



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบ D-optimal เพื่อหาค่าพารามิเตอร์การอัดขึ้นรูปภาชนะถ้วยจากใบตอง

Application of the D-optimal design of experimental for determining parameters in compression molding of banana leaf cup containers

กนกกาญจน์ จิรศิริเลิศ^{1*} พีรวัตร ลือสัก² วรพจน์ ศิริรักษ์² สมภาพ เจียรณัย³

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ จังหวัดศรีสะเกษ 33000

² สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย จังหวัดเชียงราย 57120

³ ห้องปฏิบัติการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยปัญญาประดิษฐ์ SMART สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Ganokgarn Jirasirilerd^{1*} Peerawat Luesak² Worapot Sirirak² Somphop Chiaranai³

¹ Department of Industrial and Environmental Management Engineering, Faculty of Liberal Arts and Sciences, Sisaket Rajabhat University, Sisaket, 33000

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Chiang Rai, Chiang Rai, 57120

³ Artificial Intelligence Optimization SMART Laboratory, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, 34190

* Corresponding author.

E-mail: ganokgarn.j@sskru.ac.th; Telephone: 081 389 2440

วันที่รับบทความ 19 พฤษภาคม 2568; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 29 มิถุนายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ 2 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูปภาชนะถ้วยจากใบตองด้วยกระบวนการขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) โดยพิจารณาเงื่อนไขคือ 1) จำนวนชั้นของใบตอง 2) อุณหภูมิการอัดขึ้นรูป และ 3) ระยะเวลาการอัดขึ้นรูป ต่อคุณสมบัติเชิงกลและการดูดซึมน้ำของภาชนะถ้วยจากใบตอง โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบ D-optimal เพื่อลดจำนวนการทดลองและเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ ผลจากการศึกษาพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ 1) จำนวนชั้นของใบตองจำนวน 4 ชั้น 2) อุณหภูมิการอัดขึ้นรูป 140 องศาเซลเซียส และ 3) ระยะเวลาการอัดขึ้นรูป 2 นาที ซึ่งให้ค่าแรงกดเฉลี่ย 9.12 กิโลนิวตัน และค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ย 15.02 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับภาชนะเยื่อกระดาษสำเร็จรูปที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ พบว่าภาชนะเยื่อกระดาษมีค่าแรงกดเฉลี่ย 13.61 กิโลนิวตัน และค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ย 16.63 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วย Two-Sample T-Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความแข็งแรงต่อแรงกดและค่าการดูดซึมน้ำของภาชนะใบตองและเยื่อกระดาษมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แม้ภาชนะใบตองจะมีความแข็งแรงน้อยกว่า แต่ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ISO 3037:2022 (ค่าความแข็งแรง > 8 กิโลนิวตัน) และมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่ามาตรฐาน ISO 535:2014 (ไม่เกิน 17 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งยืนยันถึงความเหมาะสมต่อการใช้งานจริง อีกทั้งยังมีข้อได้เปรียบด้านความเป็นวัสดุชีวภาพที่ย่อยสลายได้ง่าย จึงมีศักยภาพสำหรับพัฒนาภาชนะบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ

การออกแบบการทดลอง พารามิเตอร์ การอัดขึ้นรูป ใบตอง แรกกด การดูดซึมน้ำ

Abstract

This research aims the optimal forming parameters for producing cup-shaped containers from banana leaves using the thermoforming process. The study focuses on three main conditions: the number of banana leaf layers, forming temperature, and forming time. A D-optimal experimental design was applied to reduce the number of experimental runs while ensuring analytical reliability. The effects of these parameters on the mechanical strength and water absorption of the containers were analyzed. The experimental results indicate that the optimal forming parameters comprises four layers of banana leaves, a forming temperature of 140 °C, and a forming time of 2 minutes. Under this setting, the containers achieved an average compression strength of 9.12 kN and a water absorption rate of 15.02%. Compared with commercial molded pulp containers, which showed an average strength of 13.61 kN and water absorption of 16.63%, the banana leaf containers exhibited statistically significant differences as confirmed by a two-sample t-test at the 95% confidence level. Although the banana leaf containers showed lower compression strength, the values remained within the requirements of ISO 3037:2022 (minimum 8 kN), and their water absorption met the criteria of ISO 535:2014 (not exceeding 17%). These findings support the suitability of banana leaf containers for practical applications and highlight their potential as biodegradable and environmentally sustainable packaging alternatives.

