบ คือ ลักษณะการสึกหรอที่เกี่ยวข้องกับการลดลงของความหนาของแผ่นผลิตภัณฑ์ การสูญเสียความลึกบ่งบอกถึงความทนทานของวัสดุในการรักษาความหนาของผิววัสดุไว้เมื่อเจอกับแรงขัดถูในระยะเวลานาน ช่วยให้ผู้ผลิตหรือผู้ใช้วัสดุสามารถเข้าใจถึงอายุการใช้งานที่คาดการณ์ได้และการสึกหรอของวัสดุภายใต้สภาวะการใช้งานจริง

การหาค่า การสูญเสียความลึก (Depth Loss) ในการทดสอบการขัดถู เช่น Taber Abrasion Test สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบความลึกของพื้นผิว ก่อนและหลังการทดสอบ ค่าการสูญเสียความลึกที่มากขึ้นหมายถึงวัสดุนั้นมีความทนทานต่อการขัดถูต่ำ หรืออาจมีการเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้น ค่าการสูญเสียความลึกที่น้อยแสดงว่าวัสดุนั้นมีความทนทานต่อการขัดถูดี โดยใช้การคำนวณช่วยให้สามารถประเมินคุณสมบัติความทนทานของแผ่นผลิตภัณฑ์ได้ [10] แสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$\text{การสูญเสียความลึก} = D_o - D_f \quad (3)$$

โดยที่ D_o = ความลึกเริ่มต้นของวัสดุ
ก่อนการทดสอบ

D_f = ความลึกหลังการทดสอบ

บทความวิจัย (Research Article)

3. วิธีการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

3.1.1 ขึ้นไม้ยางพาราธรรมชาติที่นำมาศึกษา

ขึ้นไม้ยางพาราธรรมชาติที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ขึ้นไม้ยางพาราที่ใช้ในกระบวนการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัด (Particle Board) ผ่านเครื่องเขย่าตะแกรงร่อน Sonic Sifter รุ่น VU100 ตะแกรงร่อนขนาด 1.24 มิลลิเมตร และขนาด 0.316 มิลลิเมตร โดยชนิดหนึ่งชั้น ใช้ขึ้นไม้ขนาดน้อยกว่า 0.316 มิลลิเมตร และชนิดสามชั้น ใช้อัตราส่วนไส้ (Core Layer) กับผิวหน้า (Face Layers) ในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [11]

3.1.2 วัสดุประสานที่นำมาใช้ในการผสมขึ้นไม้ยางพารา

เพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นวัสดุทดแทนไม้ คือ อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin) ชนิดเหลว โดยใช้อัตราส่วนผสมอีพ็อกซีเรซินต่อตัวเร่งแข็ง (Hardener) ในอัตราส่วน 2 : 1

3.1.3 อัตราส่วนผสมของขึ้นไม้ยางพารากับอีพ็อกซีเรซิน

ที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ 85 : 15, 65 : 35 และ 50 : 50 โดยน้ำหนัก ที่ความหนาแน่น 500, 700 และ 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Kg/m^3) ซึ่งแบ่งออกเป็น การขึ้นรูปแบบ 1 ชั้น และแบบ 3 ชั้น โดยทำการอัดขึ้นรูปให้มีขนาด $10 \times 300 \times 300$ มิลลิเมตร [12]

3.1.4 ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกล

ตามมาตรฐาน EN312 Particle Boards – Specifications ได้แก่ การทดสอบปริมาณความชื้น การดูดซึมน้ำ การพองตัวตามความหนา ความต้านแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ความยืดหยุ่นของผิวหน้า [13] เพื่อหาข้อสรุปอัตราส่วนผสมของการขึ้นรูปที่เหมาะสม ผลที่ได้จากการทดสอบจะต้องผ่านเกณฑ์กำหนดตามมาตรฐาน

และออกแบบการทดลองโดยการทดสอบทำซ้ำทั้งหมด 6 ชิ้นตัวอย่าง ในแต่ละการทดสอบ

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมขึ้นไม้ยางพารากับอีพ็อกซีเรซินแบบ 1 ชั้น

ค่าความหนาแน่น 500, 700, 900 Kg/m^3				
อัตราส่วนผสมอีพ็อกซีเรซิน (%)	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก			
	ขึ้นไม้ยางพารา (มม.)		อีพ็อกซีเรซิน	
	ขึ้นไม้ชั้นกลาง ขนาด 0.316-1.24	ขึ้นไม้ชั้นบนและล่าง ขนาดน้อยกว่า 0.316	เรซิน (Resin)	ตัวเร่งแข็ง (Hardener)
15	68	17	10	5
35	52	13	23.33	11.67
50	40	10	33.33	16.67

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมขึ้นไม้ยางพารากับอีพ็อกซีเรซินแบบ 3 ชั้น

ค่าความหนาแน่น 500, 700, 900 Kg/m^3			
อัตราส่วนผสมอีพ็อกซีเรซิน (%)	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก		
	ขึ้นไม้ยางพาราขนาดน้อยกว่า 0.316 มิลลิเมตร	อีพ็อกซีเรซิน	
		เรซิน (Resin)	ตัวเร่งแข็ง (Hardener)
15	85	10	5
35	65	23.33	11.67
50	50	33.33	16.67

3.2 ขั้นตอนการผลิต

3.2.1 การเตรียมขึ้นไม้

นำขึ้นไม้ยางพาราที่ใช้ในกระบวนการผลิตแผ่นขึ้นไม้อัด (Particle Board) มาผ่านตะแกรงร่อนขนาด 1.24 มิลลิเมตร และขนาด 0.316 มิลลิเมตร เพื่อคัดแยกขนาดที่นำไปใช้ในการทำชั้นของแผ่นผลิตภัณฑ์ ดัง

บทความวิจัย (Research Article)

รูปที่ 1 แล้วนำเข้าสู่เครื่องอบเพื่อให้เหลือความชื้นประมาณ 1-3%



ร่อนผ่านตะแกรง

ชั้นไม้ทำไส้
(Core layer)

ชั้นไม้ทำผิวหน้า
(Face layers)

รูปที่ 1 กระบวนการเตรียมชิ้นไม้

คำนวณอัตราส่วนผสมตามค่าความหนาแน่นที่ 500, 700 และ 900 Kg/m³ จากสูตรของสมการที่ (4)

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{มวลหรือน้ำหนัก}}{\text{ปริมาตร}} \quad (4)$$

โดยที่ ρ = ความหนาแน่น (Kg/m³)
 M = มวลหรือน้ำหนัก (kg)
 v = ปริมาตร (m³)

3.2.2 ขั้นตอนกระบวนการขึ้นรูปชิ้นไม้อัด

ทำการหล่อขึ้นรูปชิ้นไม้อัด โดยมีการกำหนดอัตราส่วนผสมในการขึ้นรูปไม้อัดที่มีองค์ประกอบแบบ 1 ชั้น ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ เรซิน (Resin) ตัวเร่งแข็ง (Hardener) และชิ้นไม้ยางพารา ดังตารางที่ 3 และองค์ประกอบแบบ 3 ชั้น มี 4 ส่วนคือ เรซิน ตัวเร่งแข็ง ชิ้นไม้ยางพาราชั้นกลาง และชิ้นไม้ยางพาราชั้นบนและล่าง [14] ดังตารางที่ 4 ทำการชั่งตวงส่วนผสมทั้งหมดแล้วผสมให้เข้ากัน โดยร่อนส่วนผสมลงในแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปแผ่นขึ้นไม้อัดให้ทั่ว แล้วเกลี่ยให้เท่ากัน แล้วกดส่วนผสมให้แน่น หลังจากนั้นถอดแบบแม่พิมพ์

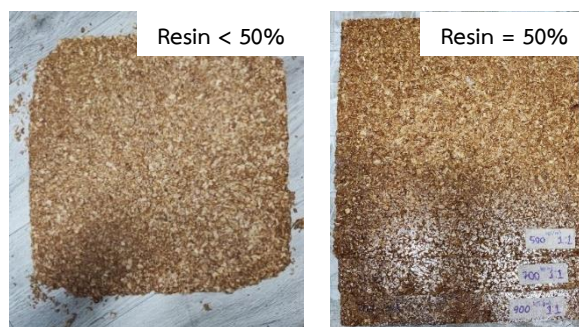
ตามรูปที่ 2 เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปชิ้นไม้อัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ขึ้นรูปส่วนผสมและถอดออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 3 การขึ้นรูปชิ้นไม้อัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก



รูปที่ 4 แผ่นไม้อัดจากชิ้นไม้ยางพารากับอีพ็อกซีเรซิน

หลังจากขั้นตอนกระบวนการอัดขึ้นรูปชิ้นไม้อัดพบว่าอัตราส่วนที่มีส่วนผสมที่มีอีพ็อกซีเรซิน น้อยกว่า

บทความวิจัย (Research Article)

50% แผ่นขึ้นไม้อัดไม่เกาะตัว เป็นผลให้ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นผลิตภัณฑ์ได้ จึงได้ทำการขึ้นรูปเฉพาะในส่วนผสมที่อัตราส่วนอีพ็อกซีเรซิน 50% ที่ความหนาแน่น 500, 700 และ 900 Kg/m³

3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

3.3.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

นำชิ้นตัวอย่างไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความหนาแน่น ปริมาณความชื้น การพองตัวตามความหนา และการดูดซึมน้ำ ซึ่งการทดสอบเหล่านี้ดำเนินการตามแนวทางที่ระบุไว้ในมาตรฐานอุตสาหกรรมของมาตรฐานยุโรป (European Standards)



รูปที่ 5 การอบและวัดขนาดชิ้นทดสอบ

3.3.2 การทดสอบสมบัติทางกล

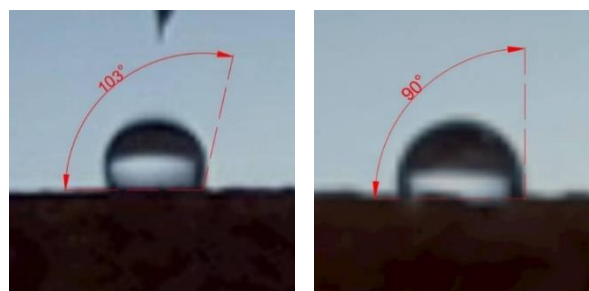
ทดสอบความแข็งแรงในการดัดงอ โดยทดสอบด้วยเครื่อง Laboratory Testing Machine รุ่น IBX700 ทำการทดสอบความต้านแรงดัด มอดูลัสยืดหยุ่น ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ความยึดแน่นของผิวหน้า



รูปที่ 6 ทดสอบความแข็งแรงในการดัดแบบสามจุด

3.3.3 ทดสอบมุมสัมผัสหยดน้ำ (Contact Angle)

การทดสอบการคำนวณวัดมุมสัมผัสหยดน้ำจากการประมวลผลภาพถ่ายด้วยกล้อง Digital Microscope กำลังขยาย 100 เท่า ความละเอียด 2.0 MPixels ดังรูปที่ 7 เป็นค่ามุมสัมผัสหยดน้ำด้านซ้าย มุมสัมผัสหยดน้ำด้านขวา และมุมสัมผัสหยดน้ำรวมเฉลี่ย มุมสัมผัสหยดน้ำที่ได้มาจากการหาค่าเฉลี่ยของการวัดมุมสัมผัสหยดน้ำ 3 ครั้งต่อผิวแผ่นผลิตภัณฑ์



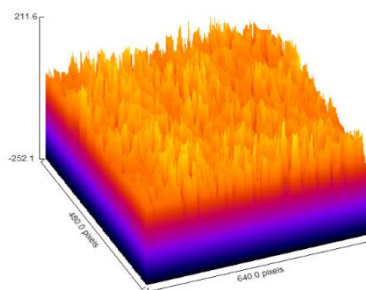
รูปที่ 7 ภาพถ่ายหยดน้ำบนผิวแผ่นผลิตภัณฑ์ที่มีระดับความไม่ชอบน้ำระดับ 1

3.3.4 ทดสอบการวัดค่าความหยาบผิว

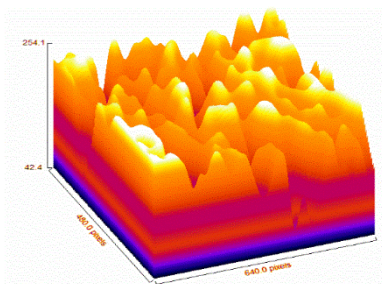
การวัดค่าใช้การเปรียบเทียบผิว (Surface Inspection Using Comparison Methods) ซึ่งเป็นวิธีการตรวจสอบความหยาบและเอียงของผิวโดยทำ

บทความวิจัย (Research Article)

การตรวจสอบ ซึ่งประกอบไปด้วย Microscopic Inspection และ Surface Photograph ซึ่งค่าความหยาบผิว (Ra) เป็นการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นที่ผิวที่วัดได้ เป็นค่าที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิต มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร (μm) ค่าที่น้อยกว่าหมายถึงคุณภาพผิวที่ดีกว่า และส่วนของโค้งของพื้นผิว (Waviness) พร้อมทั้งตรวจดูรูพรุนบนพื้นผิว ดูการกระจายตัวของชั้นไม้ยางพาราและการยึดเกาะของตัวประสานอีพ็อกซีเรซิน

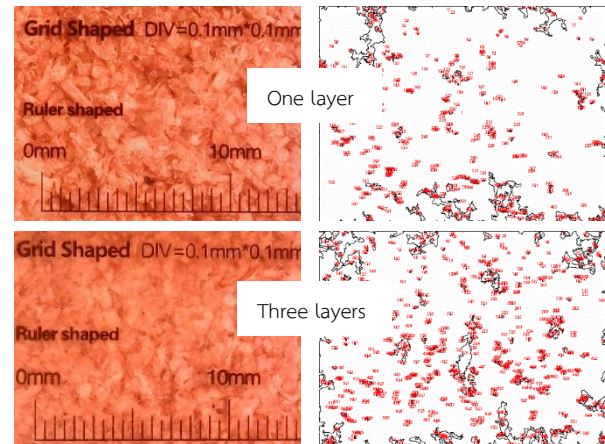


รูปที่ 8 ภาพสแกนพื้นผิว Surface roughness



รูปที่ 9 ภาพสแกนพื้นผิว Waviness

ค่าความหยาบผิว (Ra) เฉลี่ยของพื้นที่ผิวที่วัดได้ มีค่ามากที่สุดที่ $36.3058 \mu\text{m}$ ในการขึ้นรูปแผ่นผลิตภัณฑ์ แบบ 1 ชั้น และ $30.6972 \mu\text{m}$ ในการขึ้นรูปแบบ 3 ชั้น



รูปที่ 10 โครงสร้างรูพรุนบนพื้นผิว

การกระจายตัวรูพรุนบนพื้นผิว จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม ImageJ ในการขึ้นรูปแผ่นผลิตภัณฑ์แบบ 1 ชั้น มีจำนวนรูพรุน 454 และในการขึ้นรูปแบบ 3 ชั้น มีจำนวนรูพรุน 737

3.3.5 ทดสอบความทนทานของพื้นผิว (Abrasion Resistance)

ทดสอบชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมมีขนาด 100×100 มิลลิเมตร ทำการทดสอบที่ 900 - 4000 รอบ (Cycle) และมีก้อนน้ำหนักรวม 250 กรัม กดในขณะทดสอบ



รูปที่ 11 ทดสอบความทนทานต่อการขัดถู

บทความวิจัย (Research Article)

ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ในแต่ละความหนาแน่น ซึ่งหยุดเพื่อตรวจสอบการสูญเสียน้ำหนัก(มิลลิกรัม) และความลึก (มิลลิเมตร) ที่ 900, 1500, 2000 และ 4000 รอบ โดยเปรียบเทียบกับแผ่นไม้ปาร์ติเกิ้ล (Particle Board) ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

4. ผลการวิจัย

แผ่นวัสดุคอมโพสิตทดแทนไม้จากชิ้นไม้ยางพารา กับอีพ็อกซีเรซิน ที่มีจำนวนชั้นของแผ่นขึ้นไม้และความหนาแน่น ที่แตกต่างกัน คือ แผ่นขึ้นไม้อัดชนิดชั้นเดียวและแผ่นขึ้นไม้อัดชนิดสามชั้น นำมาอัดที่ความหนาแน่น 500, 700, 900 Kg/m³ ตามลำดับ โดยได้นำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกล ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมของยุโรป (European Standards) ผลการดำเนินงานสามารถรายงานเป็นลำดับได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

4.1.1 ความหนาแน่น (Density)

ค่าความหนาแน่นของแผ่นวัสดุคอมโพสิตที่อัตราส่วนระหว่างชิ้นไม้ยางพารากับอีพ็อกซีเรซิน ปริมาณ 50 : 50 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นอัตราส่วนควบคุม โดยมีจำนวนชั้นและความหนาแน่น ที่ต่างกัน ค่าแสดงเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ ตามเกณฑ์มาตรฐาน EN 323 พบว่า ค่าความหนาแน่นตรงตามมาตรฐานความหนาแน่นที่ 500 – 900 Kg/m³

4.1.2 ความชื้น (Moisture Content)

ปริมาณความชื้นเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่ส่งผลต่อเสถียรภาพของมิติและความทนทานของแผ่นวัสดุคอมโพสิต ในการศึกษาครั้งนี้ ปริมาณความชื้นของของแผ่นวัสดุคอมโพสิตทดแทนไม้จากชิ้นไม้ยางพารากับอีพ็อกซีเรซิน จะแตกต่างกัน ค่าความชื้นอยู่ในช่วง

3.94 – 6.23% ซึ่งผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน EN 322 ได้กำหนดไว้

4.1.3 การพองตัวตามความหนา (Thickness Swelling)

ทำการวัดความหนาขึ้นทดสอบ แล้วนำขึ้นทดสอบไปแช่น้ำในที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นทดสอบมาวัดความหนาหลังแช่น้ำ โดยค่าการพองตัวตามความหนา ต้องไม่เกิน 10% ตามเกณฑ์มาตรฐาน EN 317

4.1.4 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

ชั่งน้ำหนักขึ้นทดสอบ แล้วนำขึ้นทดสอบไปแช่น้ำในที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำขึ้นทดสอบมาชั่งน้ำหนักขึ้นทดสอบหลังแช่น้ำ โดยค่าการดูดซึมน้ำพบว่าขึ้นทดสอบที่ความหนาแน่น 500 Kg/m³ ทั้งแบบ 1 ชั้น และแบบ 3 ชั้น สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ให้มีค่าไม่เกิน 25% ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

Density rate (kg/m ³)	Layers	Density (kg/m ³)	Moisture Content %	Thickness Swelling %	Water Absorption %
500	1	535.83	3.94	2.07	32.51
	3	540	6.23	2.08	29.28
700	1	729	5.16	2.62	21.36
	3	753.5	4.84	2.80	16.44
900	1	879.5	4.26	1.96	7.25
	3	897.67	4.91	2.05	6.32

4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

สมบัติทางกลประเมินจากความแข็งแรงในการดัดงอโครงสร้างภายใน และพื้นผิวของแผ่นวัสดุคอมโพสิต ผลการทดสอบดังตารางที่ 6

บทความวิจัย (Research Article)

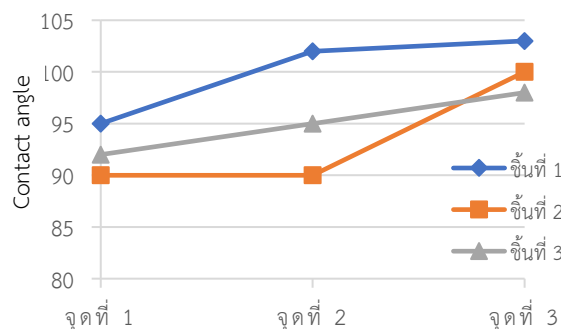
ตารางที่ 6 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

Density rate (kg/m ³)	Layers	(MOR) Modulus of Rupture (MPa)	(MOE) Modulus of Elasticity (MPa)	Internal Bonding (MPa)	Surface soundness (MPa)
500	1	11.85	3,144.43	1.27	2.22
	3	9.89	3,159.78	1.14	1.67
700	1	28.07	6,945.65	1.41	2.22
	3	22.19	6,391.18	1.35	1.85
900	1	31.52	8,342.88	2.06	2.14
	3	31.46	8,349.46	2.03	1.33

จากผลการทดสอบในตารางที่ 6 พบว่าค่าความต้านแรงดัดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 9.89-31.52 MPa ซึ่งส่วนใหญ่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน คือ ไม่น้อยกว่า 11 MPa เป็นไปตามรูปแบบการทดสอบแผ่นไม้ปาร์ติเคิล (EN 310, 1993) ชนิดใช้งานตกแต่งภายในหรือทำเฟอร์นิเจอร์ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 3,144.43-8,349.46 MPa ทั้งหมดเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน คือ ไม่น้อยกว่า 1,600 MPa ค่าความต้านแรงดัดตั้งฉากกับผิวหน้าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.14-2.06 MPa และค่าความยึดแน่นของผิวหน้าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.33-2.22 MPa ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน

4.3 ผลการทดสอบมุมสัมผัสผิวน้ำ

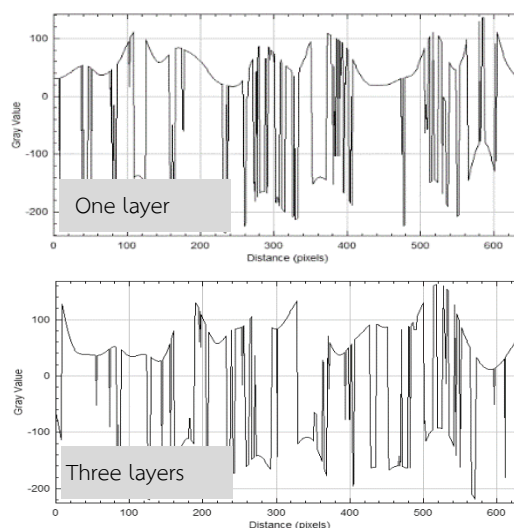
จากผลการทดลองจะเห็นว่า Contact Angle ทั้งหมดมีค่ามุมสัมผัสผิวน้ำมากกว่า 80 องศาซึ่งอยู่ในระดับ 1 แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวแผ่นผลิตภัณฑ์มีสมบัติ ค่าความไม่ชอบน้ำสูงสุด จึงสรุปออกมาได้ว่าการใช้ฟ็อกซีเรซินเป็นตัวประสานสามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติการกันน้ำได้จริง ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ค่ามุมสัมผัสผิวน้ำ

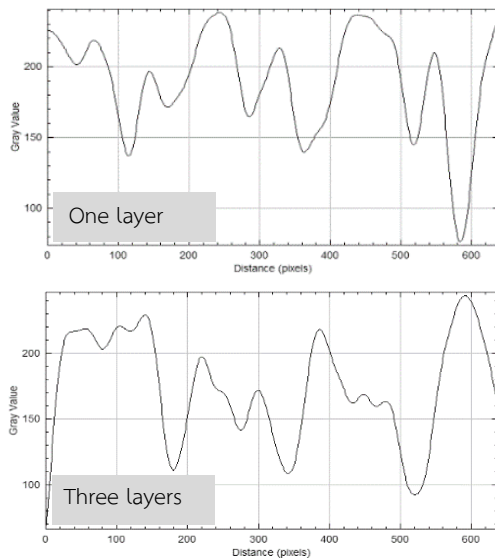
4.4 ผลการทดสอบค่าความหยาบผิว

ค่าความหยาบผิว (Ra) เฉลี่ยของพื้นที่ผิวที่วัดได้มีค่ามากที่สุดที่ 36.3058 μm ในการขึ้นรูปแผ่นผลิตภัณฑ์ แบบ 1 ชั้น และ 30.6972 μm ในการขึ้นรูปแบบ 3 ชั้น ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าความหยาบบนผิว

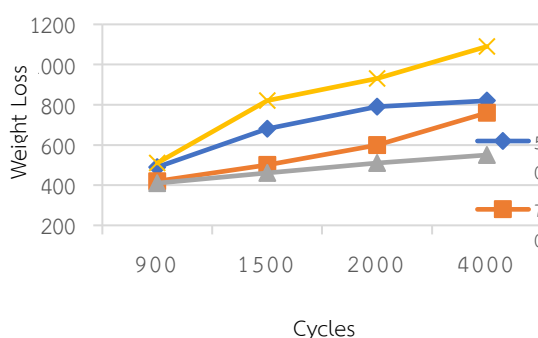
บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 14 กราฟแสดงส่วนของโค้งของพื้นผิว

4.5 ผลการทดสอบความทนทานของพื้นผิว

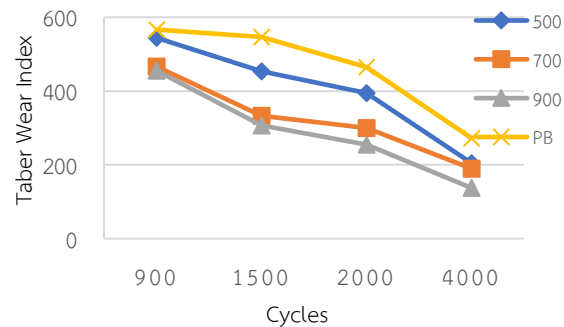
ผลการทดสอบต่อค่าการสูญเสียน้ำหนักของแผ่นผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่น 500, 700, 900 Kg/m³ เทียบกับแผ่นไม้ปาร์ติเกิ้ล (Particle Board) ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด แสดงดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 แสดงค่าการสูญเสียน้ำหนัก

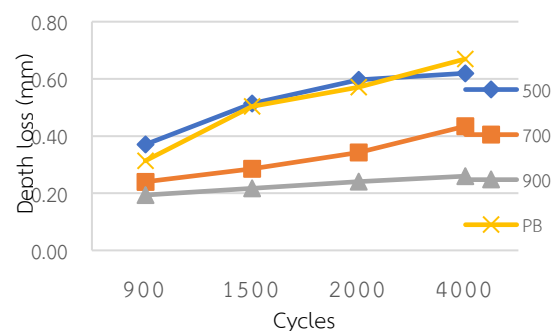
จากกราฟแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความหนาแน่น ส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งทุกค่าของการทดสอบ ในทุกความหนาแน่นของแผ่นผลิตภัณฑ์ทั้งหมดมีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าแผ่นไม้ปาร์ติเกิ้ล

ส่วนค่าดัชนีการสึกหรอที่ความหนาแน่น 900 Kg/m³ มีค่าการสึกหรอต่ำที่สุด รองลงเป็นที่ความหนาแน่น 700, 500 และแผ่นไม้ปาร์ติเกิ้ล ตามลำดับ ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 แสดงค่าดัชนีการสึกหรอ

ผลการทดสอบค่าการสูญเสียความลึก ในการทดสอบที่ 4000 รอบ ความหนาแน่น 500, 700, 900 Kg/m³ และแผ่นไม้ปาร์ติเกิ้ล มีค่า 0.62, 0.43, 0.26 และ 0.67 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งแผ่นผลิตภัณฑ์ที่ทุกความหนาแน่นมีค่าการสูญเสียความลึก น้อยกว่าแผ่นไม้ปาร์ติเกิ้ล โดยที่ความหนาแน่น 900 Kg/m³ มีค่าการสูญเสียความลึกน้อยที่สุด ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 แสดงค่าการสูญเสียความลึก