Keywords

design of experiment; parameters; compression; banana leaf; pressure; water absorption

1. คำนำ

ในปัจจุบัน ความตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการใช้พลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพกำลังเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปัญหานี้เกิดจากหลายปัจจัย ทั้งจำนวนประชากรที่ขยายตัวอย่างรวดเร็ว วิถีชีวิตที่เร่งรีบ ความต้องการความสะดวกสบาย และการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยี ทำให้ความต้องการใช้บรรจุภัณฑ์เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ปริมาณขยะโดยเฉพาะพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาลและก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิต [1] ปัจจุบันอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหารมีการใช้พลาสติกสูงถึงประมาณร้อยละ 40 ของปริมาณการผลิตพลาสติกทั่วโลก สร้างขยะพลาสติกไม่ต่ำกว่า 150 ล้านตันต่อปี [2] ด้วยเหตุนี้วัสดุทดแทนจากธรรมชาติและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจึงกลายเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจและมีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่อง โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาภาชนะบรรจุอาหารหรือภาชนะใช้ครั้งเดียวที่สามารถทดแทนการใช้พลาสติกหรือโฟมได้อย่างมีประสิทธิภาพ หนึ่งในวัสดุที่มีศักยภาพสูงด้านความยั่งยืนและสามารถย่อยสลายได้ภายในระยะเวลาประมาณ 4 สัปดาห์ คือ ใบตอง [3] ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความยืดหยุ่น เส้นใยแข็งแรง ทนความร้อน และเมื่อเพิ่มจำนวนชั้น

ของใบตองจะสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้ เป็นต้น [4] โดยที่ผ่านมาใบตองถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวิถีชีวิตพื้นบ้านสำหรับห่อหรือรองอาหาร แต่ยังไม่มีการพัฒนาในระดับกระบวนการผลิตเชิงวิศวกรรมอย่างชัดเจน

เทคนิคการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) จึงกลายเป็นแนวทางหนึ่งที่มีศักยภาพในการยกระดับวัสดุธรรมชาติ เช่น ใบตองให้กลายเป็นภาชนะที่มีรูปทรงเฉพาะ มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการของการใช้งานอย่างเหมาะสม โดยเทคนิคนี้ได้รับการนำมาใช้กับวัสดุชีวภาพหลายประเภท เช่น เยื่อกระดาษ หรือไฟเบอร์จากพืช ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการได้ เช่น อุณหภูมิ ระยะเวลา และแรงกด เพื่อควบคุมคุณสมบัติเชิงกลและความสามารถในการดูดซึมน้ำของผลิตภัณฑ์ หรือภาชนะได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีนักวิจัยที่สนใจศึกษาและพัฒนา งานวิจัยดังนี้ Luthfi et al. [5] ได้ศึกษาและทดลองค่าอุณหภูมิและระยะเวลาการอัดขึ้นรูป เพื่อศึกษาผลต่อความแข็งแรงของบรรจุภัณฑ์และศึกษาทดลองใช้เยื่อของอ้อยในการขึ้นรูปภาชนะ พบว่าจำนวนชั้นของวัสดุและแรงกดมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติทางกลของภาชนะ ในขณะที่ Adekunle et al. [6] ได้ศึกษาวัสดุคอมโพสิตชีวภาพโดยใช้เทคนิคการอัด

ขึ้นรูป จากนั้นใช้เรซินเทอร์โมเซตที่พัฒนาจากน้ำมันถั่วเหลือง และเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ จากผลการศึกษาพบว่าคอมโพสิตจากเรซินน้ำมันถั่วเหลือง และเส้นใยธรรมชาติสามารถให้สมบัติเชิงกลที่ดี เหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ “ไบตอง” เป็นวัสดุหลักในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดความร้อนยังมีอยู่อย่างจำกัด และยังขาดการศึกษาที่เป็นระบบเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ซึ่งถือเป็นช่องว่างทางวิชาการที่มีศักยภาพในการพัฒนาอย่างยั่งยืน