5. อภิปรายและสรุปผล

การศึกษากระบวนการขึ้นรูปแผ่นวัสดุคอมโพสิตทดแทนไม้จากขึ้นไม้ยางพารากับอีพ็อกซีเรซิน ซึ่งทำการขึ้นรูปแบบ 1 ชั้น และแบบ 3 ชั้น ที่ความหนาแน่น 500, 700 และ 900 Kg/m³ โดยใช้อัตราส่วนผสมของขึ้นไม้ยางพารากับอีพ็อกซีเรซิน ที่ 85 : 15, 65 : 35 และ 50 : 50 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งหลังจากขั้นตอนกระบวนการอัดขึ้นรูปขึ้นไม้อัดพบว่า อัตราส่วนที่มีส่วนผสมที่มีอีพ็อกซีเรซินน้อยกว่า 50% แผ่นขึ้นไม้อัดไม่เกาะตัว เป็นผลให้ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นผลิตภัณฑ์ได้ จึงได้ทำการขึ้นรูปเฉพาะอัตราส่วนผสมอีพ็อกซีเรซิน 50% โดยทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ พบว่า ค่าความหนาแน่น ค่าความชื้น ค่าการพองตัวตามความหนาแน่น เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบ มีเพียงค่าการดูดซึมน้ำที่ความหนาแน่น 500 Kg/m³ ทั้งแบบ 1 ชั้น และแบบ 3 ชั้น ที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด โดยให้มีค่าไม่เกิน 25% ผลการทดสอบสมบัติทางกลพบว่า ค่าความต้านแรงดัดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 9.89 - 31.52 MPa ซึ่งส่วนใหญ่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคือ ไม่น้อยกว่า 11 MPa ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 3,144.43 - 8,349.46 MPa ทั้งหมดเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน คือ ไม่น้อยกว่า 1,600 MPa ค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.14 - 2.06 MPa และค่าความยืดหยุ่นของผิวหน้าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.33 - 2.22 MPa ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน

การวิเคราะห์สมบัติการกันน้ำ จากการทดสอบมุมสัมผัสหยดน้ำ ทุกชั้นทดสอบมีสมบัติของพื้นผิวที่กันน้ำอยู่ในระดับ 1 คือ มีค่าการกันน้ำสูงสุด ตามมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ เนื่องจากอีพ็อกซีเรซินจัดอยู่ในกลุ่มเทอร์โมเซตติงโพลีเมอร์ เมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วจะมีความแข็งแรงทนทานเป็นอย่างมาก ไม่คืนรูป โดยทั่วไปอีพ็อกซีเรซินจะผสมกับสารเพิ่มความแข็ง (Hardener) ซึ่งเป็นสารประเภทโ

ลิเอมีน (Polyamine) ที่มีคุณสมบัติในการอุดช่องว่างได้ดี

การวิเคราะห์ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของพื้นผิวมีค่ามากที่สุดที่ 36.3058 μm ในการขึ้นรูปแบบผลิตภัณฑ์ แบบ 1 ชั้น และ 30.6972 μm ในการขึ้นรูปแบบ 3 ชั้น โดยมีขนาดของขึ้นไม้เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลถึงค่าความหยาบผิว ซึ่งใกล้เคียงเมื่อเทียบกับการศึกษาการประเมินความหยาบของพื้นผิวของแผ่นไม้อัดสามชั้นจากกล่องกระดาษลูกฟูกผสมเส้นใยไม้ โดยมีกาวยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์และเรซินเป็นตัวประสาน [15]

การวิเคราะห์ความทนทานของพื้นผิว จากการทดสอบค่าการสูญเสียน้ำหนัก ค่าดัชนีการสึกหรอ และค่าการสูญเสียความลึก ในการทดสอบการขัดถูที่ 4000 รอบ ทุกชั้นทดสอบ ทุกความหนาแน่น มีความทนทานของพื้นผิวสูงกว่าอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นไม้ปาร์ติเกิ้ล (Particle Board) จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่า แผ่นวัสดุคอมโพสิตทดแทนไม้จากขึ้นไม้ยางพารากับอีพ็อกซีเรซิน มีความเหมาะสมในการนำไปใช้พัฒนาเป็นแผ่นผลิตภัณฑ์ทดแทนไม้ธรรมชาติต่อไป เนื่องจากมีสมบัติการกันน้ำและความทนทานของพื้นผิวในระดับสูง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ Res-CIT0627/2023 รวมถึงภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร ที่ให้การอนุเคราะห์ในการใช้ห้องวิจัยและทดสอบแผ่นผลิตภัณฑ์ทดแทนไม้ธรรมชาติ ในการทดสอบและวิจัยในครั้งนี้ จนกระทั่งงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

บทความวิจัย (Research Article)

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] ธนาวุฒิ สุราษฎร์มณี, "อันตรายจากฟอร์มาลดีไฮด์ในสำนักงานและที่พักอาศัย," *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 2, หน้า 130-136, 2561.
- [2] เปรมณัช ขุมพร้อม, จริญญา เจริญเนตรกุล, และวรรณพร ชีววุฒิพงศ์, "แผ่นไม้ไผ่สานกันความร้อนจากชีเลื่อยไม้ยางพาราผสมน้ำยางพารา," ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, จังหวัดเชียงราย, 2565, หน้า 1-7.
- [3] พงศธร กองแก้ว, "สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมอีพ็อกซีเรซินแบบไฮบริด เสริมแรงด้วยเส้นใยรากหญ้าแฝกและเส้นใยเปลือกถั่วลิสง," รายงานการศึกษา, สถาบันวิจัยและพัฒนา, มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม, 2559.
- [4] Forest Research and Development Office, *Wood Substituted Biocomposites*, Royal Forest Department, Ministry of Natural Resources and Environment, 2012.
- [5] ทศพร โพธิ์เนียม, "การผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดจากต้นธูปฤๅษีและการประยุกต์ใช้สำหรับงานประดิษฐ์," *วิทยานิพนธ์ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*, สาขาวิชาเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2559.
- [6] *STRI Guide, Hydrophobicity Classification Guide*, 92/1, 1992.
- [7] ณัฏพล บัวใหญ่, "การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์มุมสัมผัสหยดน้ำโดยวิธีการประมวลผลภาพเพื่อประเมินระดับความไม่ชอบน้ำของผิวฉนวนไฟฟ้า," *วิทยานิพนธ์ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2564.
- [8] สัมภาษณ์ ศรีสุข, "การศึกษาการวัดความหยาบผิวไม้ยางพาราแปรรูปโดยวิธีการประมวลผลภาพ," *วิทยานิพนธ์ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [9] *EN 13696:2008, Wood flooring – Test methods to determine elasticity and resistance to wear and impact resistance*, European Committee for Standardization; British Standard BS EN 13696:2008, 2009.
- [10] Taber Industries, "The TABER® Rotary Platform Abrasion Tester," [ออนไลน์]. Available: <https://www.taberindustries.com/taber-rotary-abraser>. [เข้าถึงเมื่อ: 25 กุมภาพันธ์ 2568].
- [11] T. García-Ortuño, J. Andréu-Rodríguez, M. T. Ferrández-García, M. Ferrández-Villena, and C. E. Ferrández-García, "Evaluation of the physical and mechanical properties of particleboard made from giant reed," *BioResources*, vol. 6, no. 1, pp. 477-486, 2011.
- [12] M. Schneider, T. Stehle, J. T. Benthien, and M. Ohlmeyer, "Stiffness modelling of particles in the core layer for the manufacturing of wood-reduced particleboard," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 76, no. 3, pp. 947-952, 2018.
- [13] *EN 312:2004, Particleboards—Specifications*, European Committee for Standardization: Slovenski Standard, 2011.

บทความวิจัย (Research Article)

- [14] A. Ashori and A. Kuzmin, "Effect of chitosan-epoxy ratio in bio-based adhesive on physical and mechanical properties of medium density fiberboards from mixed hardwood fibers," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, pp. 1-11, 2024.
- [15] H. Abdolzadeh and K. Doosthoseini, "Evaluation of old corrugated container and wood fiber application on surface roughness of three-layer particleboard," *BioResources*, vol. 4, no. 3, pp. 970-978, 2009.

การพัฒนาวัสดุดูดซับเสียงจากเส้นใยกกซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการทอเสื่อของวิสาหกิจชุมชน ผลิตภัณฑ์แปรรูปเสื่อกกชุมชนตำบลสระแก้ว จังหวัดจันทบุรี

เบญจมาศ เนติวรรักษา^{1,*}, สามารถ จันทนา², วิทวัส สิงห์สังข์¹, อนุรักษ์ รอดบำรุง¹,
สุรพงษ์ ปัญญาหา³ และ นฤมล เลิศคำฟู³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตและการจัดการคุณภาพ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

² สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

³ สาขาวิชาเทคโนโลยีอ้อมนิและเครื่องประดับ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: Benjamas.n@rbru.ac.th โทรศัพท์: 081-6441880

(รับบทความ: 12 เมษายน 2568; แก้ไขบทความ: 14 มิถุนายน 2568; ตอรับบทความ: 30 มิถุนายน 2568)

บทคัดย่อ

เสื่อจันทบุรี สินค้าที่เป็นอัตลักษณ์แสดงถึงภูมิปัญญาที่สั่งสมมาทางด้าน การทอเสื่อของชาวจันทบุรี แต่ในกระบวนการทอเสื่อ และการแปรรูปเสื่อ ก็นำมาซึ่งเศษขยะจากเส้นกกที่มีลักษณะย่อยสลายยาก จากปัญหาของชุมชนนำมาสู่วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัสดุเหลือทิ้งโดยการนำเทคโนโลยี นวัตกรรม มาประยุกต์ในการออกแบบให้กลายเป็นวัสดุดูดซับเสียงจากเยือก โดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุ ดูดซับเสียงจากเศษเสื่อ และจากการวิจัยพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมวัสดุดูดซับเสียงจากเศษเสื่อ กก คือ เตรียมด้วยการแช่ NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของเศษเสื่อ กกแห้ง ขึ้นรูปให้มี ความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดระดับความดังของเสียง (NRC) เท่ากับ 0.50 และมีความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 0.40 ± 0.13 เมกะปาสกาล (MPa) จากการทดสอบคุณสมบัติการลามไฟพบว่าอัตราการเผาไหม้ของแผ่นดูดซับเสียง จากเศษเสื่อ กก มีผลการทดสอบผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน UL94 ทุกประการ ดังนั้น แผ่นดูดซับเสียงจากเยือก กก จึงมีคุณสมบัติไม่ลามไฟ เหมาะสำหรับการนำไปใช้ติดตั้งภายในอาคาร

คำสำคัญ: วัสดุดูดซับเสียง, เสื่อ, วัสดุเหลือใช้

การอ้างอิงบทความ: เบญจมาศ เนติวรรักษา, สามารถ จันทนา, วิทวัส สิงห์สังข์, อนุรักษ์ รอดบำรุง, สุรพงษ์ ปัญญาหา และ นฤมล เลิศคำฟู, "การพัฒนาวัสดุดูดซับเสียงจากเส้นใยกกซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการทอเสื่อของวิสาหกิจชุมชนผลิตภัณฑ์แปรรูปเสื่อกกชุมชนตำบลสระแก้ว จังหวัดจันทบุรี," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 3, ฉบับที่ 4, หน้า 17-28, 2568.

Development of Sound-Absorbing Materials from Waste Reed Fibers: Utilizing Byproducts from Dee Bang Sa Khao Community Reed Mat Enterprise, Chanthaburi

Benjamas Netiworaruksa^{1*}, Samart Chanthana², Witawat Singsang¹, Anurak Rodbumrung¹,
Surapong Panyata³ and Narumon Lertcumfu³

¹ Department of Production Engineering and Quality Management, Faculty of Industrial Technology,
Rambhai Barni Rajabhat University

² Department of Industrial Art, Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University

³ Department of Gem and Jewelry Technology, Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University

* Corresponding Author: Benjamas.n@rbru.ac.th, Tel: 081-6441880

(Received: April 12, 2025; Revised: June 14, 2025; Accepted: June 30, 2025)

Abstract

“Chanthaboon reed mats” are a unique local product that represents the traditional wisdom and heritage of reed weaving in Chanthaburi Province, Thailand. However, the production and processing of these mats generate a considerable amount of reed fiber waste, which is not easily biodegradable. In response to this community issue, the objective of this research is to enhance the value of such waste materials by applying technology and innovation to design and develop sound-absorbing materials from reed pulp. The study aimed to determine the optimal conditions for fabricating the sound-absorbing materials using waste reed mat fibers. The results revealed that the most suitable condition involved soaking the waste fibers in a 15% by weight sodium hydroxide (NaOH) solution, based on the dry weight of the material, and forming the product with a thickness of 25 millimeters. Under these conditions, the sound-absorbing material achieved a Noise Reduction Coefficient (NRC) of 0.50 and a tensile strength of 0.40 ± 0.13 MPa. Flammability tests demonstrated that the reed pulp sound-absorbing materials met all UL94 standard criteria, confirming their flame-retardant properties and suitability for indoor installation.

Keywords: Sound-Absorbing Materials, Reed Mat, Waste Materials

Please cite this article as: B. Netiworaruksa, S. Chanthana, W. Singsang, A. Rodbumrung, S. Panyata and N. Lertcumfu, “Development of Sound-Absorbing Materials from Waste Reed Fibers: Utilizing Byproducts from Dee Bang Sa Khao Community Reed Mat Enterprise, Chanthaburi,” *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 3, no. 4, pp. 17-28, 2025.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

เสื้อจันทบุรี ชื่อที่เชื่อว่าใครหลายคนเคยได้ยิน เพราะเป็นสินค้าที่แสดงถึงอัตลักษณ์พื้นถิ่นของจังหวัดจันทบุรี แสดงถึงภูมิปัญญาดั้งเดิมของการนำต้นกกมาใช้ประโยชน์ในจังหวัดจันทบุรีโดยเน้นการนำมาทอเป็นเสื้อ การทอเสื้อของชาวจันทบุรีเริ่มมาจากกลุ่มผู้นับถือศาสนาคาทอลิกและกระจายไปสู่ชาวบ้านรอบตัวเมือง เช่น ตำบลเสม็ดงาม ตำบลบางสระเก้า ตำบลเกาะขวาง [1] จนกระทั่งเมื่อสมเด็จพระนางเจ้ารำไพพรรณี พระบรมราชินีในรัชกาลที่ 7 ได้เสด็จพระราชดำเนินมาประทับอยู่ ณ วังสวนบ้านแก้ว เมื่อปี พ.ศ.2493 ซึ่งปัจจุบันเป็นที่ตั้งของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี พระองค์ได้ทรงพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการทอเสื้อจันทบุรีให้เจริญก้าวหน้ายิ่งขึ้น โดยทรงพบข้อบกพร่องบางประการ จึงมีพระราชดำริให้ปรับปรุงและพัฒนาวิธีการผลิตในเรื่องกรรมวิธีการฟอกเส้นกกให้ขาวก่อนและนำมาผ่านกระบวนการย้อมสี จะทำให้ได้เส้นกกหลังย้อมที่มีสีสดใสมากขึ้นและมีคุณภาพการย้อมติดของสีคงทนถาวร อีกทั้งทรงได้โปรดเกล้าฯ ให้ตั้งโรงงานทอเสื้อที่วังสวนบ้านแก้ว แบ่งเป็นแผนกต่าง ๆ คือ แผนกฟอกเส้นกกให้ขาว แผนกย้อมสีกก แผนกทอเป็นผืนเสื้อ แผนกตัดเย็บเสื้อเป็นผืนตามขนาดที่แตกต่างกัน เสื้อที่ผลิตได้ในขณะนั้นชาวบ้านขนานนามว่า “เสื้อจันทบุรีสมเด็จ”

นอกจากนั้นยังนำเสื้อที่ทอแล้วมาประดิษฐ์เป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ อาทิเช่น ผลิตเป็นกระเป๋าเอกสาร กระเป๋าถือสตรี ที่รองจาน ที่รองแก้ว กล่องใส่กระดาษเช็ดมือ ฯลฯ และโปรดเกล้าฯ ให้ติดเครื่องหมายการค้าใน ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเสื้อ เป็นรูปคนหาบกระจาด ใช้ชื่อว่า “อุตสาหกรรมชาวบ้าน” [2] นับตั้งแต่นั้นมาจนถึงปัจจุบันภูมิปัญญาการทอเสื้อกได้เกิดการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงจากที่ทำเพื่อการใช้ทรัพยากรในท้องถิ่นของตนเองให้เกิดความคุ้มค่านำมาใช้ประโยชน์ในการดำรงชีวิต ก็เกิดการ

เปลี่ยนแปลงมาเป็นการทอเพื่อนำมาใช้ในการประกอบเป็นอาชีพ เพื่อหารายได้มาสู่ครอบครัว [3] ผ่านการรวมตัวกันของคนในชุมชนเกิดเป็นแรงงานชุมชนและวิสาหกิจชุมชน อาทิ วิสาหกิจชุมชนดีบางสระเก้าและศูนย์หัตถกรรมพื้นบ้านการทอเสื้อจันทบุรีชุมชนเสม็ดงาม เป็นต้น

ทั้งนี้ ในกระบวนการทอเสื้อกและการแปรรูปเสื้อกเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่าง ๆ นั้นจะเกิดเศษขยะจากเส้นกกในกระบวนการผลิตเสมอ โดยชุมชนไม่สามารถนำเศษขยะจากเส้นกกกลับมาใช้ประโยชน์ทั้งทางด้านการสร้างผลิตภัณฑ์ เนื่องจากเศษขยะจากเส้นกกจะมีความยาวและสีของเส้นกกที่แตกต่างกัน ไม่สามารถนำมาทอหรือนำไปจักสานต่อได้ หรือหากต้องการนำมาใช้ด้านการเกษตรก็ไม่สามารถทำได้ เช่น การนำมาทำปุ๋ยชีวภาพไม่สามารถทำได้ เนื่องจากเส้นกกที่ใช้ในการทอเสื้อส่วนใหญ่มักจะผ่านกระบวนการย้อมสี อาทิ สีดำ สีเขียว สีแดง สีชมพู เป็นต้น โดยสีที่ใช้ในการย้อมเส้นกกจะเป็นสีเคมี เพราะหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดและมีความสะดวกในการใช้งาน อีกทั้งยังย่อยสลายยาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้เศษขยะจากเส้นกกในกระบวนการทอเสื้อกกลายเป็นขยะมูลฝอยประเภทขยะทั่วไปที่มีลักษณะย่อยสลายยากเกิดขึ้นในชุมชน ซึ่งทางจังหวัดต้องจัดการแบบรื้อร่อนแยก RDF ด้วยระบบ MBT หรือการเทกอง ฝังกลบ ในพื้นที่ของหน่วยงานราชการ [4] เพื่อเป็นการนำองค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมวัสดุและการออกแบบผลิตภัณฑ์ การนำขยะมาแปรรูปให้เกิดมูลค่าเพิ่มและสร้างผลิตภัณฑ์สินค้าให้เกิดประโยชน์กับประเทศไทย รวมทั้งการนำพระราชบัญญัติส่งเสริมวิสาหกิจชุมชน (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2562 มาใช้เพื่อส่งเสริมวิสาหกิจชุมชนนำทรัพยากรและภูมิปัญญาของท้องถิ่นมาพัฒนาออกแบบและสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ที่ตอบโจทย์ความต้องการของชุมชนหรือตลาดการค้า อันจะนำไปสู่การสร้างงาน สร้างรายได้ให้แก่คนในชุมชน และสร้าง

บทความวิจัย (Research Article)

วิสาหกิจชุมชนของประเทศไทยให้มีความเข้มแข็งและมีความพร้อมสำหรับการแข่งขันการค้า ในอนาคตได้ โครงการวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้เส้นกึ่งที่เป็นขยะมูลฝอยจากกระบวนการทอเสื่อ กก มาพัฒนาให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ คณะผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญของการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัสดุเหลือทิ้ง โดยจะนำเทคโนโลยี นวัตกรรมมาประยุกต์ในการออกแบบให้กลายเป็นวัสดุดูดซับเสียง และจัดทำต้นแบบและนำไปทดสอบในการดูดซับเสียงและทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ เพื่อให้ได้วัสดุดูดซับเสียงจากเส้นใยกก คณะผู้วิจัยจะนำองค์ความรู้ กระบวนการผลิตต้นแบบผลิตภัณฑ์ ไปถ่ายทอดสู่วิสาหกิจชุมชนต่อไป เป็นการสร้างผลิตภัณฑ์ที่ตอบโจทย์แก้ปัญหาขยะเหลือทิ้งจากเศษเสื่อ กก ของชุมชน เป็นการลดปริมาณขยะมูลฝอยในชุมชน ซึ่งสอดคล้องกับการอนุรักษ์ พื้นฟู และบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมให้เกิดความสมดุลและยั่งยืนโดยประชาชนมีส่วนร่วมตามยุทธศาสตร์การพัฒนาจังหวัดจันทบุรี พ.ศ. 2561 – 2565 ดังนั้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การเพิ่มมูลค่าให้กับเศษวัสดุเหลือทิ้งโดยการนำเทคโนโลยี นวัตกรรม มาประยุกต์ในการออกแบบให้กลายเป็นวัสดุดูดซับเสียงจากเยื่อ กก โดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุดูดซับเสียงจากเศษเสื่อ กก และนำไปทดสอบคุณสมบัติการดูดซับเสียง คุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติการต้านทานการลามไฟ

2. ทบทวนวรรณกรรม

การดูดซับเสียง คือ การเปลี่ยนแปลงผลรวมของพลังงานเสียงที่ลดลงเมื่อเสียงตกกระทบหรือผ่านตัวกลางใด ๆ โดยวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับเสียงที่ดีจึงเป็นวัสดุจำพวกเส้นใยและวัสดุที่มีรูพรุน เมื่อเสียงเดินทางมาตกกระทบ พลังงานจะถูกลดทอนลงจากวัสดุจำพวกเส้นใยและวัสดุที่มีรูพรุนเพราะมีความสามารถที่ยึดหยุ่นต่อการสั่นสะเทือนได้ดี

ทำให้พลังงานเสียงสูญเสียไปกับการทำให้วัสดุสั่นสะเทือนและกลายเป็นพลังงานความร้อน [5] ในการศึกษาเรื่องการดูดซับเสียงต้องรู้จักกับค่าต่าง ๆ ต่อไปนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับเสียง (Sound Absorption Coefficient (SAC)) คือ อัตราส่วนของพลังงานเสียงที่ถูกดูดซับไปในวัสดุดูดซับเสียงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับเสียงนั้นเมื่อเสียงตกกระทบ เทียบกับพลังงานเสียงจากแหล่งกำเนิด การดูดซับเสียงของทุกวัสดุจะแปรผันกับความถี่ของเสียงที่เข้าไปกระทบ ดังนั้นค่าการดูดซับเสียงจะถูกวัดที่หลายความถี่ ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับเสียงมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ในความเป็นจริงแล้วไม่มีวัสดุใดมีค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับเท่ากับ 0 คือ วัสดุนั้นไม่สามารถดูดซับเสียงได้ มีการสะท้อนกลับหมดหรือค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับเสียงเท่ากับ 1 คือ วัสดุสามารถดูดซับเสียงได้ทั้งหมด ไม่มีเสียงสะท้อนกลับซึ่งวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับเสียงน้อยกว่า 0.15 จะถือว่าเป็นวัสดุสะท้อนเสียง ถ้ามีค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับเสียงมากกว่า 0.40 ถือเป็นวัสดุดูดซับเสียง ในการเลือกวัสดุดูดซับเสียงที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับเสียงสูง ๆ นอกจากค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับเสียงควรจะรู้จักตัวเลขระบุความสามารถในการดูดซับเสียง หรือสัมประสิทธิ์การลดระดับความดังของเสียง (Noise Reduction Coefficient (NRC)) โดย NRC คือ ค่าเฉลี่ยของ SAC ที่ถูกวัดที่ความถี่ต่าง ๆ โดยทั่วไปค่า NRC จะต้องมีย่านค่ามากกว่า 0.40 ถึงจะถือว่าเป็นวัสดุดูดซับเสียง วัสดุที่มีรูพรุน หนาแน่น จะยอมให้คลื่นเสียงทะลุผ่านไปได้ ซึ่งจะเป็นที่ที่พลังงานเสียงจะเปลี่ยนเป็นความร้อนเนื่องจากความเสียดทานระหว่างช่องอากาศกับเส้นใยวัสดุ วัสดุประเภทนี้สามารถมีค่า NRC ได้มากถึง 0.95 – 1.00 ขึ้นอยู่กับความหนาของฉนวน [6] ดังนั้นจึงนิยมนำเส้นใยธรรมชาติมาขึ้นรูปเป็นวัสดุดูดซับเสียง ซึ่งในตารางที่ 1 แสดงข้อมูลของงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมาที่มีการใช้เส้นใยธรรมชาติมาทำวัสดุดูดซับเสียงและ

บทความวิจัย (Research Article)

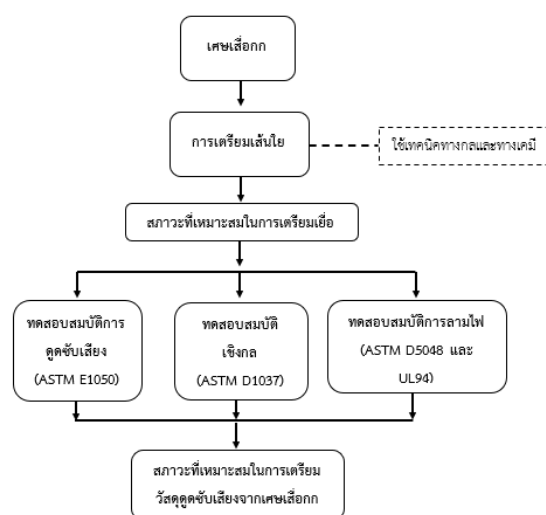
ค่า NRC ของวัสดุแต่ละชนิด จะเห็นได้ว่าเส้นใยธรรมชาติส่วนใหญ่มีค่า NRC สูงกว่า 0.40 ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุดูดซับเสียงแต่ถ้า NRC น้อยกว่า 0.40 สามารถที่จะพัฒนาให้ค่าเพิ่มมากขึ้นโดยเปลี่ยนวัสดุประสาน หรือเปลี่ยนอนุภาคของเส้นใยส่วนผสมที่นำมาทำเป็นแผ่นดูดซับเสียง รวมถึงความหนาของแผ่นดูดซับเสียงก็ส่งผลต่อค่า NRC [7,8] จากงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบว่ามีกรนำเส้นใยกกมาใช้ในการทำวัสดุดูดซับเสียง ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงนำเศษกกเหลือทิ้งในกระบวนการทอเสื่อมาพัฒนาเป็นแผ่นดูดซับเสียง โดยจะหาสภาวะการเตรียมเส้นใยกกที่เหมาะสมและนำไปศึกษาคุณสมบัติเชิงกล สมบัติความต้านทานการลามไฟ และสมบัติการดูดซับเสียง

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดระดับความดังของเสียง (NRC) ของวัสดุดูดซับเสียงจากเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ

ชนิดของเส้นใย	NRC	อ้างอิง
ขี้เลื่อย	0.498	นาปีเส้าะ กาโบะ และคณะ [6]
ขานอ้อย	0.355	
เปลือกกล้วย	0.415	
เส้นใยกันขงและแกนลำต้นกล้วย	น้อยกว่า 0.400	กอบร เปรมฤทัย และคณะ [9]
เส้นใยจากกล้วย	0.520	พฤทธิภูมิ ฉัตตะวิริยะ และคณะ [10]
เส้นใยกล้วยงโดยใช้ปูนปลาสเตอร์เป็นวัสดุประสาน	0.430	ศิริเดช สุริตและคณะ [11]
เส้นใยขานอ้อยผสมน้ำยางพารา	0.325	ณัฐนิชา งามะราภา และคณะ [12]

อีกเหตุผลหนึ่งซึ่งถือเป็นข้อดีของเศษเสื่ออกคือ ต้นกกมีปริมาณเซลลูโลสอยู่ในปริมาณมาก สูงถึงร้อยละ 70.52 ปริมาณเซลลูโลสส่งผลต่อสมบัติความเป็นฉนวนดูดซับเสียง จะเห็นได้ว่าในตารางที่ 1 พบว่าเส้นใยธรรมชาติที่มีค่า NRC สูงจะมีปริมาณเซลลูโลสสูงเช่นกัน เช่น เส้นใยกล้วยงมีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 79.87 เส้นใยจากกล้วยมีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 83.4 เป็นต้น [13]

3. วิธีการวิจัย



รูปที่ 1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 1 โดยขั้นตอนหลักในการดำเนินงานแบ่งเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้

3.1 การเตรียมเส้นใยจากเศษเสื่ออก

คัดแยกเส้นใยปอที่ปนมากับเศษเสื่ออก สำหรับเส้นใยปอนั้นจะใช้เป็นเส้นใยในการสานเสื่ออก ดังนั้นจึงปะปนมากับเศษเสื่ออกต้องทำการคัดแยกออกเป็น