ด้วยเหตุนี้บทความวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูปด้วยภาชนะจากไบตอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตภาชนะด้วยด้วยความร้อนจากไบตอง เพื่อให้ได้ภาชนะที่มีสมบัติเชิงกลและการดูดซึมน้ำในระดับที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานจริง โดยอ้างอิงค่าความแข็งแรงต่อแรงกดของภาชนะที่ผลิตจากเยื่อกระดาษตามมาตรฐาน ISO 3037:2022 ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงกดเฉลี่ยมากกว่า 8 กิโลนิวตัน ขึ้นไป และอัตราการดูดซึมน้ำที่ไม่เกิน 17 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐาน ISO 535:2014 เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบว่าผลิตภัณฑ์จากไบตองอยู่ในช่วงที่สามารถใช้งานได้จริง โดยมีการพิจารณาเงื่อนไข คือ จำนวนชั้นของไบตอง อุณหภูมิสำหรับการขึ้นรูป และระยะเวลาการอัดขึ้นรูป เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด โดยมีการทดสอบแรงกดและการดูดซึมน้ำของภาชนะที่ได้ เพื่อประเมินคุณภาพและความเหมาะสมในเชิงวิศวกรรม ตลอดจนเพื่อศึกษาศักยภาพในการพัฒนาต่อยอดสู่การใช้งานในเชิงพาณิชย์ [7] นอกจากนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ้วยภาชนะที่ผลิตจากไบตองภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมกับถ้วยภาชนะเยื่อกระดาษสำเร็จรูปที่มีวางจำหน่ายทั่วไป เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการแข่งขันของวัสดุธรรมชาติชนิดนี้ในตลาดจริง โดยการใช้การวิเคราะห์ทางสถิติในระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการเปรียบเทียบดังกล่าวสามารถช่วยให้ประเมินได้ว่าวัสดุธรรมชาติจากไบตอง สามารถเป็นวัสดุทางเลือกที่มีศักยภาพได้

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทความวิจัยนี้ได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องประเด็นต่าง ๆ ดังนี้

2.1 ภาชนะวัสดุธรรมชาติ (Green Packaging)

ภาชนะวัสดุธรรมชาติหรือบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green Packaging) ได้รับความสำคัญมากขึ้นเนื่องจากความตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากบรรจุภัณฑ์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ เช่น พลาสติกและโฟม ซึ่งต้องใช้เวลามากในการสลายตัว ทำให้เกิดขยะสะสมและมลภาวะในระยะยาว [1] อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์จึงให้ความสำคัญกับการเลือกใช้วัสดุจากธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายหรือหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ไบตอง ชานอ้อย เยื่อไม้ ข้าวโพด มันสำปะหลัง และแป้งพืชต่าง ๆ [2, 3] วัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติเด่นด้านความปลอดภัยต่อผู้บริโภค ปราศจากสารพิษตกค้าง และไม่ก่อให้เกิดสารมลพิษที่เป็นอันตราย อีกทั้งยังสามารถนำไปฝังกลบหรือเข้าสู่ระบบเศรษฐกิจหมุนเวียนได้อย่างรวดเร็ว การศึกษาของ Begum et al. [8] ยังพบว่าคุณสมบัติการดูดซึมน้ำของเส้นใยธรรมชาติซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลสและลิกนินนั้นมีผลโดยตรงต่อความแข็งแรงและความทนทานของวัสดุ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่ใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลัก

2.2 การอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming)

การอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) เป็นกระบวนการแปรรูปวัสดุที่ใช้ความร้อนทำให้วัสดุอ่อนตัว ก่อนจะขึ้นรูปด้วยแรงกดหรือระบบสูญญากาศเพื่อให้ได้รูปทรงตามแม่พิมพ์ที่กำหนด เมื่อวัสดุเย็นตัวลงจะคงรูปตามแม่พิมพ์และอาจมีการตัดแต่งเพื่อปรับปรุงลักษณะ กระบวนการนี้ได้รับความนิยมเพราะมีต้นทุนเครื่องจักรต่ำ ปรับเปลี่ยนแม่พิมพ์ได้สะดวก และเหมาะกับการผลิตจำนวนน้อยหรือการออกแบบที่ต้องการความยืดหยุ่น [9] ในเชิงวิศวกรรม ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลา และแรงกด ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความแข็งแรง ความคงตัว และความเรียบเนียนของพื้นผิว [6, 7]