บทความวิจัย (Research Article)

ลำดับแรก จากนั้นตวงน้ำปริมาณ 50 เท่าของน้ำหนักแห้งของเศษเสื่อกกที่ใช้ (น้ำหนักเศษเสื่อกก : น้ำ = 50 : 1) ใส่ลงในหม้อต้มสแตนเลส แล้วซังโซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเกรด ปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของเศษเสื่อกกแห้งใส่โซเดียมไฮดรอกไซด์แบบเกรดลงในน้ำที่เตรียมไว้ คนให้ละลาย นำเศษเสื่อกกแห้งมาซังให้ได้ปริมาณ 200 กรัม จากนั้นล้างให้สะอาดและใส่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เริ่มจับเวลาหลังจากสารละลายเดือด ต้มเป็นระยะเวลา 30 นาที โดยคนทุก ๆ 15 นาที จากนั้นล้างเยื่อกกที่ผ่านการต้มด้วยน้ำสะอาดเพื่อชะล้างสารเคมี โดยล้างจนกว่าน้ำที่ใช้ล้างเยื่อกกมีค่า pH เป็นกลาง ตากเยื่อกกที่ได้ให้แห้งก่อนนำไปขึ้นรูป

3.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล(ความต้านทานแรงดึง)

การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นดัดซับเสียงจากเส้นใยกกโดยการทดสอบความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D828 [14] ใช้เครื่องทดสอบ LLOYD รุ่น LR5K

3.3 การทดสอบสมบัติความต้านทานการลามไฟ

การทดสอบสมบัติการลามไฟของแผ่นดัดซับเสียงจากเส้นใยกกตามมาตรฐานการทดสอบการลามไฟ ASTM D635 [15] และเกณฑ์ การทดสอบตามมาตรฐาน UL94 [16] เพื่อทดสอบสมบัติของวัสดุดูดซับเสียง

3.4 การทดสอบสมบัติการดูดซับเสียง

การทดสอบสมบัติการดูดซับเสียงของแผ่นวัสดุดูดซับเสียงจากเส้นใยกกทำโดย บริษัท Acoustic Laboratory Thailand (ALT) และทดสอบโดยทำตามมาตรฐาน ASTM E1050 [17]

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือการนำเศษกกเหลือทิ้งในกระบวนการทอเสื้อมาพัฒนาเป็นแผ่นดูดซับเสียง โดยจะหาสภาวะการเตรียมเส้นใยกกที่เหมาะสมซึ่งในการเตรียมจะแช่เศษเสื่อกกในสารละลาย NaOH ในปริมาณที่แตกต่างกันโดยใช้ปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของเศษเสื่อกกแห้ง โดยในแต่ละความเข้มข้นจะมีการทดลองซ้ำความเข้มข้นละ 5 ครั้ง ต้มเป็นระยะเวลา 30 นาที หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วนำไปตากให้แห้ง จะเห็นลักษณะเยื่อกกที่ได้จากการแช่ด้วยปริมาณสารละลาย NaOH ที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เยื่อกกหลังจากแช่ด้วย NaOH ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ก) 5% ข) 10% ค) 15%

จากรูปที่ 2 การเตรียมเยื่อกกจากเศษเสื่อกกโดยการแช่ด้วยสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 พบว่าเยื่อที่ได้จะมีลักษณะแข็ง และยังอยู่

บทความวิจัย (Research Article)

ในรูปของเศษเสื่อกกเนื่องจากเส้นใยที่ผ่านการย่อยยังจับตัวกันอยู่ไม่แยกออกเป็นเยื่อ (รูปที่ 2. ก)) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นสารละลาย NaOH ให้สูงขึ้นเป็น ร้อยละ 10 และ 15 ตามลำดับ พบว่าสามารถตีเยื่อได้ง่ายขึ้นส่งผลให้ลักษณะของเยื่อจะเป็นเส้นใยให้เห็นชัดเจน (รูปที่ 2. ข) และ ค)) แต่ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ยังมีบางส่วนยังอยู่ในรูปของเส้นใยกัก เมื่อความเข้มข้นของ NaOH ถึงร้อยละ 15 เส้นใยก็กลายเป็นเยื่อกกอย่างสมบูรณ์ ถ้าเพิ่มความเข้มข้นมากกว่านี้เยื่อกกจะย่อยสลายหมดไม่อยู่ในสภาพเส้นใยที่ใช้งานได้ และสังเกตได้ว่าสีของเยื่อกกมีความสว่างขึ้นนอกจากนี้เมื่อนำมาหาค่าผลผลิตที่ได้ (yield) ของเยื่อกก พบว่าเป็นไปตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าผลผลิตที่ได้ (yield) ของเยื่อกก

ความเข้มข้น NaOH (%)	มวลแห้งก่อนต้ม (กรัม)	เยื่อแห้งหลังต้ม (กรัม)	ร้อยละผลผลิต
5	200	137.10 ± 4.09	68.55
10	200	116.10 ± 3.01	58.05
15	200	112.70 ± 2.62	56.35

เมื่อพิจารณาค่าผลผลิตของเยื่อกกที่ได้จากการใช้สารละลาย NaOH พบว่าผลผลิตของเยื่อที่ได้จะมีปริมาณลดลงเมื่อมีการใช้สารละลาย NaOH ในปริมาณที่สูงขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ นพดล โพธิ์กำเนิด และคณะ (2562) [18] โดยการย่อยด้วยสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5, 10 และ 15 จะได้ผลผลิตเยื่อกกร้อยละ 68.55, 58.05 และ 56.35 ตามลำดับ ดังนั้น สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุดูดซับเสียงจากเศษเสื่อกกคือ การแช่ด้วย NaOH ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของเศษเสื่อกกแห้ง จะได้เยื่อกกที่มีความเป็น

เส้นใย มีความฟู เหมาะแก่การนำมาขึ้นรูปเป็นวัสดุดูดซับเสียงจากเยื่อกกและค่าผลผลิตที่ได้สูงถึงร้อยละ 56.35 สาเหตุที่ค่าผลผลิตสูงเนื่องจากต้นกกมีปริมาณเซลลูโลสอยู่ในปริมาณมาก โดยมีปริมาณไฮโดรเซลลูโลสสูงถึงร้อยละ 70.52 [19] ซึ่งค่าผลผลิตที่ได้หลังจากแช่ด้วย NaOH จะขึ้นอยู่กับปริมาณเซลลูโลสที่พืชชนิดนั้นมี ถ้าปริมาณเซลลูโลสสูงค่าผลผลิตที่ได้ก็จะสูงด้วย [20] นอกจากนี้การมีเซลลูโลสในปริมาณมากจะส่งผลให้เส้นใยมีสมบัติความเป็นฉนวนดูดซับเสียงที่ดีขึ้นตามลักษณะของเยื่อแผ่นเมมเบรน [21] ด้วยเหตุและปัจจัยเหล่านี้จึงเหมาะสมที่จะนำเศษเสื่อกกเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเสื่อจันทบูรมาทดลองผลิตเป็นวัสดุดูดซับเสียง

ดังนั้น จึงนำเยื่อกกที่เตรียมไว้มาทำการขึ้นรูปโดยนำไปอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แล้วนำแม่พิมพ์ไปให้ความร้อนในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 6 ชั่วโมง กำหนดความหนาของแผ่นดูดซับเสียงที่ 25 มิลลิเมตร ตามความหนาของแผ่นดูดซับเสียงที่มีวางจำหน่ายในท้องตลาด หลังจากนั้นจึงถอดชิ้นงานแผ่นดูดซับเสียงออกจากแม่พิมพ์ สุดท้ายแล้วจะได้แผ่นดูดซับเสียง



รูปที่ 3 แผ่นดูดซับเสียงจากเยื่อกกที่เตรียมด้วย NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของเศษเสื่อกกแห้ง มีความหนา 25 มิลลิเมตร

บทความวิจัย (Research Article)

จากเยื่ออกที่เตรียมด้วย NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของเศษเยื่ออกแห้ง มีความหนา 25 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3 จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติการดูดซับเสียงตามมาตรฐาน ASTM E1050 โดยบริษัท Acoustic Laboratory Thailand (ALT) เป็นผู้รับดำเนินการทดสอบ เพื่อพิสูจน์ว่าแผ่นดูดซับเสียงที่เตรียมจากเศษกกเหมาะสมที่จะเป็นนำมาผลิตเป็นวัสดุดูดซับเสียงหรือไม่ โดยต้องมีค่า NRC สูงกว่า 0.40 จึงถือว่าเป็นวัสดุดูดซับเสียง จากผลการทดลองพบว่า แผ่นวัสดุดูดซับเสียงที่ผลิตจากเยื่ออกมีค่าความสามารถในการดูดซับเสียงเฉลี่ย NRC เท่ากับ 0.50 ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ที่ดีเมื่อพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุดูดซับเสียงโดยเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุจากเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่น ๆ ตามที่แสดงในตารางที่ 1 พบว่าเยื่ออกมีค่า NRC ใกล้เคียงกับเส้นใยจากกล้วย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวัสดุดูดซับเสียงดังกล่าวมีการนำไปใช้งานภายในอาคาร จึงจำเป็นต้องพิจารณาคุณสมบัติเพิ่มเติม เช่น ความต้านทานแรงดึง และสมบัติด้านการต้านทานการลามไฟ เป็นต้น โดยเฉพาะคุณสมบัติเกี่ยวกับการติดไฟหรือลามไฟ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรให้ความสำคัญในการเลือกใช้วัสดุสำหรับงานภายในอาคาร

ในงานวิจัยนี้ การทดสอบสมบัติการลามไฟของแผ่นดูดซับเสียงดัดแปลงมาจากขั้นตอนที่แนะนำในมาตรฐานการทดสอบการลามไฟ ASTM D635 และเกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐาน UL94 โดยชิ้นงานทดสอบจะถูกตัดให้เป็นชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 13 มิลลิเมตร และยาว 120 มิลลิเมตร ก่อนการทดสอบจะมีการกำหนดเส้นเริ่มต้นการทดสอบที่ระยะ 25 มิลลิเมตรและเส้นสิ้นสุดการทดสอบที่ระยะ 100 มิลลิเมตร จากปลายด้านที่ได้รับเปลวไฟ ก่อนเริ่มทดสอบ ชิ้นงานทดสอบจะถูกวางในแนวนอนขนานกับพื้นและถูกเปลวไฟที่บริเวณปลายชิ้นงานเป็นเวลา 30 วินาที เมื่อเกิดการลุกลามของไฟผ่านเส้นเริ่มต้นจะเริ่มจับเวลา และยุติการจับเวลาเมื่อการลามไฟได้

สิ้นสุดลง ระยะเวลาที่เกิดการลามไฟและระยะทางที่ไฟสามารถลุกลามได้ จะถูกบันทึกและนำไปคำนวณหาอัตราการเผาไหม้ (Linear Burning Rate) ตามสมการที่ (1)

$$v = \frac{60L}{t} \quad (1)$$

เมื่อ v คือ อัตราการเผาไหม้ (มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min))
 L คือ ระยะทางที่ไฟสามารถลุกลามได้ (มิลลิเมตร (mm))
 t คือ ระยะเวลาที่เกิดการลามไฟ (วินาที (s))

สำหรับผลการทดลองการลามไฟของแผ่นดูดซับเสียงจากเยื่ออก แสดงในตารางที่ 3 ตามมาตรฐาน UL94 ระบุไว้ว่าในการทดสอบหนึ่งชุดจะใช้ตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง วัสดุที่ผ่านการทดสอบต้องมีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์ที่กำหนดทั้งสามตัวอย่างจึงจะถือว่าผ่านเกณฑ์ วัสดุที่มีสมบัติการต้านทานการลามไฟตามมาตรฐานโดยข้อกำหนดระบุว่าชิ้นงานที่มีความหนา 3-13 มิลลิเมตร จะต้องม้ออัตราการเผาไหม้ไม่เกิน 40 มิลลิเมตรต่อนาที และชิ้นงานมีความหนาน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร จะต้องม้ออัตราการเผาไหม้ไม่เกิน 75 มิลลิเมตรต่อนาที

ตารางที่ 3 อัตราการเผาไหม้ของแผ่นดูดซับเสียงจากเยื่ออก

ตัวอย่างที่	ความหนา (mm)	อัตราการเผาไหม้ (mm/min)
1	3.16	13.78
2	2.10	13.60
3	3.90	1.70

บทความวิจัย (Research Article)

จากตารางที่ 3 ตัวอย่างที่ 1 และ 3 มีความหนาของชิ้นงานอยู่ในช่วง 3-13 มิลลิเมตร พบว่ามีอัตราการเผาไหม้ที่ 13.78 และ 1.70 มิลลิเมตรต่อนาทีตามลำดับ ซึ่งไม่เกิน 40 มิลลิเมตรต่อนาที และตัวอย่างที่ 2 มีความหนา 2.10 มิลลิเมตรและมีอัตราการเผาไหม้ที่ 13.60 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งไม่เกิน 75 มิลลิเมตรต่อนาที ดังนั้น ชิ้นงานทดสอบจากแผ่นดูดซับเสียงเยือกทั้ง 3 ตัวอย่าง มีผลการทดสอบผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน UL94 ทุกประการ ดังนั้น แผ่นดูดซับเสียงจากเยือกจึงจัดเป็นวัสดุที่เข้าหลักเกณฑ์ความปลอดภัยตามมาตรฐานที่ระบุไว้

เมื่อนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นดูดซับเสียงจากเยือกสามารถหาได้จากการทดสอบความต้านทานแรงดึง ตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM D828 โดยชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานจะเป็นชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 25.4 ± 0.5 มิลลิเมตร และยาว 254 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 4) ก่อนการทดสอบจะมีการบันทึกค่าความหนาของชิ้นงานก่อนทดสอบทุกครั้ง เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความเค้น ชิ้นงานทดสอบหนึ่งชุดจะใช้ตัวอย่าง 10 ตัวอย่าง และทดสอบด้วยอัตราการดึง 25.4 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลเอนกประสงค์ (LLOYD Instruments)



รูปที่ 4 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึงจากแผ่นดูดซับเสียงจากเยือก

การทดสอบความต้านทานแรงดึงนั้นเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของปัจจัยต่อไปนี้ ได้แก่ ความแข็งแรงของเยือกกระดาษ ความยาวและการเกาะติดของเยือกกระดาษ จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ของแผ่นดูดซับเสียงจากเยือกมีค่าเท่ากับ 0.40 ± 0.13 เมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความต้านทานแรงดึงของกระดาษที่ทำจากเศษใบจากในงานวิจัยของ นพดล โพชกำเหนิด และคณะ [18] โดยความแข็งแรงของกระดาษจะขึ้นอยู่กับปริมาณของเส้นใยโดยเฉพาะลิกนิน ซึ่งต้นกกมีปริมาณลิกนินร้อยละ 17.30 [18] ใกล้เคียงกับใบจากซึ่งมีปริมาณลิกนินร้อยละ 10.50 ทำให้มีความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 0.38 ± 0.05 เมกะปาสคาล (MPa) ค่าความต้านทานแรงดึงของทางจากเท่ากับ 1.41 ± 0.05 เมกะปาสคาล (MPa) และมีปริมาณลิกนินสูงถึงร้อยละ 58.23 ดังนั้น ปริมาณลิกนินในพืชส่งผลต่อความแข็งแรงของเยือกกระดาษหรือแผ่นดูดซับเสียงที่ทำมาจากใยธรรมชาติ

5. สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาวัสดุดูดซับเสียงจากเส้นใยกก ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการทอเสื่อของวิสาหกิจชุมชนผลิตภัณฑ์แปรรูปเสื่อกกชุมชนตำบลสระแก้ว จังหวัดจันทบุรี สามารถทำได้โดยสถานะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมแผ่นดูดซับเสียงจากเยือก คือ เตรียมด้วยการแช่ NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของเศษเสื่อกกแห้ง ขึ้นรูปให้มีความหนาเท่ากับ 25 มิลลิเมตร จะเป็นวัสดุดูดซับเสียงที่ดีเนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดระดับความดังของเสียง (NRC) เท่ากับ 0.50 และแผ่นดูดซับเสียงจากเยือกนี้ยังเหมาะสมที่จะใช้ติดตั้งภายในอาคารเนื่องจากว่ามีคุณสมบัติไม่ลามไฟ และมีความแข็งแรงของแผ่นดูดซับเสียงระดับหนึ่ง มีค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 0.40 ± 0.13 เมกะปาสคาล (MPa) ดังนั้น

บทความวิจัย (Research Article)

หากมีความประสงค์ที่จะพัฒนาแผ่นวัสดุดูดซับเสียงจากเยื่อกระดาษให้สามารถผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ ควรพิจารณาปรับปรุงคุณสมบัติเพิ่มเติม โดยเฉพาะการเพิ่มค่าความสามารถในการดูดซับเสียง (NRC) ให้ใกล้เคียงกับวัสดุดูดซับเสียงเชิงพาณิชย์ที่มีค่า NRC โดยเฉลี่ยประมาณ 0.60 ทั้งนี้ เนื่องจากความหนาของแผ่นวัสดุมีอิทธิพลต่อค่าดังกล่าว การเพิ่มความหนาของแผ่นอาจเป็นแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงประสิทธิภาพการดูดซับเสียงให้สูงขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยและนวัตกรรมจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุน ววน.): งบประมาณด้าน ววน. ประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2567 ผ่านหน่วยงาน มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี (เลขที่สัญญา 1119/2567)

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] พิญา สมบูรณ์, "สืบสานตำนานเสื้อกั๊กจันทบุรี ภูมิปัญญาท้องถิ่นบนฐานอัตลักษณ์วิถีชุมชน กรณีศึกษาบ้านท่าแฉลบ ตำบลบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี," *Journal of Roi Kaensarn Academi*, ปีที่ 9, ฉบับที่ 10, หน้า 32-44, 2567.
- [2] สุภารีย์ เถาว์วงศ์ษา, "การศึกษาอัตลักษณ์การทอเสื้อกั๊กจันทบุรีในอดีต : กรณีศึกษาพิพิธภัณฑ์วัฒนธรรมท้องถิ่นและหอจดหมายเหตุแห่งชาติ จันทบุรี," *วารสารศิลปกรรมบูรพา*, ปีที่ 25, ฉบับที่ 1, หน้า 167-186, 2565.
- [3] บุศรินทร์ สายรัตน์ และ จักรพงษ์ แพทย์หลักฟ้า, "การวิเคราะห์รูปแบบการถ่ายทอดความรู้ ภูมิปัญญาท้องถิ่นการทอเสื้อกั๊กของจังหวัด

จันทบุรี," *วารสารการวัดผลการศึกษา*, ปีที่ 37, ฉบับที่ 101, หน้า 104-113, 2563.

- [4] สำนักงานจังหวัดจันทบุรี, *แผนพัฒนาจังหวัดจันทบุรี พ.ศ. 2561-2565 (ฉบับทบทวน พ.ศ. 2564)*, [ออนไลน์]. Available: https://www.chanthaburi.go.th/files/com_news_devpro/2021-05_72f380646b5e9f9.pdf. [เข้าถึงเมื่อ: 1 เมษายน 2568].
- [5] ปาณิสรา สุจริตกุล, "การพัฒนาวัสดุดูดซับเสียงที่ผลิตจากเส้นใยพอลิเมอร์ในหน้ากากอนามัยและน้ำยาฆ่าเชื้อ," *วิทยานิพนธ์ปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สถาปัตยกรรม, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*, 2565.
- [6] นาปีเสาะ กาโอะ, ซอลิฮาห์ ละตานา, และ โรสลินา จาราว, "สัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงจากวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น," ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติ การนำเสนอผลงานวิจัยของนักศึกษาระดับปริญญาตรี คุณภาพผู้เรียน คุณภาพครู*, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช, 2559, หน้า 34-42.
- [7] ดิณฑ์ บุญมี, ปณณวัชร วิโนทกะ, จิรวรร จิรจตุรงค์ชัย, นิเทศ ศรีเมือง, และ เกียรติ ดวงอุปมา, "แผ่นซับเสียงจากเปลือกเมล็ดทานตะวัน," *วารสารเกษตรพระวรุณ*, ปีที่ 20, ฉบับที่ 2, หน้า 37-41, 2566.
- [8] ประชุม คำพุฒ, "แผ่นบุผนังป้องกันเสียงผลิตจากยางธรรมชาติผสมเศษผลิตภัณฑพลาสติกเอทิลีนไวโนลอะซิเตท," *วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 2, หน้า 53-60, 2561.

บทความวิจัย (Research Article)

- [9] กอปร เปรมฤทัย, โสภา วิศิษฐ์ศักดิ์, และ ปารเมศ กำแหงฤทธิรงค์, "วัสดุดูดซับเสียงผนังภายในอาคารจากเส้นใยกล้วยและวัสดุประสานจากธรรมชาติ," ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติ ด้านนวัตกรรมเพื่อการเรียนรู้และสิ่งประดิษฐ์ ครั้งที่ 2*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2561, หน้า 159-168.
- [10] พงษ์วิวัฒน์ นิตตะวิริยะ, ดุชนิ ศุภวรรณกุล, รัชมี แสงศิริมงคลยิ่ง, และกฤษฎา เสือเอี่ยม, "การพัฒนาแผ่นดูดซับเสียงที่ได้จากเส้นใยกากกล้วย," *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*, ปีที่ 14, ฉบับที่ 3, หน้า 743-754, 2565.
- [11] ศิรเดช สุริต และ กันติทัต ทับสุวรรณ, "แนวทางการผลิตแผ่นดูดซับเสียงจากใยกล้วยด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสมในชุมชน," *วารสารสังคมศาสตร์และมานุษยวิทยาเชิงพุทธ*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 6, หน้า 1-16, มิถุนายน 2565.
- [12] ณัฐนิชา ภะมราภา, ณัฏรี ศรีดารานนท์, และ โสภา วิศิษฐ์ศักดิ์, "แผ่นวัสดุดูดซับเสียงจากเส้นใยขานอ้อย และวัสดุประสานจากธรรมชาติ," *วารสารสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้างวินิจัย คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*, ปีที่ 23, ฉบับที่ 3, หน้า 143-157, กันยายน-ธันวาคม 2567.
- [13] วุฒินันท์ คงทัด, สุธีรา วิทยากาญจน์, วีรศักดิ์ สมิตพิพงศ์, ชนาพร งามโรจน์, จิรชยา บุญญฤทธิ์, และรังสิมา ชลคุป, "การศึกษาศักยภาพของการใช้เส้นใยเซลลูโลสสำหรับเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต," ใน *การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 54*, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2559, หน้า 773-780.
- [14] ASTM International, *ASTM D828 Standard Test Method for Tensile Properties of Paper and Paperboard Using Constant-Rate-of-Elongation Apparatus*, 2022.
- [15] ASTM International, *ASTM D635 Standard Test Method for Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position*, 2022.
- [16] Underwriters Laboratories, *UL94 Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances*, 2024.
- [17] ASTM International, *ASTM E1050 Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System*, 2019.
- [18] นพดล โพธิ์กำเนิด, สุปราณี วุ่นศรี, และ ธัญวลัย รัตนกิจจ, "การพัฒนาระบบการผลิตกระดาษจากโดยใช้วัสดุเหลือใช้จากการผลิตใบจากสูบเพื่อความยั่งยืนของชุมชนลุ่มน้ำปะเหลียน," *วารสารการพัฒนาชุมชนและคุณภาพชีวิต*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 3, หน้า 271-282, 2562.
- [19] พัทธภรณ์ พิมพ์จันทร์, สุปัญญา พงอูดา, พรนภา บุญตา, และอรุณรัตน์ อุทัยกุล, "การสกัดเซลลูโลสจากต้นกกเพื่อใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์เส้นใยอาหาร," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม*, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, หน้า 19-25, มกราคม-มิถุนายน 2561.
- [20] กาญจนา ลือพงษ์, นงนุช ศศิธร, และ เกษมมานะรุ่งวิทย์, "การเตรียมกระดาษคราฟท์จาก

บทความวิจัย (Research Article)

ผักตบชวา ใบสับปะรด และกากกล้วย,"
วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร, ปีที่ 11,
ฉบับที่ 1, หน้า 15-22, 2560.

- [21] ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์ และ กนกวรรณ มะ
สุวรรณ, "การศึกษาสมบัติในการกันเสียงของ
แผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ,"
วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 38, ฉบับที่ 1,
หน้า 71-86, 2558.

การประเมินจลนพลศาสตร์และการใช้พลังงานในการอบแห้งเนื้อหมูด้วยลมร้อน

กานต์ กอมณี¹, รัฐพงศ์ ปฏิกานัง¹, ชคริต โพธิ์งาม¹, อำไพศักดิ์ ทิบุญมา¹,
อภิณันต์ นามเขต¹, ทรงสุภา พุ่มชุมพล¹ และ กฤตยา ไชยยศ^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: : krittaya.c@ubu.ac.th โทรศัพท์: 089-583-4235

(รับบทความ: 23 เมษายน 2568; แก้ไขบทความ: 2 กรกฎาคม 2568; ตอรับบทความ: 9 กรกฎาคม 2568)

บทคัดย่อ

การอบแห้งเป็นวิธีการถนอมอาหารเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา อย่างไรก็ตามในกระบวนการอบแห้งใช้พลังงานค่อนข้างสูง และในการออกแบบเครื่องอบแห้งจำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับจลนพลศาสตร์การอบแห้งของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อหมูด้วยลมร้อน ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส (°C) โดยกำหนดให้ความเร็วลมคงที่เท่ากับ 1.5 เมตรต่อวินาที (m/s) ในงานวิจัยนี้ได้ประเมินอัตราการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ สมการอบแห้งชั้นบาง สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพและพลังงานกระตุ้น ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งมีผลทำให้อัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า แบบจำลอง Two-term สามารถทำนายพฤติกรรมการอบแห้งได้ดีที่สุด โดยมีค่า R^2 สูงที่สุดเท่ากับ 0.99937 และ RMSE ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.00560 และสุดท้ายพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 6.956×10^{-10} - 9.916×10^{-10} ตารางเมตรต่อวินาที (m^2/s) โดยมีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 16.29 กิโลจูลต่อโมล (kJ/mol) ผลการศึกษาที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบและควบคุมการอบแห้งเนื้อหมูเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่อไป

คำสำคัญ: ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พลังงานกระตุ้น สมการอบแห้งชั้นบาง แบบจำลองคณิตศาสตร์ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิภาพ

การอ้างอิงบทความ: กานต์ กอมณี, รัฐพงศ์ ปฏิกานัง, ชคริต โพธิ์งาม, อำไพศักดิ์ ทิบุญมา, อภิณันต์ นามเขต, ทรงสุภา พุ่มชุมพล และ กฤตยา ไชยยศ, "การประเมินจลนพลศาสตร์และการใช้พลังงานในการอบแห้งเนื้อหมูด้วยลมร้อน," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 3, ฉบับที่ 4, หน้า 29-44, 2568.

Evaluation of Drying Kinetics and Energy Use in Hot Air Drying of Pork Meat

Kan Komanee¹, Rattapong Patikanang¹, Chakrit Po-Ngam¹, Umphisak Teeboonma¹,
Apinunt Namkhat¹, Songsupa Pumchumpol¹ and Kittaya Chaiyot^{1,*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

* Corresponding Author: : kittaya.c@ubu.ac.th , Tel: 089-583-4235

(Received: April 23, 2025; Revised: July 2, 2025; Accepted: July 9, 2025)

Abstract

Drying is a common method for preserving food to extend its shelf life. However, the drying process typically requires a significant amount of energy. In designing a dryer, it is important to understand the drying kinetics parameters of the product. Therefore, this research investigates the drying kinetics of pork using hot air under drying temperatures of 50°C, 60°C, and 70°C, with a constant air velocity of 1.5 m/s. In this study, the drying rate, specific energy consumption, thin-layer drying models, effective moisture diffusivity, and activation energy were evaluated. The results showed that increasing the drying temperature led to an increase in both drying rate and specific energy consumption. Among the tested models, the Two-term model provided the best prediction of drying behavior, with the highest R^2 value of 0.99937 and the lowest RMSE of 0.00560. The effective moisture diffusivity ranged from 6.956×10^{-10} - 9.916×10^{-10} m²/s, and the activation energy was found to be 16.29 kJ/mol. The findings from this study can be applied to improve the design and control of pork drying systems for better energy efficiency.