การประยุกต์ใช้ Thermoforming กับวัสดุชีวภาพ เช่น เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมด้วยผงเปลือกไข่ แสดงให้เห็นถึง

ศักยภาพในการสร้างบรรจุภัณฑ์ที่มีทั้งความแข็งแรงและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ [10] งานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุจากกากอ้อย (Bagasse) พบว่าการควบคุมอุณหภูมิการทำให้แห้งและแรงกดมีผลสำคัญต่อความหนาแน่นและความทนทานของชิ้นงาน [5] แนวทางนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาวัสดุจากเส้นใยธรรมชาติและเรซินจากพืช ซึ่งพบว่าการอัดขึ้นรูปสามารถปรับปรุงสมบัติทางกลและความเสถียรของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ [6] การพัฒนาวัสดุจากพืช เช่น ข้าวสาลีและเยื่อไม้ ก็ยังแสดงศักยภาพของการใช้ Thermoforming เพื่อผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีคุณภาพสม่ำเสมอ [7]

2.3 การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ถือเป็นคุณสมบัติหลักที่กำหนดความทนทานและความเหมาะสมของวัสดุสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้น โดยเฉพาะในวัสดุเส้นใยธรรมชาติซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลน้ำ ทำให้เส้นใยเหล่านี้มีแนวโน้มดูดซึมน้ำได้มาก [8] การปรับสภาพเส้นใยด้วยสารละลายต่าง เช่น NaOH มีผลทำให้สารไขมันและแร่ธาตุที่เคลือบผิวถูกกำจัด ส่งผลให้โครงสร้างของเส้นใยเปิดมากขึ้นและเพิ่มความสามารถในการดูดซึมน้ำ อย่างไรก็ตาม การดูดซึมน้ำในปริมาณสูงเกินไปอาจก่อให้เกิดการบวม เสียรูป และสูญเสียความแข็งแรงเชิงกล

งานวิจัยด้านบรรจุภัณฑ์ชีวภาพ เช่น การศึกษาสมบัติของไบโตนึงที่ผ่านกระบวนการทางกลและความร้อน ได้ยืนยันว่าการดูดซึมน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติความแข็งแรงของวัสดุ และสามารถปรับปรุงได้ด้วยกระบวนการทางเคมีและการอบแห้งที่เหมาะสม [2] ในทำนองเดียวกันการศึกษาของ Yuvaraj and Ramesh [11] เกี่ยวกับคอมโพสิตที่เสริมเส้นใยข้าวโพดและหมากได้รายงานว่า การปรับผิวเส้นใยด้วยซิลเลนช่วยลดความชื้นที่ซึมเข้าสู่เนื้อวัสดุและส่งผลให้มีสมบัติไฮโดรโฟบิกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การศึกษาเกี่ยวกับวัสดุเส้นใยจากขานอ้อยยังแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการอบแห้งและกระบวนการขึ้นรูปมีผลอย่างชัดเจนต่ออัตราการดูดซึมน้ำและความแข็งแรงเชิงกลของผลิตภัณฑ์ [5]

การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำมักคำนวณตามสมการที่ (1) มาตรฐานดังนี้

$$\text{Water Absorption (\%)} = \frac{\text{Weight after immersion} - \text{Weight before immersion}}{\text{Weight before immersion}} \times 100 \quad (1)$$

สมการที่ (1) นี้เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับในงานวิจัยวัสดุเส้นใยธรรมชาติและวัสดุชีวภาพหลายประเภท [2, 8, 11]