Keywords: Specific Energy Consumption, Activation Energy, Thin-Layer Equations, Mathematical Modeling, Effective Moisture Diffusivity

Please cite this article as: K. Komanee, R. Patikanang, C. Po-Ngam, U. Teeboonma, A. Namkhat, S. Pumchumpol and K. Chaiyot, "Evaluation of Drying Kinetics and Energy Use in Hot Air Drying of Pork Meat," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 3, no. 4, pp. 29-44, 2025.

1. บทนำ

เนื้อหมูเป็นเนื้อสัตว์ที่ได้รับความนิยมในการบริโภคทั่วโลก โดยมีปริมาณการผลิตและบริโภคเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 15-20 ต่อทศวรรษในระดับโลก [1-3] ในประเทศไทยมีการเลี้ยงหมูประมาณ 18-22 ล้านตัวต่อปี มีมูลค่าทางเศรษฐกิจมากกว่า 100,000 ล้านบาท [4] จากจำนวนการผลิตที่สูงขึ้นนี้ การถนอมและเก็บรักษาเนื้อหมูจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง การอบแห้งเป็นหนึ่งในวิธีการถนอมอาหารที่เก่าแก่และใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ [5-7] การอบแห้งมีหลายวิธี อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นรูปแบบที่ได้รับความนิยมเนื่องจากลงทุนต่ำ และสามารถดำเนินการได้ง่าย [8, 9]

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการศึกษาการอบแห้งเนื้อหมูด้วยเทคนิคต่าง ๆ มากมายอย่างต่อเนื่อง เช่น Sirimark et al., [10] ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเครื่องอบแห้งลมร้อนที่ใช้ก๊าซแอลพีจีกับเครื่องอบแห้งที่ใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้าสำหรับการอบแห้งหมูแผ่น พบว่าเครื่องอบแห้งแอลพีจีมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยกว่าและสามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้ต่ำกว่าร้อยละ 30 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน Wang et al., [11] ศึกษาผลของระยะเวลาอบแห้งและสภาวะการทอดต่อคุณภาพของเนื้อหมูโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง พบว่าอุณหภูมิการอบแห้งและระยะเวลามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะเนื้อสัมผัส โดยพบว่าระยะเวลาการอบแห้งกับค่าสีและค่าความแตกต่างของสีมีความสัมพันธ์เชิงเส้น นอกจากนี้ Lemaster et al., [12] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิการทำให้สุกและประเภทกล้ามเนื้อหมูต่อคุณภาพและการเสียดสีของโปรตีน พบว่ากล้ามเนื้อที่มีเส้นใยชนิดไกลโคไลติกมีอุณหภูมิจุดสูงสุดของการเสียดสีโปรตีนต่ำกว่ากล้ามเนื้อชนิดออกซิเดทีฟ ซึ่งส่งผลต่อ

การหดตัวของเส้นใยกล้ามเนื้อและคุณภาพเนื้อสัมผัสหลังการทำให้สุก

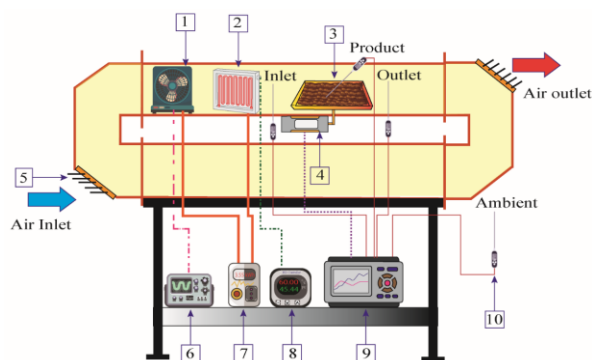
อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมายังมีข้อจำกัดสำคัญหลายประการในการศึกษาพารามิเตอร์เชิงลึกทางจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งเนื้อหมูด้วยลมร้อน โดยเฉพาะการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพและพลังงานกระตุ้น ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญที่สะท้อนกลไกการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ และแสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อกระบวนการถ่ายเทมวล [13] นอกจากนี้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีอยู่ส่วนใหญ่ยังถูกพัฒนาสำหรับอุณหภูมิอบแห้งเพียงค่าเดียว ส่งผลให้ขาดความยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้กับช่วงอุณหภูมิที่หลากหลาย ขณะเดียวกันจากทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การประเมินค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอบแห้งยังมีข้อจำกัด

จากการทบทวนช่องว่างองค์ความรู้ของงานวิจัยที่กล่าวมา การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อหมูด้วยลมร้อนโดยมุ่งเน้นการศึกษา (1) การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นและอัตราการอบแห้ง (2) การประเมินความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ (3) การพัฒนาและเปรียบเทียบสมการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสมเพื่อทำนายพฤติกรรมการอบแห้งและสามารถใช้กับอุณหภูมิอบแห้งที่หลากหลาย และ (4) การศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ประสิทธิภาพและพลังงานกระตุ้นเพื่อทำความเข้าใจกลไกการแพร่ความชื้นภายในเนื้อหมู ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นข้อมูลสำคัญในการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพระบบการอบแห้ง และสามารถประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีการอบแห้งให้มีประสิทธิภาพสูงทั้งในระดับชุมชนและระดับอุตสาหกรรม

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุในการทดสอบ

เนื้อหมูที่ใช้ในการทดลอง ชื้อจากซูเปอร์มาเก็ตในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์หาความชื้นตามมาตรฐาน AOAC [14] พบว่ามีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 240 ± 10 เปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐานแห้ง (%d.b.) หลังจากนั้นจะหั่นเนื้อหมูด้วยเครื่องหั่นให้ได้ขนาดเท่ากับ (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ หนา) $1 \times 10 \times 1$ ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)



1. พัดลม 2. ฮีตเตอร์ไฟฟ้า 3. ภาชนะผลิตภัณฑ์
4. โหลดเซลล์ 5. แดมเปอร์ 6. ชุดควบคุมความเร็วรอบ
7. เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า 8. ชุดควบคุมพีไอดี
9. เครื่องบันทึกข้อมูล 10. เทอร์โมคัปเปิล

รูปที่ 1 ผังการทำงานของกระบวนการอบแห้ง

2.2 ชุดทดลอง

เครื่องอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 1 สร้างจากสังกะสีแผ่นเรียบพับขึ้นรูปให้มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 25×25 เซนติเมตร (cm) และหุ้มด้วยฉนวนหนา 1 cm ใช้พัดลมขนาด 100 วัตต์ (W) ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบ ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3,000 W โดยมีระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดีเป็นแหล่งความร้อนให้ระบบ วัดอุณหภูมิที่แต่ละจุดโดยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ค่าความแม่นยำ ± 0.1 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) วัด

การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักผลิตภัณฑ์โดยโหลดเซลล์ขนาด 5 กิโลกรัม (kg) ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ รวมทั้งพลังงานที่ใช้จะถูกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล

2.3 วิธีการทดลองและการเก็บตัวอย่าง

ตัวอย่างเนื้อหมูที่ใช้ทดลองแต่ละครั้งจะถูกตรวจสอบความชื้นเริ่มต้นให้อยู่ในช่วง 240 ± 10 %d.b. โดยมีเงื่อนไขการทดลอง คือ 50°C , 60°C และ 70°C ความเร็วลมถูกควบคุมให้คงที่ 1.5 เมตรต่อวินาที (m/s) ก่อนนำตัวอย่างเข้าห้องอบแห้ง จะเดินเครื่องทดลองเพื่อให้อากาศภายในระบบมีอุณหภูมิสม่ำเสมอตามค่าที่ตั้งไว้จนกระทั่งระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลความร้อน โดยตรวจสอบอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งภายในระบบหลังจากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์เข้าห้องอบแห้ง พร้อมทั้งเริ่มบันทึกข้อมูลน้ำหนัก อุณหภูมิ และพลังงานอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างเท่ากับ 60%d.b. หรือสัดส่วนความชื้นเท่ากับ 0.25 จึงหยุดการทดลองและนำตัวอย่างออกจากห้องอบแห้ง การทดลองแต่ละเงื่อนไขจะดำเนินการ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

2.4 การวิเคราะห์สัดส่วนความชื้น

สัดส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) ใช้วิเคราะห์เพื่อติดตามจลนพลศาสตร์การอบแห้งภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1)

$$MR_t = \frac{M_t}{M_{in}} \quad (1)$$

เมื่อ MR_t คือ สัดส่วนความชื้นแต่ละช่วงเวลา

M_t คือ ความชื้นแต่ละช่วงเวลา, %d.b.

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, %d.b.

บทความวิจัย (Research Article)

2.5 การวิเคราะห์อัตราการอบแห้ง

อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR) คือดัชนีบ่งชี้การระเหยน้ำต่อเวลา ซึ่งวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (2)

$$DR = \frac{m_i - m_t}{t} \quad (2)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง, กรัมต่อนาที (g/min)

m_i คือ มวลเริ่มต้นของตัวอย่าง, g

m_t คือ มวลของตัวอย่างแต่ละช่วงเวลา, g

t คือ เวลาอบแห้ง, min

2.6 การวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) คือดัชนีบ่งชี้การใช้พลังงานทั้งหมดต่อปริมาณน้ำที่ระเหยจากผลิตภัณฑ์โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3)

$$SEC = \frac{3.6(E_{fan} + E_{heater})}{m_{wr}} \quad (3)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, เมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/kg)

E_{fan} คือ พลังงานพัดลม, kWh

E_{heater} คือ พลังงานฮีตเตอร์, kWh

m_{wr} คือ มวลน้ำผลิตภัณฑ์ที่ระเหย, kg

2.7 การวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบาง

จลนพลศาสตร์การอบแห้งผลิตภัณฑ์วิเคราะห์โดยใช้สมการอบแห้งชั้นบางที่มีการใช้อย่างแพร่หลายดังแสดงในตารางที่ 1 แบบจำลองเหล่านี้สามารถ

แบ่งเป็นสามกลุ่มตามพื้นฐานทางทฤษฎี คือ แบบจำลองเชิงทฤษฎี แบบจำลองกึ่งทฤษฎี และแบบจำลองเชิงทดลอง โดยแบบจำลองเชิงทฤษฎีพัฒนาจากกฎของนิวตันและกฎของฟิค สำหรับกฎของนิวตันจะพิจารณาอัตราการลดลงของความชื้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างระหว่างความชื้นของผลิตภัณฑ์ในแต่ช่วงเวลากับความชื้นสมดุล ในขณะที่กฎของฟิคจะพิจารณาการแพร่ความชื้นภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ โดยกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของความชื้นต่อเวลามีความสัมพันธ์กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของความชื้นตามระยะทางภายในของเนื้อผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 1 สมการอบแห้งชั้นบาง

Model	Equations
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Two-term	$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$
Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$

หมายเหตุ: MR คือ สัดส่วนความชื้น (-), t คือ เวลาในการอบแห้ง (min), k , k_1 , k_2 , n , a , b คือ ค่าคงที่

แบบจำลอง Newton [15] และ Henderson and Pabis [16] เป็นแบบจำลองเชิงทฤษฎี ที่พัฒนาจากกฎการถ่ายเทมวลของนิวตันและฟิคตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมรอบแห้งในช่วงเริ่มต้นที่มีการระเหยของน้ำจากผิวผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสม ขณะที่แบบจำลอง Page [15] และ Midilli

บทความวิจัย (Research Article)

[17] เป็นแบบจำลองกึ่งเชิงทฤษฎี ซึ่งได้ปรับปรุงโดยเพิ่มพารามิเตอร์เพื่อความยืดหยุ่นในการจำลองให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่มีพฤติกรรมซับซ้อน โดยเฉพาะในช่วงที่การระเหยน้ำถูกควบคุมด้วยการแพร่ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ ส่วนแบบจำลอง Two-term [16] เหมาะสำหรับการอธิบายกลไกการอบแห้งที่เกิดขึ้นพร้อมกันมากกว่าหนึ่งกลไก ในขณะที่แบบจำลอง Wang and Singh [17] จัดเป็นแบบจำลองเชิงทดลอง แต่มีโครงสร้างสมการที่เรียบง่ายและสามารถปรับให้เข้ากับข้อมูลเชิงทดลองได้ดีในบางกรณี

สำหรับเกณฑ์ที่ใช้การประเมินความเหมาะสมของแบบจำลอง ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ซึ่งถูกใช้เพื่อวัดความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูล และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, $RMSE$) ซึ่งวัดความแม่นยำของการทำนาย โดยทั้งสองเกณฑ์วิเคราะห์ได้จากสมการที่ (4) และ (5)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR_{exp}})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2} \quad (5)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ สัดส่วนความชื้นจากการทดลอง
 $MR_{pred,i}$ คือ สัดส่วนความชื้นจากการทำนาย
 $\overline{MR_{exp}}$ คือ ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนความชื้นจากการทดลอง
 N คือ จำนวนข้อมูลที่สังเกต

ในการพิจารณาแบบจำลองที่เหมาะสมจะพิจารณาจากแบบจำลองที่มีค่า R^2 สูงที่สุด และค่า $RMSE$ ต่ำที่สุด

2.8 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้สร้างความเข้าใจการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ระหว่างการอบแห้ง ค่านี้สะท้อนความสามารถของความชื้นในการเคลื่อนที่ภายในผลิตภัณฑ์ภายใต้แต่ละสภาวะการอบแห้ง การศึกษา D_{eff} ถูกกำหนดโดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิค ซึ่งอธิบายการถ่ายเทความชื้นในช่วงอัตราอบแห้งลดลงของการอบแห้งดังสมการที่ (6)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 M \quad (6)$$

เมื่อ $\frac{\partial M}{\partial t}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นตามเวลา, เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งต่อวินาที (%d.b./min)
 D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล, ตารางเมตรต่อวินาที (m^2/s)
 $\nabla^2 M$ คือ ลาปลาเซียนของความเข้มข้นความชื้น, เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งต่อตารางเมตร (%d.b./ m^2)

ในกรณีผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางและสมมติว่าการหดตัวของผลิตภัณฑ์มีค่าน้อยมาก ความชื้นเริ่มต้นกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และสัมประสิทธิ์การแพร่ถือว่าเป็นค่าคงที่ สามารถเขียน

บทความวิจัย (Research Article)

สมการตามกฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคสำหรับรูปทรงแผ่นบางและยาวมากได้ดังสมการที่ (7)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{D_{eff}(2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right) \quad (7)$$

เมื่อ MR คือ สัดส่วนความชื้น, -

L คือ ครึ่งหนึ่งของความหนาผลิตภัณฑ์, m

สำหรับกรณีระยะเวลาการอบแห้งนานมาก เทอมลำดับสูงในอนุกรมจะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้สมการที่ (7) สามารถเขียนลดรูปได้ดังสมการที่ (8)

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (8)$$

และเมื่อใช้ลอการิทึมธรรมชาติกับทั้งสองด้าน สามารถเขียนความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ดังสมการที่ (9)

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (9)$$

จากความชัน k ของการถดถอยเชิงเส้นของ $\ln(MR)$ กับ t ทำให้ D_{eff} สามารถประเมินค่าได้จากสมการที่ (10)

$$D_{eff} = -k \times \frac{4L^2}{\pi^2} \quad (10)$$

2.9 การวิเคราะห์พลังงานกระตุ้น

พลังงานกระตุ้น (E_a) ของการแพร่ความชื้นบ่งชี้ถึงพลังงานที่ต้องการเพื่อเริ่มกระบวนการแพร่ระหว่างการอบแห้ง และมีความสำคัญต่อความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการเคลื่อนที่ของความชื้น ในการศึกษา E_a ถูกกำหนดโดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) และอุณหภูมิ (T) โดยใช้สมการอาร์เรเนียส ดังแสดงในสมการที่ (11)

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (11)$$

เมื่อ D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

ประสิทธิผล, m^2/s

D_0 คือ ค่าคงที่พรีเอกซ์โปเนนเชียล, m^2/s

E_a คือ พลังงานกระตุ้น, kJ/mol

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส, $8.314 \text{ kJ/mol} \cdot K$

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์, K

เพื่อลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์ สามารถแปลงสมการที่ (11) ให้เป็นสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (12)

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (12)$$

ในการวิเคราะห์จะสร้างกราฟของ $\ln(D_{eff})$ และ $1/T$ เพื่อหาความชันของการถดถอยเชิงเส้น หลังจากนั้นก็วิเคราะห์ค่า E_a ตามสมการที่ (13)

$$E_a = -\text{slope} \cdot R \quad (13)$$

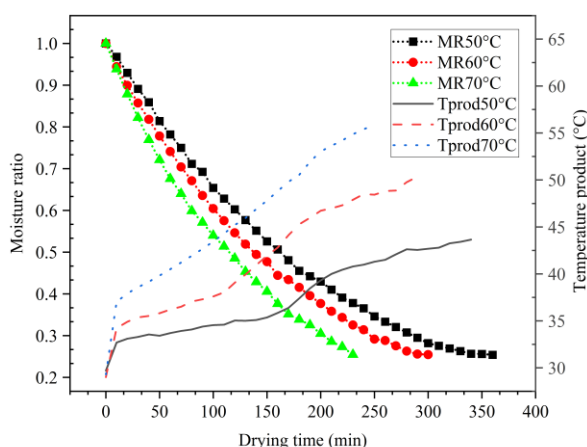
บทความวิจัย (Research Article)

วิธีการนี้ให้ค่าประมาณ E_a ที่น่าเชื่อถือ ซึ่งมีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง

3. ผลและการอภิปรายผล

3.1 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อสัดส่วนความชื้นและอุณหภูมิผลิตภัณฑ์

รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนความชื้นและอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้งที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความชื้นและอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ที่แต่ละเงื่อนไข

จากข้อมูลสัดส่วนความชื้นลดลงตามเวลาและอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้น โดยเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจนกระทั่ง MR เท่ากับ 0.25 ที่เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง 70°C, 60°C และ 50°C มีค่าเท่ากับ 230, 300 และ 360 นาที ตามลำดับ หากพิจารณากรณีเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจาก 50°C เป็น 70°C จะสามารถลดเวลาอบแห้งได้มากถึง 36% โดยสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [18] คือการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งมีผลโดยตรงต่อเวลาในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ เนื่องจาก

ผลิตภัณฑ์จะได้รับความร้อนเพิ่มมากขึ้น จากรูปที่ 2 สามารถแบ่งการอบแห้งได้ 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (0-120 นาที) และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (ตั้งแต่ 120 นาทีเป็นต้นไป) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการอบแห้ง [19] โดยในช่วงแรกความชื้นจะลดลงรวดเร็วเนื่องจากน้ำอิสระที่บริเวณผิวนอกระเหยออกได้ง่าย ส่วนในช่วงหลังการลดลงจะช้า เนื่องจากความชื้นต้องเคลื่อนที่จากภายในออกสู่ผิวนอก ผลิตภัณฑ์ก่อนระเหย [20]

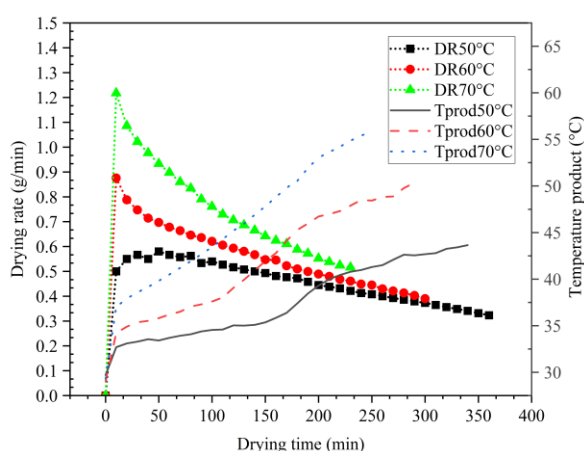
ในส่วนของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ เมื่อได้รับความร้อนในช่วง 10 นาทีแรก อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์เริ่มระเหย จากนั้นอุณหภูมิก็มจะเปลี่ยนแปลงช้า และเพิ่มขึ้นค่อนข้างรวดเร็วอีกครั้งเมื่อกระบวนการอบแห้งเข้าสู่ช่วงอัตราอบแห้งลดลง โดยอุณหภูมิสูงสุดของผลิตภัณฑ์ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิอบแห้ง 50°C, 60°C และ 70°C เท่ากับ 44°C, 50°C และ 56°C ตามลำดับ ซึ่งพบว่าต่ำกว่าอุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ยประมาณ 6°C, 10°C และ 14°C ตามลำดับ Wankhade et al., [21] อธิบายว่าความแตกต่างนี้เกิดจากพลังงานความร้อนบางส่วนถูกใช้ในการระเหยน้ำที่ผิว ซึ่งความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอบแห้งกับอุณหภูมิผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้ง

3.2 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่ออัตราการอบแห้งและอุณหภูมิผลิตภัณฑ์

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C, 60°C และ 70°C จากข้อมูลพบว่าอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิอบแห้ง 50°C, 60°C และ 70°C มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.58, 0.88 และ 1.22 g/min ตามลำดับ นอกจากนั้นข้อมูลยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้ง 10°C สามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้ประมาณ 35-40% และหากพิจารณาพฤติกรรมอัตราการอบแห้งจะพบว่าสามารถแบ่งได้

บทความวิจัย (Research Article)

2 ช่วง คือ ช่วงแรก (0-60 นาที) อัตราการอบแห้งจะลดลงอย่างรวดเร็ว และช่วงที่สอง (60 นาทีขึ้นไป) อัตราการอบแห้งจะลดลงอย่างช้า ๆ ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับทฤษฎีการอบแห้งที่ช่วงแรกเป็นการระเหยของน้ำอิสระที่ผิว นอก ส่วนช่วงหลังเป็นการถ่ายเทความชื้นจากภายในสู่ผิวนอกผลิตภัณฑ์



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและอุณหภูมิผลิตภัณฑ์

ในส่วนของอุณหภูมิผลิตภัณฑ์มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับอัตราการอบแห้ง ในช่วงที่อุณหภูมิผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อัตราการอบแห้งก็จะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสมดุลพลังงานในการอบแห้ง ความร้อนที่ถ่ายเทสู่ผลิตภัณฑ์ถูกใช้ในการระเหยน้ำที่ผิว เมื่อปริมาณน้ำที่ผิวลดลง ความร้อนจึงถูกสะสมทำให้อุณหภูมิผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ความสัมพันธ์นี้เป็นไปตามหลักการสมดุลพลังงานในการอบแห้ง ในช่วงท้ายของการอบแห้ง (180-230 นาที) จะพบว่าอัตราการอบแห้งที่ทุกอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.42-0.52 g/min ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการอบแห้งในช่วงนี้ถูกควบคุมด้วยการถ่ายเทความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสมบัติการแพร่ความชื้นประสิทธิผลของผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท

จากข้อมูลสามารถสรุปได้ว่า อัตราการอบแห้งเฉลี่ยตลอดกระบวนการที่อุณหภูมิ 50°C, 60°C และ 70°C มีค่าเท่ากับ 0.49, 0.62 และ 0.76 g/min ตามลำดับ การเพิ่มอุณหภูมิจาก 50°C เป็น 70°C สามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้เฉลี่ยเท่ากับ 55% โดยที่เวลาอบแห้งลดลง 36% การลดเวลาอบแห้งมีผลโดยตรงต่อการประหยัดพลังงาน อย่างไรก็ตาม การเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมต้องพิจารณาควบคู่กับค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.3 ผลของอุณหภูมิอบแห้งต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ผลการทดลองในตารางที่ 2 แสดงค่าของ SEC ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 50°C, 60°C และ 70°C

ตารางที่ 2 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและระยะเวลาอบแห้ง

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	เวลาอบแห้ง (min)	ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)
50	360	86.83±5.22
60	300	110.52±7.74
70	230	123.77±8.68

จากข้อมูลพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งส่งผลให้เวลาการอบแห้งลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 360 นาที เหลือเพียง 230 นาที เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 50°C เป็น 70°C ซึ่งสอดคล้องกับหลักการถ่ายเทมวลในกระบวนการอบแห้งที่ผลต่างความชื้นระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการระเหยของน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์สูงขึ้น [2] อย่างไรก็ตาม แม้ว่าเวลาอบแห้งจะลดลง แต่ค่าความสิ้นเปลืองพลังงาน

บทความวิจัย (Research Article)

จำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 86.83 ± 5.22 MJ/kg ที่ 50°C เป็น 123.77 ± 8.68 MJ/kg ที่ 70°C หรือเพิ่มขึ้นเท่ากับ 42.5% ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงถึงแม้จะสามารถลดระยะเวลา แต่ส่งผลให้มีการใช้พลังงานต่อหน่วยมวลน้ำระเหยสูงขึ้น โดยเฉพาะในระบบอบแห้งแบบลมร้อนที่ไม่มีการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ พลังงานบางส่วนจึงสูญเสียไปกับผนังห้องอบและการพาความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม [21]

อบแห้ง โดยใช้วิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแต่ละสมการ และเนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่หลายระดับอุณหภูมิอบแห้ง ดังนั้นจึงได้ปรับปรุงสมการอบแห้งชั้นบางที่แสดงในตารางที่ 1 โดยกำหนดให้เทอมค่าคงที่ในสมการเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับอุณหภูมิ ดังสมการที่ (14)

$$K = x_0 + x_1 T \quad (14)$$

3.4 การประเมินแบบจำลองสมการอบแห้งชั้นบาง

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบแบบจำลองสมการอบแห้งชั้นบางจำนวน 6 สมการ เพื่อหาสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายพฤติกรรมการอบแห้งผลิตภัณฑ์แต่ละอุณหภูมิ

เมื่อ K คือ ค่าคงที่ในสมการ (เช่น k, k_1, k_2, n, a, b)
 T คือ อุณหภูมิอบแห้ง ($^{\circ}\text{C}$)
 x_0, x_1 คือ ค่าคงที่ได้จากการวิเคราะห์สมการถดถอย

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นของสมการอบแห้งชั้นบาง

Model	Parameter	x_0	x_1	R^2	RMSE
Newton	k	-0.00042	0.00009	0.99749	0.01152
Page	k	0.00064	0.00009	0.99808	0.00990
	n	0.93481	0.00053		
Henderson and Pabis	a	1.06302	-0.00119	0.99791	0.01037
	k	0.00007	0.00008		
<u>Two-term</u>	a	0.36743	-0.00488	<u>0.99937</u>	<u>0.00560</u>
	k_1	0.00726	-0.00012		
	b	0.70744	0.00369		
	k_2	0.00140	0.00007		
Midilli	a	1.08272	-0.00141	0.99905	0.00687
	k	0.00268	0.00003		
	b	-0.00035	0.00001		
Wang and Singh	a	0.00045	-0.00009	0.99827	0.00951
	b	-0.00001	0.00000		

บทความวิจัย (Research Article)

วิธีการนี้ทำให้ได้แบบจำลองที่สามารถทำนายพฤติกรรมกรอบแห้งได้ทุกอุณหภูมิอบแห้งโดยไม่ต้องทำการวิเคราะห์แยกทีละอุณหภูมิ ซึ่งในส่วนนี้จะแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา [22-24] ซึ่งพัฒนาแบบจำลองโดยแยกทีละอุณหภูมิ ขณะที่งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองที่สามารถทำนายพฤติกรรมกรอบแห้งได้ทุกช่วงอุณหภูมิอบแห้งที่ศึกษา

ตารางที่ 3 แสดงผลการประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง ผลการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลอง Two-term ให้ค่า R^2 สูงที่สุดเท่ากับ 0.99937 และ $RMSE$ ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.00560 ซึ่งบ่งชี้ถึงความแม่นยำสูงที่สุดในการทำนายพฤติกรรมกรอบแห้ง หากพิจารณาสมการ Two-term จะพบว่าประกอบด้วยเทอมเอกซ์โพเนนเชียลสองชุด ทำให้สามารถอธิบายลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนความชื้นได้เป็นอย่างดีทั้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ [25]

สำหรับแบบจำลอง Midilli ให้ผลแม่นยำในระดับใกล้เคียงกับ Two-term โดยมีค่า R^2 และ $RMSE$ เท่ากับ 0.99905 และ 0.00687 ตามลำดับ สมการนี้ประกอบด้วยเทอมเอกซ์โพเนนเชียลและเทอมเชิงเส้นซึ่งสามารถปรับให้เข้ากับเส้นโค้ง MR ที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้งได้อย่างดีเช่นกัน และเป็นแบบจำลองที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานอบแห้งผลิตภัณฑ์เกษตร [26]

แบบจำลอง Page, Henderson และ Pabis และ Wang และ Singh มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.99791–0.99827 และ $RMSE$ อยู่ระหว่าง 0.00951–0.01037 จากข้อมูลแม้จะมีค่าความแม่นยำในระดับดี แต่ยังมี ความคลาดเคลื่อน เนื่องจากแบบจำลองเหล่านี้มีโครงสร้างสมการที่ไม่สามารถอธิบายลักษณะการแพร่ ความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาได้อย่างครบถ้วน ในส่วนแบบจำลอง Newton ซึ่งมีโครงสร้างสมการง่ายที่สุด พบว่ามีค่า R^2 ต่ำที่สุด (0.99749) และ $RMSE$ สูงที่สุด (0.01152)

ผลการศึกษารูปได้ว่า แบบจำลอง Two-term เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อหมูด้วยลมร้อน ซึ่งเขียนแบบจำลองได้ดังสมการที่ (15)

$$MR = (0.36743 - 0.00012T) \times \exp(-(0.00726 - 0.00012T)t) + (0.70744 + 0.00369T) \times \exp(-(0.00140 + 0.00007T)t) \quad (15)$$

3.5 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลและพลังงานกระตุ้น

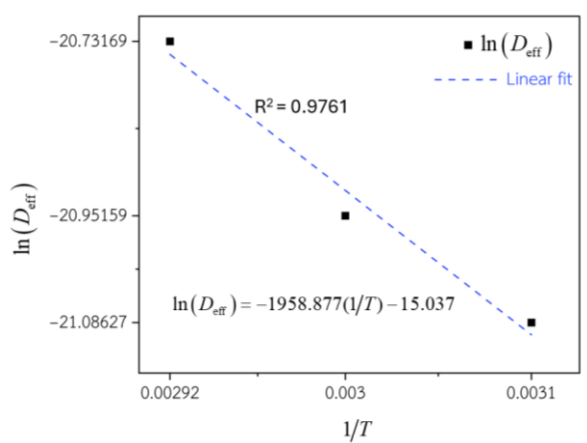
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) และพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้รับการวิเคราะห์เพื่อศึกษาลักษณะของกลไกการเคลื่อนที่ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการอบแห้ง ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะช่วยสร้างความเข้าใจพื้นฐานเกี่ยวกับพฤติกรรมกรอบแห้งของผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่มีโครงสร้างเส้นใยและไขมัน และช่วยในการปรับปรุงกระบวนการอบแห้งในระดับอุตสาหกรรม [27] การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลดำเนินการโดยใช้กฎการแพร่ข้อที่สองของฟิคสำหรับรูปทรงแผ่นบางและยาว โดยพิจารณาการกระจายความชื้นเริ่มต้นที่สม่ำเสมอและไม่พิจารณาผลของการหดตัว การวิเคราะห์ใช้ค่าเฉลี่ย D_{eff} เนื่องจากการแพร่ความชื้นภายในขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นหลัก ขณะที่การถ่ายเทมวลที่พื้นผิวจะได้รับอิทธิพลจากความเร็วลม [28]

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่า D_{eff} เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 50°C, 60°C และ 70°C มีค่าเท่ากับ $6.956 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $7.959 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ และ $9.916 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของการแพร่นี้สอดคล้องกับหลักการถ่ายเทมวล กล่าวคือที่อุณหภูมิสูงจะเพิ่มพลังงานจลน์ของโมเลกุล ส่งผลให้การเคลื่อนที่ความชื้นภายใน

บทความวิจัย (Research Article)

โครงสร้างผลิตภัณฑ์ดีขึ้น [29] ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ความชื้นประสิทธิผลที่ได้จากงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 6.956×10^{-10} - 9.916×10^{-10} m²/s เมื่อเปรียบเทียบกับงานของ Kim et al., [30] ที่ศึกษาไส้กรอกกึ่งแห้งที่มีความชื้นเริ่มต้นต่างกัน พบว่าอยู่ในช่วงเดียวกัน โดย Kim et al., [30] รายงานค่า D_{eff} ระหว่าง 7.29×10^{-10} - 17.79×10^{-10} m²/s ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในสูตรผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 0-50% ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายได้จากลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยเนื้อหมูสดในงานนี้มีโครงสร้างเส้นใยกล้ามเนื้อธรรมชาติที่เอื้อต่อการแพร่ความชื้น ในขณะที่ไส้กรอกของ Kim et al., [30] เป็นผลิตภัณฑ์โครงสร้างใหม่ที่เติมน้ำมากถึง 50% ในสูตร ส่งผลให้มีความพรุนและช่องทางการแพร่สูงกว่า นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ข้อมูล สามารถเขียนความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลได้ดังสมการที่ (16)

$$D_{eff} = 2.9475 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{16.29}{RT}\right) \quad (16)$$



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(D_{eff})$ และ $1/T$

เมื่อพิจารณาจากสมการจะพบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 16.29 kJ/mol ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่อบแห้งแบบการพาความร้อน โดยข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 12-110 kJ/mol [31] ค่าพลังงานกระตุ้นนี้บ่งชี้ให้เห็นว่ากลไกการแพร่ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์ถูกควบคุมด้วยอุณหภูมิเป็นหลัก และสำหรับสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลของงานวิจัยนี้มีค่าสูงที่สุดที่เป็นไปได้เท่ากับ 2.9475×10^{-7} m²/s ซึ่งค่านี้นิยมเรียกว่า ค่าคงที่พรีเอกซ์โปเนนเชียล หรือค่าคงที่อาร์เรเนียส (D_0) ซึ่งค่าที่ได้สอดคล้องกับค่าที่รายงานสำหรับผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกัน [32] และสุดท้ายผลการศึกษา D_{eff} และ E_a ในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลเชิงลึกสำหรับออกแบบและปรับปรุงกระบวนการอบแห้งในอุตสาหกรรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

4. สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบแห้งจาก 50°C เป็น 70°C สามารถลดเวลาอบแห้งได้ 36% และเพิ่มอัตราการอบแห้งเฉลี่ย 55% ในขณะที่ยังคงไม่ส่งผลให้ความชื้นเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น 42.5% และจากการวิเคราะห์แบบจำลองสมการอบแห้งขั้นสูงพบว่าแบบจำลอง Two-term สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งให้แม่นยำที่สุด โดยให้ค่า R^2 และ $RMSE$ เท่ากับ 0.99937 และ 0.00560 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผลอยู่ระหว่าง 6.956×10^{-10} - 9.916×10^{-10} m²/s โดยมีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 16.29 kJ/mol สุดท้ายองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการอบแห้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. W. Kim, A. Gormley, K. B. Jang, and M. E. Duarte, "Current status of global pig production: an overview and research trends," *Animal Bioscience*, vol. 37, no. 4, p. 719, 2023. DOI: 10.5713/ab.23.0367.
- [2] M. T. See, "Current status and future trends for pork production in the United States of America and Canada," *Animal Bioscience*, vol. 37, no. 4, p. 775, 2024. DOI: 10.5713/ab.24.0055.
- [3] T. Nakrachata-Amon, J. Vorasayan, K. Pitiruek, S. Arunyanart, T. Niyamosoth, and S. Pathumnakul, "Optimizing vertically integrated pork production supply chain: A Lagrangian heuristic approach," *Heliyon*, vol. 10, no. 6, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26407.
- [4] K. Sena and P. Saeliow, "Stochastic Frontier Analysis of Technical Efficiency in swine Production in Nakhon Si Thammarat Province," *Economics and Business Administration Journal Thaksin University*, vol. 17, no. 1, pp. 127-144, Jan. 2025. DOI: 10.55164/ecbajournal.v17i1.273889.
- [5] M. Radojčin, I. Pavkov, D. Bursać Kovačević, P. Putnik, A. Wiktor, Z. Stamenković, K. Kešelj, and A. Gere, "Effect of selected drying methods and emerging drying intensification technologies on the quality of dried fruit: A review," *Processes*, vol. 9, no. 1, p. 132, 2021. DOI: 10.3390/pr9010132.
- [6] D. Alp and Ö. Bulantekin, "The microbiological quality of various foods dried by applying different drying methods: a review," *European Food Research and Technology*, vol. 247, no. 6, pp. 1333-1343, 2021. DOI: 10.1007/s00217-021-03731-z.
- [7] H. Sonarathi, S. Supreetha, and S. Mall, "Emerging novel technologies for food drying," in *Food Process Engineering and Technology: Safety, Packaging, Nanotechnologies and Human Health*, Springer, 2024, pp. 3-12. DOI: 10.12944/crnfsj.6.2.29.
- [8] A. H. Zare, M. Azadbakht, and R. Naseri, "Effects of pretreatments involving ohmic heating and infrared radiation on the drying process of bananas using hot air," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 47, no. 4, p. e14612, 2024. DOI: 10.1111/jfpe.14612.
- [9] H.-Y. Ju, S. K. Vidyarthi, M. Karim, X.-L. Yu, W.-P. Zhang, and H.-W. Xiao, "Drying quality and energy consumption efficient improvements in hot air drying of papaya slices by step-down relative humidity based on heat and mass transfer characteristics and 3D simulation," *Drying Technology*, vol. 41, no. 3, pp. 460-476, 2023. DOI: 10.1080/07373937.2022.2099416.
- [10] P. Sirimark, S. Yotmanee, W. Pradubsri, and P. Somsila, "Comparison of efficiency between liquefied petroleum gas (LPG) and electric hot air dryer: case study of dried pork slice," *CyTA-Journal of Food*, vol. 21, no. 1, pp. 181-188,

บทความวิจัย (Research Article)

2023. DOI:
10.1080/19476337.2023.2174603.
- [11] S. T. Wang, H. T. V. Lin, Y. J. Syu, and W. C. Sung, "Effect of Drying Time and Frying Conditions on the Quality of Pork Rinds by Response Surface Methodology," *Food Science & Nutrition*, vol. 12, no. 12, pp. 10194-10210, 2024. DOI: 10.1002/fsn3.4513.
- [12] M. N. Lemaster, M. Ha, F. R. Dunshea, S. Chauhan, D. D'Souza, and R. D. Warner, "Impact of cooking temperature on pork longissimus, and muscle fibre type, on quality traits and protein denaturation of four pork muscles," *Meat Science*, vol. 209, p. 109395, 2024. DOI: 10.1016/j.meatsci.2023.109395.
- [13] R. J. Silva-Paz, D. K. Mateo-Mendoza, and A. Eccoña-Sota, "Mathematical Modelling of Muña Leaf Drying (*Minthostachys mollis*) for Determination of the Diffusion Coefficient, Enthalpy, and Gibbs Free Energy," *ChemEngineering*, vol. 7, no. 3, p. 49, 2023. DOI: 10.3390/chemengineering7030049.
- [14] *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists: Official Methods of Analysis of AOAC International*, AOAC, Washington, DC, 2019.
- [15] R. Seodigeng, J. Kabuba, and H. Rutto, "Modelling the drying characteristics of human faeces using thin-layer drying models and calculation of mass transfer properties at ambient conditions," *Environmental Challenges*, vol. 9, p. 100648, 2022. DOI: 10.1016/j.envc.2022.100648.
- [16] Y. Gao, X. Yang, L. Chu, Y. Zhang, and Q. Li, "Experimental investigation and thin-layer modelling of cassava slice drying," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pp. 1-9, 2020. DOI: 10.1007/s10973-020-10401-x.
- [17] J. O. Akowuah, A. Bart-Plange, and K. A. Dzisi, "Thin layer mathematical modelling of white maize in a mobile solar-biomass hybrid dryer," 2021. DOI: 10.17221/56/2020-RAE.
- [18] A. Kushwah, A. Kumar, and M. K. Gaur, "Drying kinetics, performance, and quality assessment for banana slices using heat pump-assisted drying system (HPADS)," *Journal of Food Process Engineering*, vol. 45, no. 3, p. e13964, 2022. DOI: 10.1111/jfpe.13964.
- [19] F. Akter, R. Muhury, A. Sultana, and U. K. Deb, "A comprehensive review of mathematical modeling for drying processes of fruits and vegetables," *International Journal of Food Science*, vol. 2022, no. 1, p. 6195257, 2022. DOI: 10.1155/2022/6195257.
- [20] A. Mencarelli, F. Marinello, A. Marini, and L. Guerrini, "Two-stage drying of tomato based on physical parameter kinetics: operative and qualitative optimization," *European Food Research and Technology*, vol. 249, no. 9, pp. 2253-2264, 2023. DOI: 10.1007/s00217-023-04288-9.

บทความวิจัย (Research Article)

- [21] A. Martynenko and G. N. A. Vieira, "Sustainability of drying technologies: system analysis," *Sustainable Food Technology*, vol. 1, no. 5, pp. 629-640, 2023. DOI: 10.1039/D3FB00080J.
- [22] O. Vega-Castro, J. Osorio-Arias, Y. Duarte-Correa, A. Jaques, C. Ramírez, H. Nuñez, and R. Simpson, "Critical analysis of the use of semiempirical models on the dehydration of thin-layer foods based on two study cases," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 48, no. 12, pp. 15851-15863, 2023. DOI: 10.1007/s13369-023-07623-0.
- [23] M. Popescu, P. Iancu, V. Plesu, C. S. Bildea, and F. A. Manolache, "Mathematical modeling of thin-layer drying kinetics of tomato peels: Influence of drying temperature on the energy requirements and extracts quality," *Foods*, vol. 12, no. 20, p. 3883, 2023. DOI: 10.3390/foods12203883.
- [24] S. Ambawat, A. Sharma, and R. K. Saini, "Mathematical modeling of thin layer drying kinetics and moisture diffusivity study of pretreated Moringa oleifera leaves using fluidized bed dryer," *Processes*, vol. 10, no. 11, p. 2464, 2022. DOI: 10.3390/pr10112464.
- [25] E. A. Mewa, M. W. Okoth, C. N. Kunyanga, and M. N. Rugiri, "Drying modelling, moisture diffusivity and sensory quality of thin layer dried beef," 2018. DOI: 10.12944/CRNFSJ.6.2.29.
- [26] B. Jakubowska, "Experimental Study of Polish Sausage Drying Kinetics and Contraction by Image Data Analysis," *Acta Universitatis Cibiniensis-Series E: Food Technology*, vol. 27, pp. 185-198, 2023. DOI: 10.2478/auaft-2023-0016.
- [27] Z. Zeng, C. Han, Q. Wang, H. Yuan, X. Zhang, and B. Li, "Analysis of drying characteristic, effective moisture diffusivity and energy, exergy and environment performance indicators during thin layer drying of tea in a convective-hot air dryer," *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 8, p. 1371696, 2024. DOI: 10.3389/fsufs.2024.1371696.
- [28] N. Sianoun, P. Pongyeela, N. Chairerk, and J. Chungsiriporn, "Thin Layer Drying Kinetics and Mathematical Modeling of Moisture Diffusivity in Cocoa Pod Husk (CPH)," *Engineering Journal*, vol. 27, no. 8, pp. 1-12, 2023. DOI: 10.4186/ej.2023.27.8.1.
- [29] A. Compaoré, S. Ouoba, K. H. Ouoba, M. Simo-Tagne, Y. Rogaume, C. Ahouannou, A. O. Dissa, A. Béré, J. Koulidiati, "A modeling study for moisture diffusivities and moisture transfer coefficients in drying of 'Violet de Galmi' Onion drying," *Advances in Chemical Engineering and Science*, vol. 12, no. 3, pp. 172-196, 2022. DOI: 10.4236/aces.2022.123013.
- [30] D.-H. Kim, Y. J. Kim, D.-M. Shin, J. H. Lee, and S. G. Han, "Drying characteristics and physicochemical properties of semi-dried restructured sausage depend on initial moisture content," *Food Science*

บทความวิจัย (Research Article)

- of *Animal Resources*, vol. 42, no. 3, p. 411, 2022. DOI: 10.5851/kosfa.2022.e12.
- [31] P. Waramit, B. Krittacom, and R. Luampon, "Experimental investigation to evaluate the effective moisture diffusivity and activation energy of cassava (*Manihot Esculenta*) under convective drying," *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 15, no. 4, pp. 5518-5518, 2022. DOI: 10.14416/j.asep.2021.10.008.
- [32] F. C. Muga, M. O. Marennya, and T. S. Workneh, "Modelling the Thin-Layer Drying Kinetics of Marinated Beef during Infrared-Assisted Hot Air Processing of Biltong," *International Journal of Food Science*, vol. 2021, no. 1, p. 8819780, 2021. DOI: 10.1155/2021/8819780.

Face and Hand Gesture Recognition System Using MediaPipe

Sethakarn Prongnuch^{1,*}, Tanawat Sangkhakul², Nutchanon Angchoun²,
Wuttipong Pinsarmsak² and Kant Charoenjit²

¹ Department of Robotics Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Suan Sunandha Rajabhat University

² Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Suan Sunandha Rajabhat University

* Corresponding Author: sethakarn.pr@ssru.ac.th, Tel: 084-1782616

(Received: April 15, 2025; Revised: May 12, 2025; Accepted: May 19, 2025)

Abstract

Current recognition systems face challenges related to accuracy, real-time speed, and limited device resources. This paper presents a face and hand gesture recognition system using MediaPipe. The research aims to create a real-time face and hand gesture recognition system utilizing MediaPipe, OpenCV, and SciPy, running on a Raspberry Pi 4 board with a webcam. The experiment involved a sample group of 100 participants. The experimental results show that the system achieves a success rate of approximately 95% in unlocking a security door for individuals whose information is stored in the database, despite limitations in camera angles and lighting. The highlight of this research is its presentation of a dual authentication method using the cosine similarity technique for security systems. The system's performance and accuracy will be further evaluated in real-world scenarios, such as its application in educational institutions within the Thai context.

Keywords: Face Recognition, Hand Gesture Recognition, OpenCV, MediaPipe, SciPy

Please cite this article as: S. Prongnuch, T. Sangkhakul, N. Angchoun, W. Pinsarmsak and K. Charoenjit, "Face and Hand Gesture Recognition System Using MediaPipe," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 3, no. 4, pp. 45-58, 2025.

ระบบการรู้จำใบหน้าและท่าทางมือโดยใช้มีเดียไปป์

เศรษฐกาล โปร่งนุช^{1,*}, ธนวัฒน์ สังขกุล², นัชชานนท์ เอ็งฉ้วน², วุฒิพงศ์ ปิ่นเสริมศักดิ์² และ กานต์ เจริญจิตร²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

² สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: sethakarn.pr@ssru.ac.th โทรศัพท์: 084-1782616

(รับบทความ: 12 เมษายน 2568; แก้ไขบทความ: 12 พฤษภาคม 2568; ตอรับบทความ: 19 พฤษภาคม 2568)

บทคัดย่อ

ระบบการรู้จำในปัจจุบันเผชิญกับความท้าทายที่เกี่ยวข้องกับความแม่นยำ ความเร็วตามเวลาจริง และทรัพยากรที่มีจำกัด บทความนี้นำเสนอระบบการรู้จำใบหน้าและท่าทางมือโดยใช้มีเดียไปป์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างระบบการรู้จำใบหน้าและท่าทางมือตามเวลาจริงโดยใช้คลังโปรแกรมมีเดียไปป์ โอเพนซีวี และไซพาย ซึ่งทำงานบนบอร์ดราสเบอร์รี่พาย รุ่นที่ 4 พร้อมเว็บแคม การทดลองนี้เลือกใช้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 100 คน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบมีอัตราความสำเร็จในการปลดล็อกประตูรักษาความปลอดภัยสำหรับบุคคลที่มีข้อมูลเก็บไว้ในฐานข้อมูล ร้อยละ 95 เนื่องจากมีข้อจำกัดของมุมมองและแสง จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือการนำเสนอแนวทางการตรวจสอบสิทธิ์แบบคู่ที่ใช้เทคนิคความคล้ายคลึงโคไซน์สำหรับระบบความปลอดภัย สามารถนำระบบนี้ไปประเมินประสิทธิภาพและความแม่นยำเพิ่มเติมในสถานการณ์โลกแห่งความเป็นจริง อาทิเช่น การประยุกต์ใช้ในสถานศึกษาตามบริบทไทย

คำสำคัญ: การรู้จำใบหน้า การรู้จำท่าทางมือ โอเพนซีวี มีเดียไปป์ ไซพาย

การอ้างอิงบทความ: เศรษฐกาล โปร่งนุช, ธนวัฒน์ สังขกุล, นัชชานนท์ เอ็งฉ้วน, วุฒิพงศ์ ปิ่นเสริมศักดิ์ และ กานต์ เจริญจิตร, "ระบบการรู้จำใบหน้าและท่าทางมือโดยใช้มีเดียไปป์," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 3, ฉบับที่ 4, หน้า 45-58, 2568.

1. Introduction

In the present era, facial recognition technology and hand gestures are increasingly being utilized. Research challenges in face and hand gesture recognition include environmental and visual limitations, data bias and representation issues, technical and computational difficulties, dataset limitations, user-centric and ethical considerations, and deployment in challenging environments.

For example, security systems combine facial recognition and hand gestures with artificial intelligence to verify a user's identity. This research proposes a method for picking up and placing hazardous objects using a hand gesture-controlled robotic arm system via a Kinect camera, designed for use in hazardous areas [1]. Numerous facial recognition research projects employ the You Only Look Once (YOLO) in combination with various algorithms [2-3]. Real-world applications are gaining popularity, particularly for implementation on low-power microcontroller boards [4]. Additionally, research using MediaPipe has enabled simple computer control through facial gesture recognition [5].

MediaPipe provides a suite of libraries and tools that enable the rapid implementation of artificial intelligence techniques in applications. By using MediaPipe as a ready-made model, developers can achieve high performance, multi-platform compatibility, and low resource consumption. Its applications span various domains, including

virtual reality or augmented reality, disability assistance, gaming, healthcare, and education, all supported by an active open-source community driving its continuous development.

Therefore, this paper presents face and hand gesture recognition system using MediaPipe. The research objectives are divided into 5 issues as follows: 1) Study and apply Raspberry Pi 4 board to create a face and hand gesture recognition system. 2) Design a real-time face and hand gesture detection and comparison system by comparing the detected data with the database. 3) Write an algorithm for a face recognition and hand gesture detection system using MediaPipe. 4) Develop a security system that can access data from face and hand gestures. 5) Evaluate the performance of the created system in a real environment and test the accuracy of the data in recognizing faces and hand gestures.

The novelty of this article lies in the presentation of a dual authentication approach that utilizes the cosine similarity technique for security systems. The system demonstrates promising capabilities in hand gesture recognition using this method. This work underscores the need for greater robustness in both face and hand gesture recognition algorithms, particularly when deployed in real-world, dynamic environments. It also emphasizes the importance of addressing detection inconsistencies to ensure stable and reliable performance across all frames.

บทความวิจัย (Research Article)

The paper is structured as follows: Section 2 reviews related work, Section 3 research methodology, Section 4 describes the experimental setup, Section 5 presents results, and Section 6 concludes.

2. Theory and Related Work

2.1 MediaPipe

MediaPipe is an open-source framework developed by Google Inc. It is a library designed for processing multi-modal data such as images, videos, audio, and sensor data. One of MediaPipe's key advantages is that it simplifies development and reduces the time required to create algorithms for computer vision, machine learning, artificial intelligence, and augmented reality (AR) [6]. As a result, algorithms using MediaPipe are more efficient and widely adopted. The features of the MediaPipe library comprises six key components:

- A structured pipeline framework with nodes for tasks such as data input, object detection, and processing.
- Core elements including graphs (data flow structure), nodes (functional units), and packets (data carriers).
- Pre-trained models for tasks like face and hand tracking, pose estimation, and 3D object detection.
- Landmark detection for identifying key points on faces, hands, or bodies, as illustrated in Figure 1.



Figure 1 Example of using Landmark detection function for recognition

- Cross-platform support for mobile, web, and desktop.
- Real-time, low-power processing.

2.2. OpenCV

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) is a freely available software library designed for computer vision and machine learning applications. It was created to provide a standardized framework for computer vision tasks and to facilitate the adoption of machine perception in commercial products [7]. OpenCV stands out due to its extensive documentation and strong developer interest. Furthermore, studies have shown that OpenCV offers excellent performance in processing image data, including its use in computer vision frameworks for object monitoring [8].

บทความวิจัย (Research Article)

2.3 SciPy

SciPy (Scientific Python) is a Python library built on NumPy, designed to support advanced scientific and numerical computations. Developed as an open-source project on GitHub [9], it offers tools for linear algebra, integration, optimization, and statistical analysis, enabling efficient solutions for complex mathematical and scientific problems. SciPy includes advanced capabilities such as derivative computation, Fourier transforms, and signal processing, with optimization functions designed for minimizing multivariable functions. It is widely utilized in engineering and research applications, including face mask detection using deep learning techniques [10].

2.4 Raspberry Pi 4

The Raspberry Pi 4 Model B, shown in Figure 2, is a compact, cost-effective computer for education and IoT applications. Powered by a 1.5 GHz Quad-core Cortex-A72 CPU and VideoCore VI GPU, it supports 4K video and comes with 1GB, 2GB, or 4GB of RAM.

It offers connectivity via USB-C, dual micro-HDMI, Gigabit Ethernet, 40 GPIO pins, and Wi-Fi/Bluetooth 5.0 [11]. Its efficiency and versatility make it ideal for embedded systems and technology-assisted learning research [12].

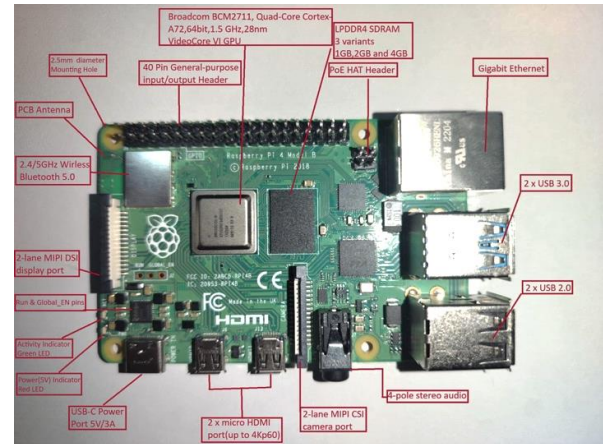


Figure 2 Raspberry Pi 4 Model B

2.5 Related Work

Numerous research projects have proposed methods to recognize users' faces and hand gestures. These methods have been applied to verify user identities and are widely used in smart and electronic devices.

Table 1 Comparative of related work

Research	Authentication	Accuracy	F1-Score	Cost
YSAF [2]	Face detection	92%	90%	High
Deep Learning [3]	Hand gesture recognition	88%	85%	High
Multimodal [13]	Password, Face, & Audio	N/A	99%	N/A

บทความวิจัย (Research Article)

Table 1 compares existing authentication methods based on accuracy, F1-score, and cost. The YSAF (Yolo-Spatial Attention-FFT) [2] and hand gesture recognition using deep learning [3] approaches use face detection and hand gesture recognition, achieving 92% or 90% and 88% or 85% for accuracy and F1-score respectively, though both incur high costs. The Multimodal authentication [13], combining password, face, and audio, achieved a 99% F1-score, but its accuracy and cost were not reported. This highlights the trade-off between performance and implementation cost across different techniques.

Based on the literature review of the aforementioned research, the study was designed using two types of authentication techniques: face recognition and hand gesture recognition. The system was developed to achieve higher Accuracy and F1-Score values while maintaining low cost.

3. Research Methodology

This section presents the research methodology used in the applied research. It is divided into two main topics: hardware design and software design. The details are as follows.