2.4 การออกแบบการทดลองแบบ D-optimal

ในการศึกษานี้การเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบ D-optimal ช่วยสร้างตารางการทดลองที่มีความแม่นยำและครอบคลุมปัจจัยสำคัญอย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยหลักการเพิ่มค่า Determinant ของ Fisher Information Matrix ทำให้ได้ชุดค่าพารามิเตอร์ที่ให้ข้อมูลสูงสุดต่อโครงสร้างโมเดล ส่งผลให้สามารถลดจำนวนการทดลองได้โดยไม่ลดทอนความแม่นยำในการประมาณสมการตอบสนอง วิธีนี้เหมาะสมอย่างยิ่งเมื่อมีหลายปัจจัยและหลายระดับ เช่น อุณหภูมิ ระยะเวลา และจำนวนชั้นของไบโตนึง [12] นอกจากนี้ Luesak et al. [13] ยังได้ประยุกต์ใช้การออกแบบแบบ D-optimal ร่วมกับ Modified Differential Evolution (MoDE) เพื่อสร้างโมเดลทางสถิติที่มีตัวแปรหลายมิติ ซึ่งช่วยลดจำนวนตัวอย่างทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพพร้อมทั้งคงความแม่นยำสูง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังได้เสนอการพัฒนาอัลกอริทึมใหม่สำหรับค้นหา D-optimal Designs ในหลายบริบท เช่น ForLion Algorithm ที่สามารถรองรับทั้งปัจจัยเชิงต่อเนื่องและเชิงจัดกลุ่มใน Generalized Linear Models โดยสามารถลดจำนวนชุดการทดลองลงได้ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ขณะเดียวกันยังรักษาประสิทธิภาพในการคาดการณ์ [14] อีกทั้งยังมีการพัฒนา Bayesian D-optimal design สำหรับระบบที่มีตัวแปรตอบสนองเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ โดยอาศัย Prior Distribution เพื่อสร้าง Global Designs ร่วมกับ Point-Exchange Algorithm ทำให้ได้ชุดการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงและประหยัดทรัพยากรมากขึ้น [15]

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 จำนวนการทดลองที่ใช้ในงานวิจัย

จำนวนการทดลอง (n) ที่ใช้สำหรับศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูปภาชนะถ้วยจากใบตอง โดยพิจารณาเงื่อนไข คือ 1) จำนวนชั้นของใบตอง 2) อุณหภูมิการอัดขึ้นรูป และ 3) ระยะเวลาการอัดขึ้นรูป

3.2 การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล

การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล โดยเริ่มจากขั้นตอนการเตรียมใบตอง โดยใช้ใบตองขนาดความยาว 200 มิลลิเมตรสำหรับอัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดแม่พิมพ์ขึ้นรูปขนาด 2 ตัน โดยใช้พลังงานความร้อนจากขดลวดไฟฟ้า (Heater) โดยวางใบตองซ้อนกันในลักษณะดังภาพที่ 1 จากนั้นใช้กาวแปะเปียกเป็นวัสดุประสานระหว่างชั้นของใบตองแต่ละชั้นเพื่ออัดขึ้นรูปเป็นภาชนะถ้วยดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 เครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะถ้วยที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 2 ลักษณะใบตองขึ้นรูปภาชนะถ้วยได้อย่างสมบูรณ์

3.3 การทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

การทดสอบกระบวนการอัดขึ้นรูปภาชนะถ้วยจากใบตองดำเนินการภายใต้ปัจจัยเงื่อนไขสำคัญ 3 ประการ คือ 1)

จำนวนชั้นของใบตอง 2) อุณหภูมิการอัดขึ้นรูป และ 3) ระยะเวลาการอัดขึ้นรูป โดยผู้วิจัยเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบ D-optimal เนื่องจากมีข้อได้เปรียบด้านการลดจำนวนการทดลอง เมื่อเทียบกับการออกแบบ Full Factorial ซึ่งต้องใช้การทดลอง 27 ชุด (3^3) และแบบ Central Composite Design (CCD) ที่มักต้องใช้การทดลองเพิ่มเติมเพื่อให้ได้จุดศูนย์กลางและจุดตามแนวแกน ในขณะที่ D-optimal สามารถเลือกชุดการทดลองเพียง 22 ชุด โดยยังคงความแม่นยำของการประมาณค่าพารามิเตอร์และการสร้างโมเดลได้อย่างมีประสิทธิภาพ [12, 13]