3.1 Hardware Design

The system uses a Raspberry Pi 4 board with a database in a hard disk drive as the main controller, called the “Process” as shown in Figure 3. The “Input” is a 640x480

pixel camera OKER model177 webcam mounted for face and hand movement recognition and connected to a main controller via the USB port. The “Output” consists of an LCD display and a security door.

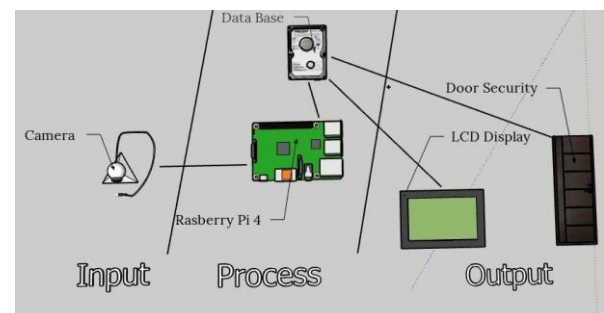


Figure 3 Hardware system overview

3.2 Software Design

This system, designed for real-time operations, uses Python integrated with OpenCV, MediaPipe, and SciPy libraries. OpenCV handles image detection and face processing, MediaPipe facilitates hand gesture detection, and SciPy computes the similarity between detected gestures and database data.

The system software design consists of three algorithms: face detection algorithm, hand gesture detection algorithm, and face and hand gesture recognition algorithm. The details are as follows.

บทความวิจัย (Research Article)

3.2.1. Face detection algorithm

The steps of the face detection algorithm are illustrated in Figure 4 and consist of ten sequential stages:

- Folder Verification: The algorithm begins by verifying the existence of a folder named *saved_faces*, which is designated for storing face images.
- Camera Initialization: The camera is enabled using the *cv2.VideoCapture* function.
- Camera Status Check: The status of the camera is checked using the *video_capture.isOpened* function to ensure proper functionality.
- Image Capture: An image is captured from the camera feed utilizing the *video_capture.read* function.
- Face Detection: The *face_recognition.face_locations* function is employed to detect faces in the image, identifying their coordinates (top, right, bottom, left).
- Border Extension: A border around the detected face is created by extending the face area and adjusting the margin variable.

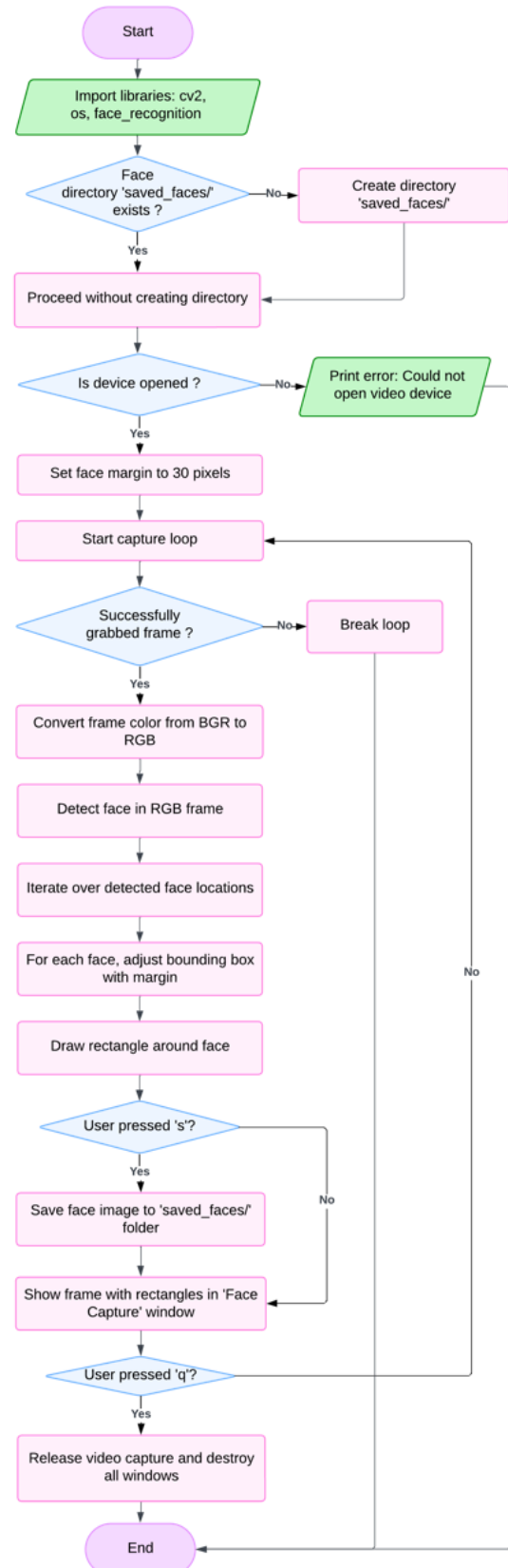


Figure 4 Face detection algorithm

บทความวิจัย (Research Article)

- **Frame Drawing:** A visual frame is drawn around the face using the `cv2.rectangle` function.

- **Image Saving:** The captured face image is saved as a JPG file within the `saved_faces` folder using the `cv2.imwrite` function. This operation is executed only when the user presses the 's' key on the keyboard.

- **Image Display:** The captured image is displayed on the screen using the `cv2.imshow` function.

- **Termination of Process:** The camera is released using `video_capture.release`, and all open windows are closed with the `cv2.destroyAllWindows` function. To terminate the operation at any point, the user can press the 'q' key on the keyboard.

3.2.2. Hand gesture detection algorithm

The steps of the hand gesture detection algorithm are illustrated in Figure 5 and consist of ten consecutive steps, as described below:

- **Folder Verification:** The algorithm begins by verifying the existence of a folder named `saved_faces`, which is designated for storing face images.

- **Import Libraries:** Import the required libraries, OpenCV and MediaPipe.

- **Initialize Hand Detection:** Set up hand detection using the MediaPipe Hands function. This involves configuring real-time hand detection with the `static_image_mode` function, enabling detection of both hands using the `max_num_hands` function, and

setting the minimum detection accuracy to 0.7 with the `min_detection_confidence` function.

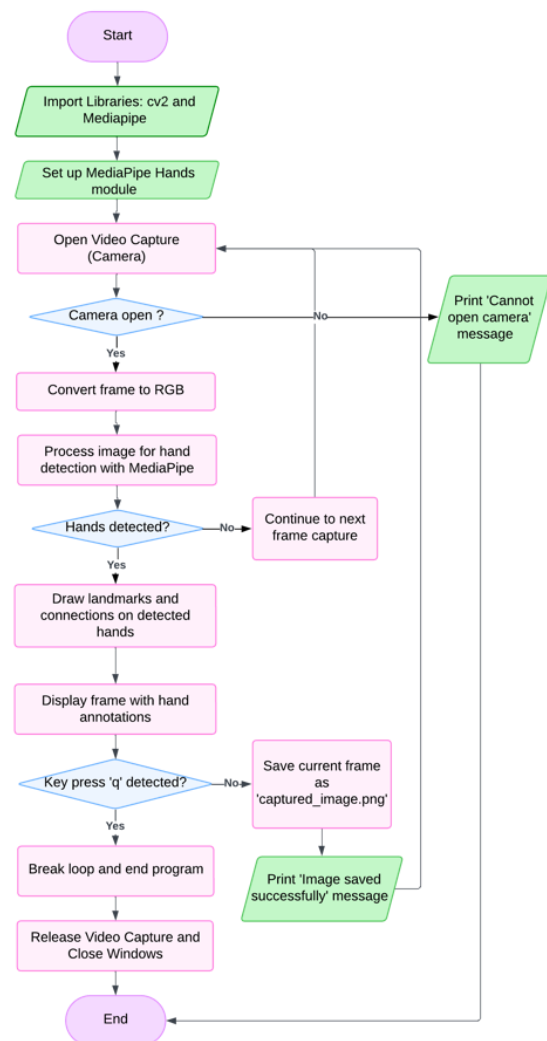


Figure 5 Hand gesture detection algorithm

- **Activate Camera:** Open the camera using the `cv2.VideoCapture` function.

- **Capture Images:** Loop through the camera feed and capture images using the `video_capture.read` function.

บทความวิจัย (Research Article)

- Convert Image Format: Convert the captured image from BGR to RGB format for compatibility with the MediaPipe library, using the `cv2.cvtColor` function.

- Detect Hands: Perform hand detection using the `hands.process(rgb_frame)` function from the MediaPipe library.

- Render Hand Landmarks: Draw landmarks and connecting lines on the detected hand using the `results.multi_hand_landmarks` and `mp_drawing.draw_landmarks` functions from the MediaPipe library.

- Display Output: Manually display the processed image with the `cv2.imshow` function.

- Handle Keyboard Commands: Use the `cv2.waitKey` function to check for keyboard input. If the user presses the 'q' key, exit the loop and terminate the program using the `video_capture.release` and `cv2.destroyAllWindows` functions. If any other key is pressed, save the current image as a PNG file.

3.2.3. Face and hand gesture recognition algorithm

Face recognition algorithms compare facial data from the camera with the database using encoding techniques. Hand gesture recognition relies on landmark point locations and cosine similarity “CosSin” to confirm correct gestures.

$$CosSin = 1 - \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} \quad (1)$$

where A and B are vectors of the relative positions of the landmarks on the hand gesture and the sign. If the dot product of the two vectors is close to 1, then the hand gestures are very similar.

This algorithm uses a database of finger pattern detection criteria, which can be verified by comparing different finger patterns. The finger pattern consists of '1' which is any finger up pattern and '0' which is no finger up pattern. These algorithmic conditions are used to determine if the detected hand gesture matches a gesture recorded in the database, which will result in authorization to unlock the security door system.

Figure 6 illustrates the eight steps of the face and hand gesture recognition algorithm for unlocking the security door.

- Open the camera and load pre-stored face and hand gesture data for recognition, including results from detection algorithms.

- Camera Frame Processing: The algorithm captures real-time images to begin face and hand gesture recognition.

- Face Detection: Using the face recognition library, the system searches for a face. If a face is detected, it compares the data with the face database.

- Face Comparison: If the detected face does not match the data in the database, the system displays an “Unlock failed” message on the screen. If the face matches, the system proceeds to hand gesture detection.

บทความวิจัย (Research Article)

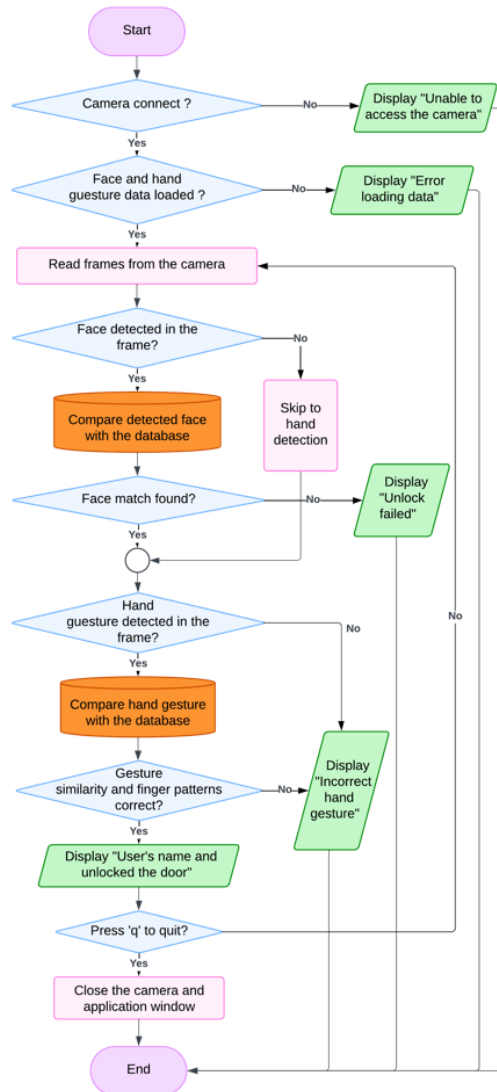


Figure 6 Face and hand gesture recognition algorithm

- Hand Detection with MediaPipe: During hand gesture detection, if no hand is detected in the image, the system displays an “Incorrect hand gesture” message on the screen. If a hand is detected, it is compared with the data in the database.

- Hand Gesture Comparison: The hand gesture similarity is calculated using the Cosine Similarity function, and the finger pattern is analyzed. If the similarity value is low or the finger pattern is incorrect, the system displays an “Invalid Hand Gesture” message. However, if the similarity value is above 0.93 and the finger pattern is correct, the system allows the security door to be unlocked.

- Unlocking the Security Door: If the user successfully passes both face and hand gesture recognition, the system displays the user’s name, and the message “Unlock” on the screen.

- Stopping the Application: The application closes and turns off the camera when the user presses the 'q' button.

4. Experiments and Setup

This section presents an experiment on face and hand gesture recognition using MediaPipe, as shown in Figure 7. It is divided into three parts: the sample population part, the experimental condition part, and the experimental part. The system is developed on the Raspberry Pi 4 board, which is the main real-time processing device, and the details are as follows:

บทความวิจัย (Research Article)

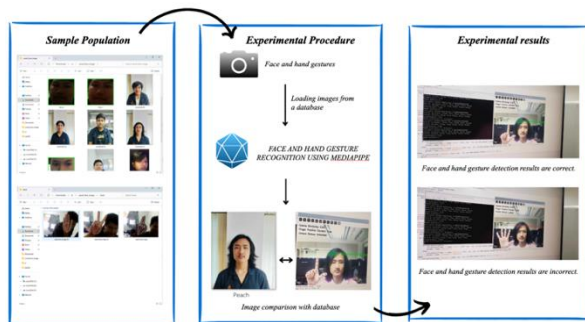


Figure 7 Face and hand gesture recognition experiment using MediaPipe

4.1 Data Collection

There were 100 participants from the Department of Computer Engineering at Suan Sunandha Rajabhat University. Data collection is divided into two parts: data types and data grouping.

Two types of data were collected: face images and hand gestures. A total of 500 face images were captured (5 images per participant) under varying illumination conditions and different angles. Additionally, each participant performed 10 dynamic hand gestures (e.g., thumbs-up, peace sign). The data is divided into a training set and a test set. The training set, comprising 70% of the data is used for model training, while the test set, comprising 30% of the data is used for validation.

4.2 Experimental Condition

Experimental conditions include lighting, camera angles, and environmental factors. Light intensity should range from 300 to 500

lux for clear images. The camera should be positioned at face level, with the face 50-100 cm and the hand 30-50 cm from the camera. A plain, patternless background is recommended to minimize detection interference.

4.3 Experimental Procedure

The experimental procedure consists of three steps. Step 1: Select an individual to stand in front of the Raspberry Pi 4 camera for real-time face and hand gesture detection. Step 2: The system compares the detected face and hand gestures with database data using CosSin. Step 3: If the data matches, the system unlocks the security door; otherwise, it displays a warning.

5. Experimental Results

From the experiment using a sample group of 100 people, divided into two equal groups, the experimental results can be divided into two parts: the results of the experiment on recognizing 100 consecutive frames of faces and the results of the experiment on recognizing 100 consecutive frames of hand gestures.

Figure 8 shows the experimental results of face recognition on 100 consecutive face frames. The x-axis represents the face frame number, ranging from 1 to 100, while the y-axis denotes the number of faces detected within each frame, spanning from 0 to 5. A blue line with markers shows the number of

บทความวิจัย (Research Article)

faces detected in each frame, providing a clear temporal trend.

A horizontal line at the 1 face threshold serves as a benchmark for system performance. Variations above and below this line indicate fluctuating face detections, ranging from zero to five, reflecting challenges such as illumination changes, occlusion, and varying numbers of visible individuals. The average number of detected faces per frame was 0.98 (± 0.12 SD), demonstrating high stability.

Figure 9 shows the experimental results of hand gesture recognition in 100 consecutive frames. The x-axis represents the frame number, ranging from 1 to 100, while the y-axis displays the cosine similarity values ranging from 0 to 1 and the binary finger status '1' for correct gestures and '0' for incorrect gestures.

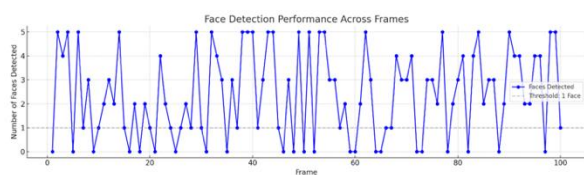


Figure 8 Face detection performance across frames

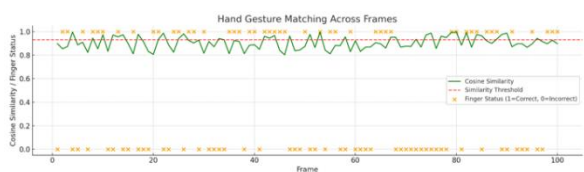


Figure 9 Hand gesture matching across frames

The green line with markers shows the cosine similarity per frame, indicating alignment with the reference gesture. The red line marks the 0.93 similarity threshold for acceptable matches, while orange crosses denote binary correctness: '1' for correct and '0' for incorrect gestures.

The average CosSin score was 0.91 (± 0.05 SD) exceeding the 0.93 threshold, indicating generally accurate gesture matching. However, the alternating binary pattern of correct and incorrect classifications suggests that factors beyond similarity scores influence gesture recognition.

Table 2 Summary of experimental results

Metric	Authorized Users	Unauthorized Users	Overall
Success Rate	95%	95%	95%
Mean Detect Time	1.2s ($\pm 0.3s$ SD)	1.5s ($\pm 0.4s$ SD)	1.35s
Accuracy	-	-	95%
Precision	94%	96%	-
Recall	96%	94%	-
F1-Score	95%	95%	-

Table 2 presents the experimental results, showing a consistent 95% success rate for both authorized and unauthorized users. The average detection time was 1.2s ($\pm 0.3s$ SD) for authorized users and 1.5s ($\pm 0.4s$ SD) for unauthorized users, with an overall mean of 1.35s. The system achieved 95% accuracy,

บทความวิจัย (Research Article)

with precision and recall values above 94% for both user groups. The F1-score was consistently 95%, indicating balanced and reliable real-time classification performance.

6. Conclusion

This paper introduces a face and hand gesture recognition system built using MediaPipe. A highlight of this research is the implementation of a dual authentication approach using the cosine similarity technique with OpenCV and SciPy for security systems, deployed on a Raspberry Pi 4 board equipped with a webcam. The study involved experiments with a sample of 100 university students. Results indicate that the system achieves a success rate of approximately 95% in unlocking a security door for students whose information is stored in the database, while effectively blocking unauthorized access by individuals without matching data. However, the system faces limitations related to lighting conditions, which in the experiments were set at 300-500 lux and the camera angle positioned at face level. When compared with studies [2–3], this research shows an improvement in Accuracy and F1-Score, reaching 95%.

Future work will evaluate the system in real-world scenarios, focusing on refining thresholding and adding features to improve accuracy and robustness in face and hand gesture recognition.

7. Acknowledgement

This research was supported by the Department of Computer Engineering, Suan Sunandha Rajabhat University, along with Mr. Peeradet Tanawiwat for their assistance in testing the system developed in this work.

8. References

- [1] K. Suphalak, N. Klanpet, N. Sikaressakul, and S. Prongnuch, "Robot Arm Control System via Ethernet with Kinect V2 Camera for use in Hazardous Areas," in *Proc. 1st Int. Conf. Robot., Eng., Sci., and Technol.*, 2024, pp. 175-180. DOI: 10.1109/RESTCON60981.2024.10463582.
- [2] R. Jeyaraj, B. Subramanian, K. Yogesh, A. Jin, and H. A Gohel, "YSAF: Yolo with Spatial Attention and FFT to Detect Face Spoofing Attacks," in *Proc. IEEE 3rd Int. Conf. AI in Cybersecurity*, 2024, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICAIC60265.2024.10433802.
- [3] N. Herbaz, H. El Idrissi, and A. Badri, "Deep Learning Empowered Hand Gesture Recognition: using YOLO Techniques," in *Proc. 14th Int. Conf. Intell. Syst.: Theor. and Appl.*, 2023, pp. 1-7. DOI: 10.1109/SITA60746.2023.10373734.
- [4] Y. Kale, N. Sakhare, M. Varghese, U. Dafe, P. Sawarkar, and A. Bagade, "Deploying a Sliding Gate by Utilizing Computer Vision and Machine Learning Techniques," in *Proc. Int. Conf. Innov. Data Commun. Technol. and Appl.*, 2023, pp. 22-26.

บทความวิจัย (Research Article)

- DOI:
10.1109/ICIDCA56705.2023.10099906.
- [5] A. K. Raja, C. Sugandhi, G. Nymish, N. Sai Havish, and M. Rashmi, "Face Gesture Based Virtual Mouse Using Mediapipe," in *Proc. IEEE 8th Int. Conf. for Convergence in Technol.*, 2023, pp. 1-6. DOI: 10.1109/I2CT57861.2023.10126453.
- [6] Google, "MediaPipe Solutions Guide," Google AI, [online]. Available: <https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/guide>. [Accessed: Nov. 24, 2024].
- [7] OpenCV, "About OpenCV," OpenCV, [online]. Available: <https://opencv.org/about/>. [Accessed: Nov. 22, 2024].
- [8] T. Wiangtong and S. Prongnuch, "Computer vision framework for object monitoring," in *Proc. 9th Int. Conf. Elect. Eng./Electron., Comput., Telecommun. and Inf. Technol.*, 2012, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ECTIcon.2012.6254291.
- [9] SciPy Community, "About SciPy," SciPy, [ออนไลน์]. Available: <https://scipy.org/about/>. [Accessed: Nov. 27, 2024].
- [10] J R. V. Jeny, B. Shraddha, B. Ashritha, D. Shiva Sai, and M. Naveen, "Deep Learning Framework for Face Mask Detection," in *Proc. 5th Int. Conf. Trends in Electron. and Inf.*, 2021, pp. 1705-1712. DOI: 10.1109/ICOEI51242.2021.9452930.
- [11] Raspberry Pi Foundation, "Raspberry Pi 4 Model B," Raspberry Pi, [online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>. [Accessed: Nov. 20, 2024].
- [12] S. Prongnuch and S. Sitjongsataporn, "Technology-assisted Learning on Embedded Systems with Multi-single Board," in *Proc. Int. Conf. Power, Energy and Innov.*, 2021, pp. 191-194. DOI: 10.1109/ICPEI52436.2021.9690651.
- [13] T. Hild, P. Moore, and M. Powell, "Multimodal Authentication," in *Proc. Annual General Donald R. Keith Memorial Conf.*, May 2, 2024. [online]. Available:

การพัฒนาระบบคัดแยกระดับความสุกของฟักทองด้วยการผสานข้อมูลภาพและเสียง โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง

ฐานันดร มุลสาร¹, วิกรม วรรณสุทธิ์² และ ดนุ วิโรจน์อุไรเรือง^{1,*}

¹ สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

² สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: tanandonr.mg65@ubru.ac.th โทรศัพท์: 099-1569463

(รับบทความ: 20 เมษายน 2568; แก้ไขบทความ: 17 กรกฎาคม 2568; ตอรับบทความ: 15 สิงหาคม 2568)

บทคัดย่อ

ฟักทองเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความต้องการสูง แต่การประเมินระดับความสุกยังคงเป็นปัญหา เนื่องจากเกษตรกรส่วนใหญ่ขาดความชำนาญ และกระบวนการคัดแยกแบบดั้งเดิมใช้เวลานาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบจำแนกระดับความสุกของฟักทองพันธุ์อำพัน 342 โดยใช้ค่าความหวาน (Brix) จากตัวอย่าง 30 ตัวอย่าง แบ่งเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ดิบ สุก และสุกเกินไป โดยเก็บข้อมูลภาพและเสียงมาใช้ฝึกโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) ผลการทดลองพบว่า โมเดลที่ใช้ภาพเพียงอย่างเดียวให้ค่า F1-Score เท่ากับ 0.84 และ Sensitivity เท่ากับ 0.85 ขณะที่โมเดลที่ใช้เสียงเพียงอย่างเดียวให้ค่า F1-Score เท่ากับ 0.87 และ Sensitivity เท่ากับ 0.85 สำหรับโมเดลที่รวมข้อมูลภาพและ Spectrogram ให้ผลลัพธ์ดีที่สุด โดยมีค่า F1-Score เท่ากับ 0.93 และ Sensitivity เท่ากับ 0.92 ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยภาพจำนวน 900 ภาพ (สำหรับทดสอบ 150 ภาพ) ไฟล์เสียง 900 ไฟล์ (สำหรับทดสอบ 150 ไฟล์) และข้อมูลแบบรวมภาพ-สเปกโตรแกรม 1,800 รายการ (สำหรับทดสอบ 300 รายการ) ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือขนาดของชุดข้อมูลที่ยังไม่ใหญ่มาก และความไวของข้อมูลเสียงต่อสภาพแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ระบบที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้จริงภาคสนาม เพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดความสูญเสียจากการคัดแยกแบบใช้แรงงานคน

คำสำคัญ: ฟักทองอำพัน 342 โครงข่ายประสาทเทียม CNN การจำแนกภาพและเสียง Spectrogram เทคนิคของเครื่อง

การอ้างอิงบทความ: ฐานันดร มุลสาร, วิกรม วรรณสุทธิ์ และ ดนุ วิโรจน์อุไรเรือง, "การพัฒนาระบบคัดแยกระดับความสุกของฟักทองด้วยการผสานข้อมูลภาพและเสียงโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 3, ฉบับที่ 4, หน้า 59-75, 2568.

Development of Pumpkin Ripeness Classification System by Integrating Image and Sound Data Using Machine Learning Techniques

Tanandonr Moolsanr¹, Wikrom Wonnasuthi² and Danu Wiroteurairuang^{1,*}

¹ Engineering Technology Program, Faculty of Industrial Technology, Ubon Ratchathani Rajabhat University

² Computer Science Program, Faculty of Science and Technology, Surindra Rajabhat University

* Corresponding Author: tanandonr.mg65@ubru.ac.th, Tel: 099-1569463

(Received: April 20, 2025; Revised: July 17, 2025; Accepted: August 15, 2025)

Abstract

Pumpkin is a high-demand economic crop, but determining its ripeness remains a challenge due to limited expertise among farmers and the labor-intensive manual sorting process. This study aimed to develop a classification model for assessing the ripeness levels of "Ampan 342" pumpkins using Brix values from 30 samples categorized into three levels: unripe, ripe, and overripe. Image and sound data were collected and used to train Convolutional Neural Network (CNN) models. The image-based model achieved an F1-score of 0.84 and a sensitivity of 0.85, while the sound-based model yielded an F1-score of 0.87 and a sensitivity of 0.85. The combined image and spectrogram-based model achieved the best performance, with an F1-score of 0.93 and a sensitivity of 0.92. The dataset comprised 900 images (150 for testing), 900 audio recordings (150 for testing), and 1,800 combined image-spectrogram samples (300 for testing). Limitations of the study include the relatively small dataset and the susceptibility of audio data to environmental noise. Nevertheless, the proposed approach shows promise for real-world applications as an automated system for evaluating pumpkin ripeness in the field, enhancing accuracy and reducing post-harvest losses.

Keywords: AMPHAN 342 Pumpkin, Convolutional Neural Network, Image and Sound Classification, Spectrogram, Machine Learning

Please cite this article as: T. Moolsanr, W. Wonnasuthi and D. Wiroteurairuang, "Development of Pumpkin Ripeness Classification System by Integrating Image and Sound Data Using Machine Learning Techniques," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 3, no. 4, pp. 59-75, 2025.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ฟักทอง (Pumpkin) เป็นพืชเศรษฐกิจที่ได้รับ ความนิยมสูงในประเทศไทย โดยในปี 2562 มีพื้นที่ เก็บเกี่ยวรวมประมาณ 23,384 ไร่ และให้ผลผลิตรวม กว่า 51,520 ตัน [1] แม้จะมีปริมาณการผลิตจำนวนมาก แต่การประเมินความสุกของฟักทองยังคงอาศัย แรงงานคนเป็นหลัก ซึ่งมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำ และความรวดเร็ว การคัดแยกที่ไม่ถูกต้องอาจนำไปสู่ การสูญเสียทางเศรษฐกิจ ทั้งในกระบวนการขนส่ง และการจัดจำหน่าย ในระดับสากล มีงานวิจัยที่พัฒนา เทคโนโลยีเพื่อประเมินความสุกของผลผลิตทาง การเกษตรโดยใช้เทคนิคด้านปัญญาประดิษฐ์ เช่น งานของ Smith et al. (2021) [2] ที่ใช้ข้อมูลภาพ และเสียงในการประเมินความสุกของมะม่วงด้วยความ แม่นยำสูง แนวทางดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้กับ ฟักทองได้เช่นกัน งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาระบบจำแนก ระดับความสุกของฟักทองพันธุ์อำพัน 342 โดยใช้ภาพ และเสียงร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพของการคัดแยก ลดการสูญเสีย และ รองรับการใช้งานในภาคสนามจริง

หนึ่งในปัญหาหลักของการผลิตฟักทองคือการคัด แยกระดับความสุก เนื่องจากระดับความสุกมีผล โดยตรงต่อรสชาติ เนื้อสัมผัส และความต้องการของ ตลาด อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันการคัดแยกยังคงพึ่งพา ทักษะส่วนบุคคล การสังเกตด้วยสายตา หรือการเคาะ เพื่อฟังเสียง ซึ่งมีแนวโน้มเกิดความผิดพลาดสูง ไม่สม่ำเสมอ และต้องใช้แรงงานจำนวนมาก โดยเฉพาะในฤดูเก็บเกี่ยวที่มีผลผลิตจำนวนมาก เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนา ระบบจำแนกระดับความสุกของฟักทอง พันธุ์อำพัน 342 โดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ ระดับสากล ได้แก่ โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอน วอลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) ซึ่งเป็นเทคนิคด้านการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ที่ได้รับความนิยมในการประมวลผลภาพ

และเสียง ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้ข้อมูลจากภาพสีของ ฟักทองและเสียงที่เกิดจากการเคาะผิวผล โดยนำมา ผ่านกระบวนการวิเคราะห์และฝึกโมเดลด้วย CNN เพื่อจำแนกระดับความสุก ได้แก่ ดิบ สุก และสุก เกินไป โดยเฉพาะการใช้เสียงร่วมกับภาพในรูปแบบ Spectrogram ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการจำแนก อย่างมีนัยสำคัญ

ข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีนี้ คือความสามารถใน การวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมากได้อย่างแม่นยำ สม่ำเสมอ และไม่ขึ้นกับบุคคล ช่วยลดต้นทุนแรงงาน เพิ่มความเร็ว และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ใน ภาคสนามได้จริงผ่านอุปกรณ์กล้องและไมโครโฟน ตามมาตรฐานทั่วไป

2. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์ (Image Processing) คือ กระบวนการที่ทำให้ได้ภาพ ที่มีความละเอียดคมชัด เพื่อให้สามารถนำไปใช้งาน หรือการแปลงภาพให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับ การวิเคราะห์ต่อไป [3]

2.1 สัญญาณรบกวนภาพแบบเกาส์เซียน (Gaussian Noise)

เป็นสัญญาณรบกวนประเภทหนึ่งทางด้านสถิติ ที่ค่าฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นมีค่า เท่ากับค่าการกระจายตัวแบบปกติ ซึ่งค่าของสัญญาณ รบกวนจะมีค่าอยู่ในการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน โดยสมการของสัญญาณรบกวนภาพแบบเกาส์เซียน [4] สามารถแสดงได้ในสมการที่ (1)

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

บทความวิจัย (Research Article)

โดยที่

$G(x,y)$ คือ ค่าของฟิลเตอร์เกาส์เซียนที่ตำแหน่ง (x,y)
 σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่กำหนด ความกว้างของฟิลเตอร์

โดยที่

CDF_{min} คือ ค่า CDF ที่น้อยที่สุดในภาพ
 $M \times N$ คือ จำนวนพิกเซลในภาพ
 L คือ ค่าสูงสุดของสี (255 สำหรับ Grayscale)

2.2 Histogram Equalization

การปรับปรุงความเปรียบต่าง (Contrast) ของภาพโดยการกระจายความถี่ของค่าความสว่าง (Intensity) ให้กระจายอย่างสม่ำเสมอมากขึ้นในช่วงของความสว่างทั้งหมดที่มีอยู่ในภาพ เทคนิคนี้ช่วยให้รายละเอียดในภาพที่มีความเปรียบต่างต่ำถูกขยายให้ชัดเจนขึ้น โดยเฉพาะในภาพที่มีการกระจุกตัวของค่าความสว่างในบางช่วงแคบ ๆ และการปรับรูปภาพให้มีการกระจายตัวของความเข้มแสงอย่างสม่ำเสมอซึ่งทำให้กราฟความถี่สะสมเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง [5]

คำนวณ Histogram $H(r_k)$ สำหรับทุก ๆ ค่าสี $H(r_k)$ ในช่วงค่าสีทั้งหมด (0-255 สำหรับ Grayscale)
 $H(r_k)$ = จำนวนพิกเซลที่มีค่าสี r_k ในภาพ คำนวณฟังก์ชัน CDF (Cumulative Distribution Function) สร้าง CDF $CDF(r_k)$ โดยบวกความถี่ของ Histogram จากซ้ายไปขวา

$$CDF(r_k) = \sum_{i=0}^k H(r_i) \quad (2)$$

ปรับปรุงค่าสีในภาพ ปรับปรุงค่าสีของแต่ละพิกเซลในภาพ $I(x,y)$ โดยใช้ค่า CDF

$$I_{\text{equalized}}(x,y) = \left\lfloor \frac{CDF(I(x,y)) - CDF_{min}}{M \times N - CDF_{min}} \times L - 1 \right\rfloor \quad (3)$$

สร้างภาพที่ปรับปรุงแล้วใช้ค่า $I_{\text{equalized}}(x,y)$ เพื่อสร้างภาพใหม่ที่มีการกระจายความสว่างที่ปรับปรุงแล้ว

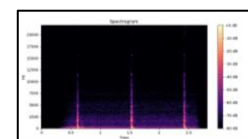
2.3 การกำจัดเสียงรบกวน (Eliminate Noise)

การลดหรือขจัดเสียงที่ไม่ต้องการที่มีอยู่ในสัญญาณเสียง เช่น เสียงลม เสียงจากเครื่องจักร หรือเสียงรบกวนจากสภาพแวดล้อมต่าง ๆ โดยมักจะใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น การกรอง (Filtering) หรือการใช้เทคโนโลยีการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) เช่น Noise Reduction หรือ Noise Cancellation เพื่อแยกแยะเสียงรบกวนออกจากเสียงที่ต้องการ

2.4 การเสริมประสิทธิภาพเสียง (Enhancements)

การปรับแต่งหรือปรับปรุงคุณภาพของเสียงเพื่อให้ฟังได้ชัดเจนขึ้น เช่น การเพิ่มความคมชัดของเสียง การปรับความสมดุลของเสียง หรือการเพิ่มรายละเอียดในบางส่วนของสัญญาณเสียง

2.5 สเปกโตรแกรม (Spectrogram)



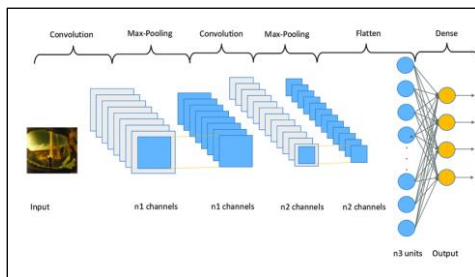
รูปที่ 1 สเปกโตรแกรม (Spectrogram)

บทความวิจัย (Research Article)

จากรูปที่ 1 แสดงสเปกโตรแกรมของการบันทึกเสียงเป็นการแสดงผลข้อมูลเสียงในรูปแบบกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของความถี่ (Frequency) และแอมพลิจูด (Amplitude) ของเสียงตลอดช่วงเวลา โดยใช้ในการวิเคราะห์รายละเอียดของเสียงที่บันทึกไว้ [6]

2.6 Convolutional Neural Network (CNN)

เป็นโมเดลประสาทเทียมที่มีโครงสร้างที่ออกแบบมาเพื่อการประมวลผลภาพและข้อมูลที่มีลักษณะเป็นตาราง (Grid-Like Structure) โดยมีช่วงเวลาหรือสถานที่ที่ข้อมูลมีความสำคัญเช่นกัน ภายในภาพโมเดล CNN นี้มีความสามารถในการเรียนรู้และจดจำลักษณะที่เป็นลักษณะที่สำคัญของข้อมูลด้วยตนเอง [7]



รูปที่ 2 Convolutional Neural Network (CNN)

จากรูปที่ 2 คือ ขั้นตอนการทำงานของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน และสมการในแต่ละเลเยอร์

ขั้นที่ 1 Input Layer : รับภาพอินพุต

ขั้นที่ 2 ชั้น Convolutional Layer ในเลเยอร์คอนโวลูชันฟิลเตอร์ (หรือเคอร์เนล) ถูกใช้งานเพื่อตรวจจับคุณลักษณะต่าง ๆ ของภาพสมการคอนโวลูชันระหว่างอินพุต / และฟิลเตอร์ K จะเป็น

$$(I * K)(i, j) = \sum_m \sum_n I(i+m, j+n) K(m, n) \quad (4)$$

โดยที่

I คือ อินพุต (เช่น ภาพ)

K คือ ฟิลเตอร์

(i, j) คือ พิกัดในผลลัพธ์ของคอนโวลูชัน

ขั้นที่ 3 Activation Function ฟังก์ชันเปิดใช้ (Activation Function) ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มไม่เชิงเส้นให้กับโมเดล ซึ่งช่วยให้สามารถเรียนรู้จากข้อมูลที่ซับซ้อนขึ้นได้ ฟังก์ชันที่นิยมใช้คือ ReLU (Rectified Linear Unit)

$$f(x) = \max(0, x) \quad (5)$$

ขั้นที่ 4 Pooling Layer เลเยอร์พูลลิงมักจะใช้ Max Pooling เพื่อลดขนาดของข้อมูล

$$P(i, j) = \max_{(m, n)} \epsilon_{\text{pool_region}}(i+m, j+n) \quad (6)$$

ขั้นที่ 5 Fully Connected Layer ในเลเยอร์ Fully Connected แต่ละนิวรอนจะเชื่อมต่อกับทุกนิวรอนในเลเยอร์ก่อนหน้า ผลลัพธ์คำนวณโดยใช้

$$y = Wx + b \quad (7)$$

โดยที่

y คือ ผลลัพธ์

W คือ เวกเตอร์น้ำหนัก

x คือ เวกเตอร์อินพุต

b คือ ไบแอส

บทความวิจัย (Research Article)

ขั้นตอนที่ 6 Loss Function เพื่อฝึกฝนโมเดล CNN ต้องมีฟังก์ชันการสูญเสีย (Loss Function) เพื่อวัดความแตกต่างระหว่างการคาดการณ์ของโมเดลและค่าจริง (Ground Truth) ตัวอย่างหนึ่งคือ Cross-Entropy Loss สำหรับปัญหาการจำแนก

$$L = -\sum y_i \log(p_i) \quad (8)$$

โดยที่

Y_i คือ ค่าจริง

P_i คือ ค่าที่คาดการณ์

ขั้นตอนที่ 7 การปรับน้ำหนักในระหว่างการฝึกฝนโมเดลใช้วิธี Backpropagation และการลดค่า Gradient (Gradient Descent)

2.7 ความสัมพันธ์ของค่า Brix กับระดับความสุกของผลไม้

ค่า Brix เป็นการวัดความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลในของเหลว ซึ่งมักใช้เพื่อวัดความหวานของผลไม้ โดยค่า Brix หนึ่งหน่วยเท่ากับ 1 กรัมของซูโครสในน้ำ 100 กรัม ดังนั้น ค่า Brix จึงสามารถแสดงถึงปริมาณน้ำตาลในผลไม้ได้

ผลไม้ไม่สุก ในระยะแรกการพัฒนาของผลไม้ ปริมาณน้ำตาลในผลไม้จะน้อยและค่า Brix จะต่ำซึ่งหมายความว่าผลไม้ยังไม่สุกและมีรสชาติที่ไม่หวานมาก

ผลไม้สุกเต็มที่ เมื่อผลไม้พัฒนาและเข้าสู่ระยะที่สุกเต็มที่ ปริมาณน้ำตาลในผลไม้จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ทำให้ค่า Brix สูงขึ้น ซึ่งหมายความว่าผลไม้มีความหวานและมีรสชาติที่ดีที่สุด

ผลไม้สุกเกินไป หากผลไม้สุกเกินไปปริมาณน้ำตาลอาจลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

ตารางที่ 1 ค่า Brix ของฟักทอง

ระดับการสุก	ค่า Brix	ระดับความหวาน
ฟักทองดิบ	5-8	หวานน้อย
ฟักทองสุก	9-14	หวานปานกลาง
ฟักทองสุกเกินไป	15 ขึ้นไป	หวานมาก

จากตารางที่ 1 สรุปว่า ค่า Brix สามารถใช้บ่งชี้ระดับความสุกของฟักทองได้ โดยค่า Brix ยิ่งสูง ฟักทองยิ่งสุกและมีความหวานมากขึ้น [8]

2.8 เปรียบเทียบและการพัฒนาต่อยอดจากงานวิจัยที่ผ่านมา

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า มีงานวิจัยหลายฉบับที่นำเทคโนโลยี การประมวลผลภาพ และเสียง มาใช้ในการจำแนกระดับความสุกของผลไม้ เช่น มะม่วง มะเขือเทศ และแตงโม โดยใช้ CNN หรือ Machine Learning ในการเรียนรู้ลักษณะเฉพาะ (Feature) ของข้อมูล

Lee et al. (2020) ใช้ข้อมูลเสียงจากการเคาะแตงโมแปลงเป็น Spectrogram แล้ววิเคราะห์ด้วย CNN ซึ่งได้ความแม่นยำประมาณ 88% [9]

Chen et al. (2019) ใช้ภาพ RGB ของมะเขือเทศกับโมเดล CNN ในการแยกความสุก ได้ F1-Score ประมาณ 0.86 [10]

งานวิจัยก่อนหน้านี้มักใช้ข้อมูลเพียงประเภทเดียว (ภาพหรือเสียง) และมักเน้นไปที่ผลไม้บางชนิด

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลำดับ	งานวิจัย (อ้างอิง)	เทคโนโลยีที่ใช้	ข้อมูลนำเข้า	จุดเด่น	ข้อจำกัด
1	[8] Smith et al.	Deep Learning	ภาพฟักทอง	แนวทางอัตโนมัติลดแรงงานคน	ไม่ระบุโมเดลหรือผลลัพธ์เชิงปริมาณ
2	[9] Wang et al.	CNN (Convolutional)	ภาพ RGB	ไม่ทำลายผลผลิต จัดระดับความสุกได้	ยังไม่ทดสอบข้อมูลจริงภาคสนาม
3	[10] Chen et al.	CNN	ภาพฟักทอง	ใช้เทคนิค AI ในการจัดการเกษตร	ยังไม่ครอบคลุมข้อมูลหลายแหล่ง
4	งานวิจัยนี้	CNN + Multimodal	ภาพ + เสียง	ความแม่นยำสูงสุด (F1 = 0.93) ใช้ข้อมูลหลายมิติ	ข้อมูลจำนวนน้อย ไวต่อเสียงรบกวน

จากตารางที่ 2 พบว่าเทคโนโลยี Deep Learning โดยเฉพาะ Convolutional Neural Network (CNN) ถูกนำมาใช้ในการจำแนกระดับความสุกของฟักทอง โดยอาศัยข้อมูลภาพเป็นหลัก เสนอแนวทางอัตโนมัติที่ช่วยลดภาระแรงงานมนุษย์ แต่ยังมีข้อด้อยหลายประการ เช่น เทคนิคและผลลัพธ์เชิงปริมาณ ขณะที่ Wang et al. พัฒนาโมเดล CNN จากภาพ RGB ซึ่งสามารถจัดระดับความสุกได้โดยไม่ทำลายผลผลิต แต่ยังไม่ผ่านการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง ส่วนงานของ Chen et al. ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของ AI ในการจัดการเกษตรกรรม แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านความหลากหลายของแหล่งข้อมูล

การคัดแยกคุณภาพของทุเรียนโดยใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพ (Image Processing) ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) เพื่อจำแนกคุณภาพของทุเรียนอัตโนมัติ ใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) โดยเฉพาะ CNN ในการวิเคราะห์ภาพถ่ายของทุเรียน เพื่อจำแนกคุณภาพ เช่น ความสุก หรือสภาพของทุเรียน [11]

การพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อจำแนกความสุกของทุเรียนจากเสียงเคาะโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) การใช้เทคโนโลยีการวิเคราะห์เสียง (Acoustic

Analysis) เพื่อวัดเสียงเคาะทุเรียนและประเมินระดับความสุกของทุเรียน [12]

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ศึกษาเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อใช้ในการกำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

3.2 การเตรียมข้อมูล

3.2.1 ข้อมูลภาพ

ใช้ชุดข้อมูลรูปภาพ (Data set) ฟักทอง โดยทำการแบ่งข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ (Training Set) ตามค่า Brix จำนวน 900 ภาพ ใช้สำหรับชุดทดสอบความถูกต้อง (Validation Set) จำนวน 150 ภาพ และชุดทำนาย (Prediction) จำนวน 100 ภาพ โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันในการสร้างโมเดล และทำการทดสอบการทำงาน การทดสอบโดยได้แบ่งประเภทของข้อมูลออกเป็น 3 คลาส ได้แก่ ฟักทองดิบ ฟักทองสุก ฟักทองสุกเกินไป

บทความวิจัย (Research Article)

3.2.2 ข้อมูลเสียง

ใช้ชุดข้อมูลเสียง (Data set) ฟักทอง โดยทำการแบ่งข้อมูลสำหรับใช้ในการเรียนรู้ (Training Set) ตามค่า Brix จำนวน 900 เสียง ใช้สำหรับชุดทดสอบความถูกต้อง (Validation Set) จำนวน 150 เสียง และชุดทำนาย (Prediction) จำนวน 100 เสียง โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันในการสร้างโมเดล และทำการทดสอบการทำงานการทดสอบโดยได้แบ่ง ประเภทของข้อมูลออกเป็น 3 คลาส ได้แก่ ฟักทองดิบ ฟักทองสุก ฟักทองสุกเกินไป และทำการแปลงเสียงฟักทองแต่ละคลาส เป็น Spectrogram

3.2.3 ข้อมูลภาพและเสียง

ใช้ชุดข้อมูลภาพและเสียง โดยเสียงฟักทองแปลงเป็น Spectrogram ก่อนจากนั้นนำข้อมูลภาพและ Spectrogram (Data Set) ฟักทอง โดยทำการแบ่งข้อมูลสำหรับใช้ในการเรียนรู้ (Training Set) ตามค่า Brix จำนวนภาพและ Spectrogram อย่างละ 900 ภาพ/Spectrogram ใช้สำหรับชุดทดสอบความถูกต้อง (Validation Set) จำนวนภาพและ Spectrogram 150 ภาพ/Spectrogram และชุดทำนาย (Prediction) จำนวนภาพและ Spectrogram 100 ภาพ/Spectrogram โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันในการสร้างโมเดล

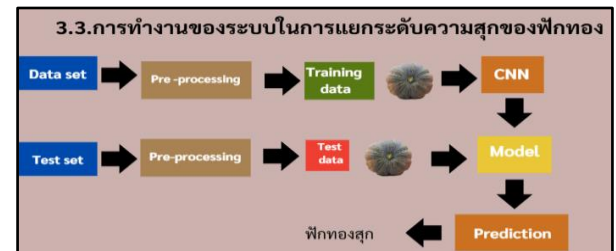
การทดสอบโดยได้แบ่งประเภทของข้อมูลออกเป็น 3 คลาส ได้แก่ ฟักทองดิบ ฟักทองสุกและ ฟักทองสุกเกินไปดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การแบ่งฟักทองออกเป็น 3 คลาส ตามค่า Brix

3.3 ออกแบบแนวคิดระบบการทำงานการแยกระดับความสุกของฟักทอง

3.3.1 การทำงานของระบบการแยกระดับความสุกของฟักทองด้วยภาพ



รูปที่ 4 การทำงานของระบบการแยกระดับความสุกของฟักทองด้วยภาพ

จากรูปที่ 4 บล็อกที่ 1 คือ Data Set เป็นส่วนของชุดข้อมูลฟักทอง ที่ได้จัดเตรียมข้อมูลรูปภาพฟักทอง จากการวัดค่า Brix โดยมีการเปรียบเทียบข้อมูลค่า Brix ของฟักทอง พร้อมชุดข้อมูลการเรียนรู้และข้อมูลชุดทดสอบความถูกต้องเพื่อประเมินประสิทธิภาพโมเดล

บล็อกที่ 2 คือ Pre-Processing เป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับการกำจัดและลดสัญญาณรบกวน จากภาพ จากนั้นจึงนำไปให้โมเดลตรวจจับวัตถุที่ถูกฝึกสอนแล้ว ทำการวิเคราะห์

บล็อกที่ 3 คือ CNN เป็นอัลกอริทึมหลักที่ใช้สำหรับสร้างโมเดลเพื่อจำแนกประเภทการแยกระดับความสุก

บล็อกที่ 4 Model เป็นโมเดลที่ถูกสร้างด้วยอัลกอริทึม จากกระบวนการเรียนรู้ของข้อมูลและทำการปรับค่าน้ำหนัก (Weight) ให้เหมาะสมกับชุดข้อมูลฟักทองในการนำไปใช้งาน

บล็อกที่ 5 Test Data เป็นชุดข้อมูลรูปภาพฟักทองที่ใช้ในการทดสอบระบบและค่า Brix เพื่อหา

บทความวิจัย (Research Article)

ประสิทธิภาพความแม่นยำในการจำแนกประเภทของ
ฟักทอง โดยเป็นชุดข้อมูลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการ
เรียนรู้มาก่อน

บล็อกที่ 6 Training Data เป็นส่วนการนำชุด
ข้อมูลรูปภาพฟักทองและค่า Brix มาเรียนรู้และฝึกฝน

บล็อกที่ 7 Prediction เป็นกระบวนการที่ได้จาก
การวิเคราะห์และการทำนายผลการแยกแยะโดยการ

โมเดล Convolutional Neural Network (CNN)
ถูกฝึกด้วยพารามิเตอร์ต่อไปนี้ โดยใช้ TensorFlow

จำนวน Epoch: 25 รอบการฝึก

Batch size: 32 ตัวอย่างต่อรอบการฝึก

Optimizer: Adam

Learning Rate: 0.001

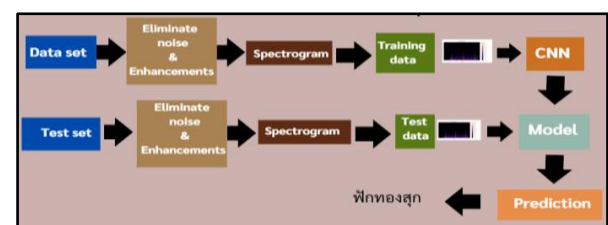
Loss Function: Categorical Cross Entropy

ตารางที่ 3 แสดงผลการทำงานของโมเดล CNN ภาพฟักทอง

Layer	Output Shape	Param #	คำอธิบาย
Conv2D	(126, 126, 32)	896	เลเยอร์คอนโวลูชัน 32 ฟิลเตอร์ ขนาด 3x3 ใช้ฟังก์ชัน ReLU
MaxPooling2D	(63, 63, 32)	0	เลเยอร์ Max Pooling ลดขนาดภาพโดยใช้ฟิลเตอร์ 2x2
Conv2D	(61, 61, 64)	18,496	เลเยอร์คอนโวลูชัน 64 ฟิลเตอร์ ขนาด 3x3 ใช้ฟังก์ชัน ReLU
MaxPooling2D	(30, 30, 64)	0	เลเยอร์ Max Pooling ลดขนาดภาพโดยใช้ฟิลเตอร์ 2x2
Conv2D	(28, 28, 128)	73,856	เลเยอร์คอนโวลูชัน 128 ฟิลเตอร์ ขนาด 3x3 ใช้ฟังก์ชัน ReLU
MaxPooling2D	(14, 14, 128)	0	เลเยอร์ Max Pooling ลดขนาดภาพโดยใช้ฟิลเตอร์ 2x2
Flatten	(25088)	0	แปลงข้อมูลจาก 3D เป็น 1D
Dense	(128)	3,221,120	เลเยอร์ Fully connected 128 หน่วย ใช้ฟังก์ชัน ReLU
Dense (Output)	(3)	387	เลเยอร์เอาต์พุต 3 หน่วย ใช้ฟังก์ชัน SoftMax สำหรับการจำแนกคลาส

จากตารางที่ 3 โมเดลนี้เป็นโครงข่ายประสาท
เทียมแบบ CNN ที่ประกอบด้วยเลเยอร์คอนโวลูชัน 3
ชั้นสลับกับ MaxPooling เพื่อลดขนาดภาพ ตามด้วย
การแปลงข้อมูลเป็นเวกเตอร์ 1 มิติ (Flatten) และ
เลเยอร์ Dense 2 ชั้น โดยใช้ ReLU และ SoftMax
ตามลำดับ เหมาะสำหรับการจำแนกภาพออกเป็น 3
คลาส มีจำนวนพารามิเตอร์รวมประมาณ 3.3 ล้านค่า

3.3.2 การทำงานของระบบการแยกระดับความสุก ของฟักทองด้วยเสียง



รูปที่ 5 การทำงานของระบบการแยกระดับความสุก ของฟักทองด้วยเสียง

บทความวิจัย (Research Article)

จากรูปที่ 5 บล็อกที่ 1 คือ Data Set เป็นส่วนของชุดข้อมูลฟักทอง ที่ผู้วิจัยได้จัดเตรียมข้อมูลเสียงฟักทอง จากการวัดค่า Brix โดยมีการเปรียบเทียบข้อมูลค่า Brix ของฟักทอง พร้อมชุดข้อมูลการเรียนรู้และข้อมูลชุดทดสอบความถูกต้อง

บล็อกที่ 2 คือ Eliminate Noise & Enhancements กระบวนการในการกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) และปรับปรุงคุณภาพ (Enhancements) ของข้อมูลหรือสัญญาณ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ชัดเจนและมีประสิทธิภาพ

บล็อกที่ 3 คือ Spectrogram การแสดงผลสัญญาณเสียงหรือสัญญาณคลื่นในรูปแบบของภาพ

บล็อกที่ 4 Training Data เป็นส่วนการนำชุดข้อมูล Spectrogram ตามค่า Brix มาเรียนรู้

บล็อกที่ 5 Model เป็นโมเดลที่ถูกสร้างด้วยอัลกอริทึม จากกระบวนการเรียนรู้ของข้อมูลและทำการปรับค่าน้ำหนัก (Weight) ให้เหมาะสมกับชุดข้อมูล Spectrogram ฟักทองในการนำไปใช้งาน

บล็อกที่ 6 Test set เป็นชุดข้อมูลเสียงฟักทองที่ใช้ในการทดสอบระบบและค่า Brix เพื่อหาประสิทธิภาพความแม่นยำในการจำแนกประเภทของฟักทอง โดยเป็นชุดข้อมูลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเรียนรู้มาก่อน

บล็อกที่ 7 Test Data เป็นส่วนการนำชุดข้อมูล Spectrogram ตามค่า Brix มาทดสอบ

บล็อกที่ 8 Prediction เป็นกระบวนการที่ได้จากการวิเคราะห์และการทำนายผลการแยกแยะโดยการตรวจจ็ับวัตถุในภาพเพื่อทำนายวัตถุที่อยู่ในกรอบ

ตารางที่ 4 แสดงผลการทำงานของโมเดล CNN เสียงฟักทอง

Layer	Output Shape	Param #	คำอธิบาย
Conv2D	(126, 126, 32)	896	เลเยอร์คอนโวลูชัน 32 ฟิลเตอร์ ขนาด 3x3 ใช้ฟังก์ชัน ReLU
MaxPooling2D	(63, 63, 32)	0	เลเยอร์ Max Pooling ลดขนาดภาพโดยใช้ฟิลเตอร์ 2x2
Conv2D	(61, 61, 64)	18,496	เลเยอร์คอนโวลูชัน 64 ฟิลเตอร์ ขนาด 3x3 ใช้ฟังก์ชัน ReLU
MaxPooling2D	(30, 30, 64)	0	เลเยอร์ Max Pooling ลดขนาดภาพโดยใช้ฟิลเตอร์ 2x2
Conv2D	(28, 28, 128)	73,856	เลเยอร์คอนโวลูชัน 128 ฟิลเตอร์ ขนาด 3x3 ใช้ฟังก์ชัน ReLU
MaxPooling2D	(14, 14, 128)	0	เลเยอร์ Max Pooling ลดขนาดภาพโดยใช้ฟิลเตอร์ 2x2
Flatten	(25088)	0	แปลงข้อมูลจาก 3D เป็น 1D
Dense	(256)	6,436,096	การเชื่อมต่อแบบ Fully Connected มี 256 หน่วย
Dense (Output)	(3)	771	เลเยอร์เอาต์พุต 3 หน่วย ใช้ฟังก์ชัน SoftMax สำหรับการจำแนกคลาส

จากตารางที่ 4 โมเดลนี้เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบ CNN ที่ประกอบด้วยเลเยอร์คอนโวลูชัน 3 ชั้น ร่วมกับ MaxPooling เพื่อลดขนาดภาพ

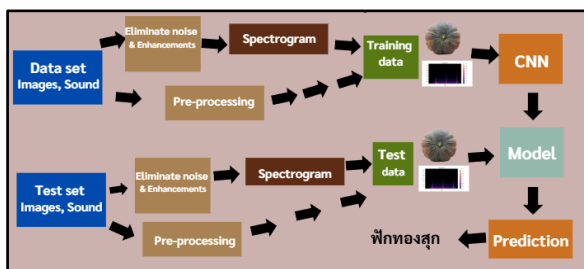
ตามด้วยเลเยอร์ Flatten สำหรับแปลงข้อมูลเป็นเวกเตอร์ 1 มิติ และเลเยอร์ Dense 2 ชั้น โดยมีหน่วย 256 หน่วยในชั้นแรก และ 3 หน่วยในชั้นเอาต์พุต

บทความวิจัย (Research Article)

ใช้ฟังก์ชัน SoftMax สำหรับการจำแนกคลาส รวมจำนวนพารามิเตอร์ประมาณ 6.5 ล้านค่า เหมาะสำหรับงานจำแนกภาพหลายคลาส

3.3.3 การทำงานของระบบการแยกระดับความสูงของฟักทองด้วยภาพและเสียงเพื่อประเมินประสิทธิภาพโมเดล

จากรูปที่ 6 บล็อกที่ 1 คือ Data Set Images, Sound เป็นส่วนของชุดข้อมูลฟักทอง ที่ได้จัดเตรียมข้อมูลเสียงและภาพฟักทอง จากการวัดค่า Brix โดยมีการเปรียบเทียบข้อมูลค่า Brix ของฟักทอง พร้อมชุดข้อมูลการเรียนรู้และข้อมูลชุดทดสอบความถูกต้องเพื่อประเมินประสิทธิภาพโมเดล



รูปที่ 6 การทำงานของระบบการแยกระดับความสูงของฟักทองด้วยภาพและเสียง

บล็อกที่ 2 คือ Eliminate Noise & Enhancements & Pre-Processing กระบวนการในการกำจัดสัญญาณรบกวน (Noise) และ ปรับปรุงคุณภาพ (Enhancements) ของข้อมูลหรือสัญญาณเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ชัดเจน

บล็อกที่ 3 คือ Spectrogram การแสดงผลสัญญาณเสียงหรือสัญญาณคลื่นในรูปแบบของภาพ

บล็อกที่ 4 Training data เป็นส่วนการนำชุดข้อมูล Spectrogram และภาพตามค่า Brix มาเรียนรู้

บล็อกที่ 5 Model เป็นโมเดลที่ถูกสร้างด้วยอัลกอริทึม จากกระบวนการเรียนรู้ของข้อมูลและทำการปรับค่าน้ำหนัก (Weight) ให้เหมาะสมกับชุดข้อมูล Spectrogram และภาพฟักทองในการนำไปใช้งาน

บล็อกที่ 6 Test set เป็นชุดข้อมูลเสียงฟักทองที่ใช้ในการทดสอบระบบและค่า Brix เพื่อหาประสิทธิภาพความแม่นยำในการจำแนกประเภทของฟักทอง โดยเป็นชุดข้อมูลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเรียนรู้มาก่อน

บล็อกที่ 7 Test Data เป็นส่วนการนำชุดข้อมูล Spectrogramและภาพตามค่า Brix มาทดสอบ

บล็อกที่ 8 Prediction เป็นกระบวนการที่ได้จากการวิเคราะห์และการทำนายผลการแยกแยะโดยการตรวจจับวัตถุในภาพเพื่อทำนายวัตถุที่อยู่ในกรอบพร้อมระบุค่าความมั่นใจ (Confidence) ด้วย

ตารางที่ 5 แสดงผลการทำงานของโมเดล CNN ภาพกับเสียงฟักทอง

Layer	Output Shape	Param #	คำอธิบาย
Conv2D (32)	(126, 126, 32)	1,792	เลเยอร์ Convolution แรกใช้ 32 ฟิลเตอร์ ขนาด 3x3, ขนาด input (128, 128, 6)
MaxPooling2D	(63, 63, 32)	0	การลดขนาดภาพ (Down Sampling) ด้วย Max Pooling ขนาด (2, 2)
Conv2D	(61, 61, 32)	9,248	เลเยอร์ Convolution ที่สอง ใช้ 32 ฟิลเตอร์ขนาด 3x3

ฐานันดร มูลสาร และคณะ, การพัฒนาระบบคัดแยกระดับความสูงของฟักทองด้วยการผสานข้อมูลภาพและเสียงโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 5 แสดงผลการทำงานของโมเดล CNN ภาพกับเสียงฟักทอง (ต่อ)

Layer	Output Shape	Param #	คำอธิบาย
MaxPooling2D	(30, 30, 32)	0	Max Pooling ขนาด (2, 2)
Conv2D	(28, 28, 64)	18,496	เลเยอร์ Convolution ที่สาม ใช้ 64 ฟิลเตอร์ขนาด 3x3
MaxPooling2D	(14, 14, 64)	0	Max Pooling ขนาด (2, 2)
Conv2D	(12, 12, 64)	36,928	เลเยอร์ Convolution ที่สี่ ใช้ 64 ฟิลเตอร์ขนาด 3x3
MaxPooling2D	(6, 6, 64)	0	Max Pooling ขนาด (2, 2)
Dropout (0.2)	(6, 6, 64)	0	ใช้ Dropout เพื่อป้องกันการ Overfitting
Conv2D	(4, 4, 128)	73,856	เลเยอร์ Convolution ที่ห้า ใช้ 128 ฟิลเตอร์ขนาด 3x3
MaxPooling2D	(2, 2, 128)	0	Max Pooling ขนาด (2, 2)
Dropout (0.2)	(2, 2, 128)	0	ใช้ Dropout เพื่อป้องกันการ Overfitting
Conv2D	(0, 0, 128)	147,584	เลเยอร์ Convolution ที่หก ใช้ 128 ฟิลเตอร์ขนาด 3x3
MaxPooling2D	(0, 0, 128)	0	Max Pooling ขนาด (2, 2)
Dropout (0.2)	(0, 0, 128)	0	ใช้ Dropout เพื่อป้องกันการ overfitting
Flatten	(0, 0)	0	แปลงข้อมูลที่มีหลายมิติให้เป็นเวกเตอร์ 1 มิติ
Dense	(256)	32,768	เลเยอร์ Dense ที่มี 256 หน่วย ใช้ฟังก์ชัน ReLU
Dense	(3)	771	เลเยอร์เอาต์พุต 3 หน่วย ใช้ฟังก์ชัน SoftMax สำหรับการจำแนกคลาส 3 คลาส

จากตารางที่ 5 งานวิจัยเลือกใช้ CNN เนื่องจากเหมาะสมกับการประมวลผลทั้ง ภาพฟักทอง และเสียงที่แปลงเป็น Spectrogram โดย CNN สามารถเรียนรู้ลักษณะสำคัญของข้อมูลได้อัตโนมัติโดยไม่ต้องกำหนดคุณลักษณะ (Feature) ล่วงหน้า โครงสร้างของโมเดลถูกออกแบบให้เหมาะกับชุดข้อมูลขนาดเล็ก ลดความซับซ้อนเพื่อป้องกัน Overfitting และสามารถประยุกต์ใช้กับข้อมูลภาพและเสียงได้อย่างมีประสิทธิภาพในการจำแนกระดับความสุกของฟักทอง

3.4 เก็บรวบรวมข้อมูล

ได้ศึกษาข้อมูลฟักทองอำพัน 342 ที่ตำบลนากระแซง อำเภอดงเจริญ จังหวัดอุบลราชธานี จำนวน 30 ลูก โดยถ่ายฟักทองมูมด้านบน หมุนภาพของฟักทองครั้งละ 20 องศา พร้อมด้วยการบันทึกเสียงฟักทองโดยใช้ตะเกียบเหล็กปลายมากระแทกผลฟักทองด้านบน การถ่ายภาพและบันทึกเสียงฟักทองตามค่า Brix ผลลัพธ์ค่า Brix ของฟักทอง ผู้วิจัยได้นำฟักทองไปตรวจหาค่า Brix ที่ห้องปฏิบัติการกลาง คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ในการตรวจค่า Brix ของฟักทอง 1 ลูกจะตรวจหา ค่า Brix อยู่ 3 ครั้ง โดยการนำเนื้อฟักทองมาบดให้ละเอียด

บทความวิจัย (Research Article)

แล้วใส่บีกเกอร์ให้มีปริมาตรเท่ากัน คั้นน้ำของฟักทอง แล้วมาตรวจด้วย Brix Refractometer 0-32% Brix รุ่น RHB-32ATC S ก็จะได้อ่านค่า Brix ของ ฟักทอง ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ตัวอย่างค่า Brix ของฟักทองที่ใช้การเทรน

ตัวอย่างที่	ชื่ออย่าง	ค่า Brix	ภาพฟักทอง
1	T1/1	10.0	
	T1/2	10.4	
	T1/3	11.0	
	เฉลี่ย	10.4666	
2	T2/1	7.0	
	T2/2	7.2	
	T2/3	7.4	
	เฉลี่ย	7.2000	
3	T3/1	17.0	
	T3/2	17.0	
	T3/3	16.8	
	เฉลี่ย	16.9333	

จากตารางที่ 6 แสดงให้เห็นค่า Brix ของฟักทอง นำรูปฟักทองมาเทรนข้อมูล โดยแบ่งการเทรนข้อมูลตามค่า Brix ของฟักทอง ภาพที่ 1 แสดงฟักทองสุก ภาพที่ 2 แสดงฟักทองดิบและภาพที่ 3 แสดงฟักทองสุกเกินไป

3.5 เครื่องมือการวิจัย

1) Brix Refractometer 0-32% Brix รุ่น RHB - 32ATC S เครื่องวัดความหวานของผลไม้

2) ชุดอุปกรณ์และเครื่องมือ ซึ่งประกอบด้วยฐานรองรับซึ่งเป็นแท่นโต๊ะแม่เหล็กที่มีส่วนต่าง ๆ

ประกอบด้วยแกนหลัก ที่ยึดจับโทรศัพท์มือถือและอุปกรณ์ปรับความละเอียดของระยะที่ต้องการทดลอง ตะเกียบเหล็กที่ใช้ในการทดลอง

3) นำฟักทองแต่ละคลาสไปตรวจความหวาน ในห้องปฏิบัติการกลาง คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี เพื่อตรวจสอบความ หวานของฟักทองแต่ละลูก โดยฟักทอง 1 ลูก จะทำการตรวจทั้งหมด 3 ครั้ง ผลที่ได้จะมีค่าเป็น Brix



รูปที่ 7 การตรวจความหวานจากห้องปฏิบัติการกลาง คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

จากรูปที่ 7 แสดงการตรวจความหวานจากห้องปฏิบัติการกลาง คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

3.6. กลุ่มตัวอย่าง

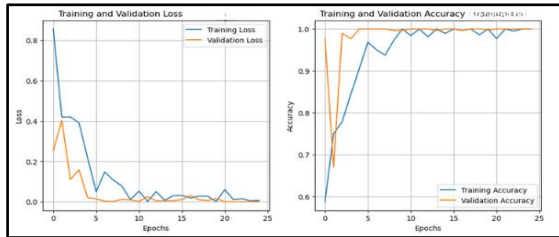
กลุ่มตัวอย่าง คือ ฟักทองอำพัน 342 จำนวน 30 ลูก โดยแบ่งฟักทองออกเป็น 3 คลาส ตามค่า Brix ได้แก่ฟักทองดิบ ฟักทองสุก และฟักทองสุกเกินไป

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการเทรนข้อมูลภาพฟักทอง

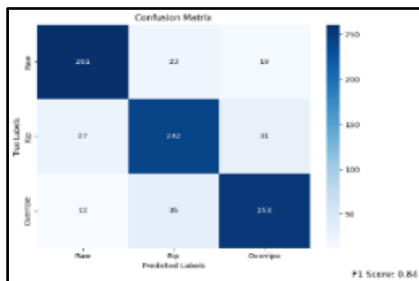
ข้อมูลฟักทองประกอบด้วยชุดข้อมูลการฝึกชุดข้อมูลทดสอบเข้าสู่ระบบการฝึกฝน ทั้งหมดครบ 25 รอบเต็ม เพื่อปรับปรุงค่าเวท (Weights) และอคติ (Biases) ของโมเดลในแต่ละรอบตามค่าความสูญเสีย (Loss) ที่คำนวณได้ ดังรูปที่ 8

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 8 กราฟแสดงการเทรนข้อมูลภาพฟักทอง

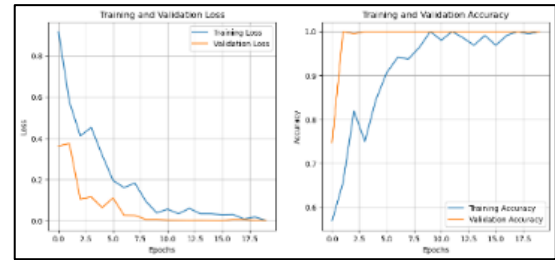
กราฟแสดงค่าความแม่นยำของโมเดลชุดฝึกและชุดทดสอบความถูกต้องของฟักทอง ในจำนวน 25 รอบแสดงค่าว่าโมเดลมีค่าความถูกต้อง ในการเทรนและทดสอบอยู่ที่ 100.00 เปอร์เซนต์ ตั้งแต่รอบที่ 4 เป็นต้นไป ประสิทธิภาพโมเดลของภาพฟักทอง ค่า F1 Score มีค่าเป็น 0.84 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการวัด แสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 Confusion Matrix ภาพฟักทอง

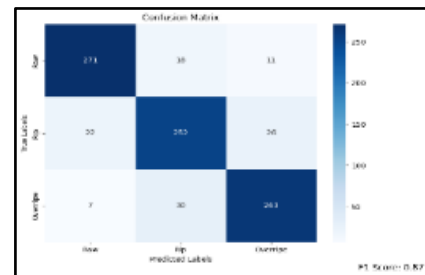
4.2 ผลการเทรนข้อมูลเสียงฟักทอง

ในรูปที่ 10 ค่า Loss ของข้อมูล Spectrogram ฟักทองและข้อมูล Validation Loss ข้อมูลจำนวน 20 รอบ ค่า Loss ของทั้ง Training และ Validation ลดลงเรื่อย ๆ เมื่อ Epochs เพิ่มขึ้น Training Loss และ Validation Loss ใกล้เคียงกันมากในช่วงหลัง แสดงว่าไม่มี Overfitting



รูปที่ 10 กราฟแสดงการเทรนข้อมูลเสียงฟักทอง

กราฟแสดงค่าความแม่นยำของโมเดลชุดฝึกและชุดทดสอบความถูกต้องของเสียงฟักทอง ใน จำนวน 20 รอบ แสดงค่าว่าโมเดลมีค่าความถูกต้องตั้งแต่รอบที่ 1 และการเทรนอยู่ที่ 100.00 เปอร์เซนต์ ในรอบที่ 8 แล้วก็ผันผวนขึ้นลง ประสิทธิภาพโมเดลของภาพฟักทอง ค่า F1 Score มีค่าเป็น 0.87 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการวัด แสดงได้ดังรูปที่ 11

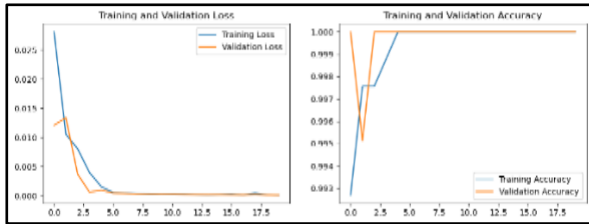


รูปที่ 11 Confusion Matrix เสียงฟักทอง

4.3 ผลการเทรนข้อมูลภาพและ Spectrogram

จากรูปที่ 12 แสดงค่า Loss ของข้อมูลชุดเทรนภาพและ Spectrogram ฟักทองและข้อมูลการตรวจสอบความถูกต้องของการเทรนข้อมูลจำนวน 20 รอบ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลการเทรนและข้อมูลการตรวจสอบความถูกต้องมีค่าใกล้เคียง 0 ตั้งแต่รอบที่ 5

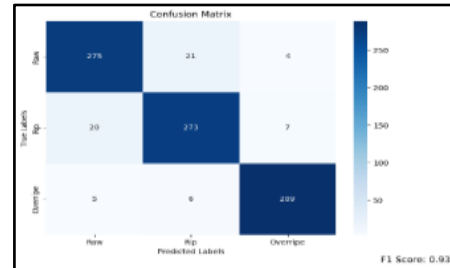
บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 12 กราฟแสดงการเทรนข้อมูลภาพกับเสียง
ฟัททอง

กราฟแสดงค่าความแม่นยำของโมเดลชุดฝึกและชุดทดสอบความถูกต้องของภาพและ Spectrogram ฟัททอง จำนวน 20 รอบ แสดงค่าว่าโมเดลมีความถูกต้องตั้งแต่รอบที่ 2 และการเทรนอยู่ที่ 100.00 เปอร์เซนต์ ในรอบที่ 5

ประสิทธิภาพโมเดลของภาพฟัททอง ค่า F1 Score มีค่าเป็น 0.93 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพของโมเดลในการจำแนกข้อมูล (Classification Model) แสดงได้ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 Confusion Matrix ภาพและ
Spectrogram ฟัททอง

ตารางที่ 7 สรุป Precision, Recall และ F1-Score ของโมเดลจำแนกระดับความสูงของฟัททอง

ข้อมูลที่ใช้	ระดับความสูง	Precision	Recall	F1-score	เฉลี่ยรวม
ภาพ (Image)	ดิบ	0.85	0.82	0.83	
	สูง	0.83	0.84	0.84	
	สูงเกินไป	0.80	0.85	0.82	
	เฉลี่ยรวม	0.83	0.84	0.84	✓
เสียง (Audio)	ดิบ	0.88	0.85	0.86	
	สูง	0.86	0.87	0.87	
	สูงเกินไป	0.85	0.88	0.86	
	เฉลี่ยรวม	0.86	0.87	0.87	✓
ภาพ + Spectrogram	ดิบ	0.94	0.91	0.92	
	สูง	0.93	0.94	0.94	
	สูงเกินไป	0.92	0.93	0.93	
	เฉลี่ยรวม	0.93	0.93	0.93	✓

บทความวิจัย (Research Article)

จากตารางที่ 7 การใช้ข้อมูลหลายมิติ (ภาพร่วมกับเสียง) ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการจำแนกระดับความสุกของฟักทองได้ดีที่สุด

5. อภิปรายผล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโมเดลที่ผสานข้อมูลภาพและเสียงของฟักทองสามารถจำแนกระดับความสุกได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่าความถูกต้องเฉลี่ย 93.00 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าโมเดลที่ใช้ข้อมูลภาพอย่างเดียว (84.00 เปอร์เซ็นต์) และเสียงอย่างเดียว (87.00 เปอร์เซ็นต์) สะท้อนให้เห็นว่าเทคนิคการเรียนรู้แบบหลายมิติ (Multimodal Learning) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของโมเดลได้อย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุที่โมเดลผสานข้อมูลให้ผลลัพธ์ดีกว่า มาจากการที่ข้อมูลภาพให้รายละเอียดภายนอก เช่น สีและพื้นผิว ในขณะที่ข้อมูลเสียงสะท้อนคุณสมบัติภายใน เช่น ความแน่นและความกลวงของเนื้อฟักทอง การรวมข้อมูลจากทั้งสองแหล่งจึงช่วยให้โมเดลเข้าใจลักษณะของฟักทองในมิติต่าง ๆ ได้ครอบคลุมยิ่งขึ้น แนวคิดนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของเวียงชัย คาระมาตย์ [12] ที่ใช้เสียงเคาะในการจำแนกระดับความสุกของทุเรียน โดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดเชิงเทคนิคหลายประการ ได้แก่ ความหลากหลายของข้อมูลที่ยังจำกัดอยู่ในฟักทองพันธุ์อำพัน 342 เพียงชนิดเดียว ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการนำโมเดลไปใช้งานกับฟักทองสายพันธุ์อื่นที่มีค่า Brix แตกต่างกัน รวมถึงความเสี่ยงของปัญหา Overfitting จากจำนวนข้อมูลฝึกที่ยังน้อยเมื่อเทียบกับขนาดของโมเดล นอกจากนี้ การเก็บข้อมูลเสียงในภาคสนามอาจมีปัญหาเรื่องเสียงรบกวนหรือความไม่สม่ำเสมอของวิธีการเคาะ จึงควรมีการพัฒนาเครื่องมือเก็บเสียงที่มีมาตรฐานมากขึ้น

6. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางการจำแนกระดับความสุกของฟักทองโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง พบว่าโมเดลที่ใช้การผสานข้อมูลภาพและเสียงให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยมีค่าความถูกต้องเฉลี่ย 93.00 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าโมเดลที่ใช้ข้อมูลภาพหรือเสียงเพียงอย่างเดียวอย่างชัดเจน ผลการวิจัยชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ โดยเฉพาะโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) ในการวิเคราะห์ลักษณะของผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้แนวทางดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคัดเกรดผลผลิตฟักทองในภาคสนาม หรือพัฒนาเป็นอุปกรณ์ช่วยตรวจสอบความสุกที่สะดวกรวดเร็ว ลดภาระแรงงาน และเพิ่มคุณภาพการผลิต ในอนาคต ควรมีการขยายการทดลองให้ครอบคลุมฟักทองหลายสายพันธุ์ และพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับการตรวจสอบความสุกที่สามารถนำไปใช้จริงในภาคเกษตรกรรมได้อย่างยั่งยืน

7. ข้อเสนอแนะ

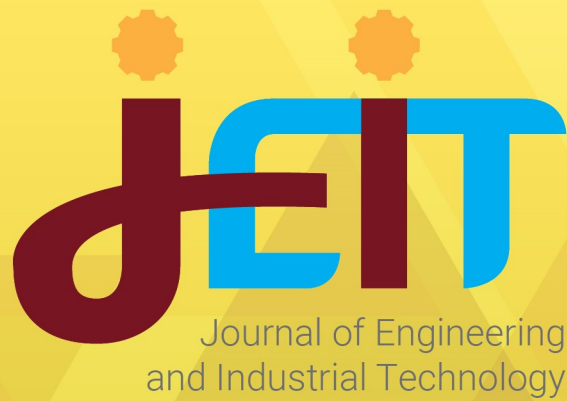
งานวิจัยนี้ยังพบข้อจำกัด ได้แก่ การเพิ่มจำนวนของข้อมูลในการเทรนข้อมูล การหาภาพที่มีความแตกต่างกันและการหาค่า Brix ให้มากกว่านี้ จะใช้เวลาและค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามคณะผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลอื่น ๆ เพิ่มเติมเพื่อช่วยในการจำแนกระดับความสุกของฟักทองร่วมด้วย เช่น น้ำหนัก ขนาด ความแข็งแรงของฟักทอง เป็นต้น

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] ระบบสารสนเทศการผลิตทางด้านเกษตร (รต.) กรมส่งเสริมการเกษตร, "รายงานสถานการณ์การปลูกฟักทอง ปี 2562," [ออนไลน์].

บทความวิจัย (Research Article)

- Available: <https://production.doae.go.th>.
[เข้าถึงเมื่อ: 16 ก.ค. 2568].
- [2] A. Amna, M. W. Akram, G. Li, M. Z. Akram, M. Faheem, M. M. Omar, and M. G. Hassan, "Machine vision-based automatic fruit quality detection and grading," *Front. Agr. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 2, pp. 274–287, 2025, doi: 10.15302/J-FASE-2023532.
- [3] เอกรัตน์ สุขสุคนธ์, ชลทิศ สันติวงศ์งาม, วัชรพล คำแขก, และ ศศิชา ปานสุวรรณ, "การวิเคราะห์การสุกของผลไม้ด้วยเทคโนโลยีการประมวลผล," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 1, หน้า 61-66, 2565.
- [4] ศุภกร ชูประภาวรรณ, "การลดเสียงรบกวนของภาพสำหรับเสียงรบกวนแบบเกาส์เซียนโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึกและพีเออร์ชอบ," *วิทยานิพนธ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2561. [ออนไลน์]. Available: Chula ETD, No. 3276.
- [5] บงการ หอมนาน และวาทีต เบญจพลกุล, "การจำแนกภาพแบบฟังก์ชันเชิงเส้นการปรับเทียบฮิสโตแกรมผูกพันบนพื้นฐานทฤษฎีสารสนเทศและขั้นตอนวิธีการจัดกลุ่มค่าเฉลี่ยกลุ่มแบบฟัซซีในการส่งสารสนเทศ," *วารสารสุทธิปริทัศน์*, ปีที่ 27, ฉบับที่ 4, หน้า 105-115, ต.ค. 2566 – ม.ค. 2567.
- [6] "File:Spectrogram," Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0. [ออนไลน์]. Available: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=202335>. [Accessed: 12 Mar. 2024].
- [7] J. A. Benitez-Andrades, "How to cite electronic documents," 2020. [ออนไลน์]. Available: https://miro.medium.com/v2/resize:fit:720/format:webp/1*7kRxfXK4J-wCR2l8G1Jtuw.png. [Accessed: Feb. 2020].
- [8] จานุลักษณ์ ขนบดี, สุภาวดี ตั้งธีระวัฒน์, และ ศิริพร มุลาลินน์, "เรื่องสายพันธุ์ฟักทองคุณภาพสูง," ใน *เอกสารประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41: สาขาพืชสาขาส่งเสริมและนิเทศศาสตร์เกษตร*, กรุงเทพฯ, 2546, หน้า 64-69.
- [9] N. A. Ayunda, E. Haryatmi, and T. A. Riyadi, "Classification of Tomato Ripeness Based on Convolutional Neural Network Methods," *J. Inf. Syst. Informatics*, vol. 5, no. 4, 2023, doi: 10.51519/journalisi.v5i4.613.
- [10] K.-E. Ko, S.-H. Yang, and I.-H. Jang, "Real-Time Tomato Ripeness Classification System based on Deep Learning Model for Object Detection," *J. Inst. Control, Robot. Syst.*, vol. 24, no. 11, pp. 999–1004, Nov. 2018, doi: 10.5302/J.ICROS.2018.18.0166.
- [11] มัณฑิณี ถิ่นรัมย์ และ เยวรัตน์ จำปา, "การคัดแยกระดับความสุกของทุเรียนด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง," *วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, ปีที่ 26, ฉบับที่ 4, หน้า 105-115, 2564.
- [12] เวียงชัย คาระมาตย์, "การพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับการจำแนกความสุกของทุเรียนจากเสียงเคาะโดยใช้เครือข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน," *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*, No. 9605, 2563.



วารสารวิศวกรรม และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology,
Kalasin University

กองบรรณาธิการวารสาร

"วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์"

"Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University"

คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

62/1 ถนนเกษตรสมบูรณ์ ต.กาฬสินธุ์ อ.เมือง จ.กาฬสินธุ์ 46000

โทร: 088-574-2199 Email: jeit@ksu.ac.th