การเลือกใช้ D-optimal ยังได้รับการสนับสนุนจากงานของ Luesak et al. [13] ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าการออกแบบแบบนี้เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการทดลองที่มีข้อจำกัดทางทรัพยากรเครื่องมือ หรือเวลา โดย D-optimal เน้นเพิ่มค่า Determinant ของ Fisher Information Matrix ส่งผลให้โมเดลที่ได้มีประสิทธิภาพสูงในการคาดการณ์และการวิเคราะห์ค่าทางสถิติ จึงมีความน่าเชื่อถือใกล้เคียงกับการออกแบบแบบเต็มแฟกทอเรียล (Full Factorial) ในกรณีนี้ปัจจัยทั้งสามถูกกำหนดช่วงและระดับดังนี้

จำนวนชั้นของใบตองจำนวน 2-4 ชั้น (ระดับ 2, 3 และ 4 ชั้น) โดยพิจารณาจากการศึกษาของ Luthfi et al. [5] ที่ระบุว่า การซ้อนหลายชั้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ แต่ถ้าเกิน 4 ชั้นจะไม่คุ้มค่าและเกิดการเสียรูปในกระบวนการอัด

อุณหภูมิ 100-140 องศาเซลเซียส โดยอ้างอิงจากงานของ Adekunle et al. [6] และ Srimornsak et al. [16] ที่พบว่า อุณหภูมิในช่วงนี้ให้สมบัติทางกลที่เหมาะสม อีกทั้งข้อจำกัดของเครื่องอัดแม่พิมพ์สามารถควบคุมได้ไม่เกิน 150 องศาเซลเซียส จึงเลือกช่วงนี้เพื่อความปลอดภัยและความเสถียรของการทดสอบ

ระยะเวลาการอัดขึ้นรูป 2-4 นาที โดยอ้างอิงจากการทดลองของ Srimornsak et al. [16] ซึ่งรายงานเวลาที่สั้นกว่า 2 นาที อาจทำให้การอัดไม่เต็มรูป ส่วนเวลาที่นานเกิน 4 นาที ไม่ส่งผลให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญแต่จะเพิ่มการสิ้นเปลืองพลังงาน

เพื่อความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ แต่ละชุดการทดลองภายใต้ D-optimal ได้ทำการทดสอบซ้ำ (Replication) จำนวน 3 ครั้ง และคำนวณค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงต่อแรง

กดและค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อให้ลดอิทธิพลของความแปรปรวนที่เกิดจากตัวอย่างและการทดลอง

หลังจากการทดสอบในแต่ละชุดการทดลอง ผลลัพธ์ถูกวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab Version 16 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิสำหรับการขึ้นรูป และจำนวนชั้นของใบตองมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} < 0.05$) ต่อค่าความแข็งแรงและการดูดซึมน้ำ ส่วนระยะเวลาการอัดขึ้นรูปมีผลรองลงมา โดยค่าของ R^2 ของโมเดลตอบสนองอยู่ในช่วง 90–94 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสะท้อนถึงความเหมาะสมของสมการตอบสนองและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองสถิติ

นอกจากนี้การใช้ D-optimal ทำให้สามารถระบุชุดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ จำนวนชั้นของใบตองจำนวน 4 ชั้น ที่อุณหภูมิการอัดขึ้นรูป 140 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการอัดขึ้นรูป 2 นาที ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงกดสูงสุด 9.07 กิโลนิวตัน และการดูดซึมน้ำต่ำสุด 14.80 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบแรงกดของภาชนะถ้วยทำตามวิธีมาตรฐาน ISO 3037:2022 [17] เพื่อวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงกดในแนวตั้ง ส่วนการทดสอบการดูดซึมน้ำใช้วิธี Cobb ตามมาตรฐาน ISO 535:2014 [18] โดยวัดการดูดซึมน้ำจากการแช่ตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 60 วินาที และชั่งน้ำหนักก่อนและหลังแช่เพื่อคำนวณค่าร้อยละการดูดซึมน้ำตามสมการ (1)

จากนั้นได้ทำการทดสอบแรงกดดังรูปที่ 3 และการดูดซึมน้ำของภาชนะถ้วยจากใบตองและภาชนะถ้วยเยื่อกระดาษสำเร็จรูป โดยใช้เครื่องชั่งดิจิทัลเพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ นอกจากนี้ยังได้มีการเปรียบเทียบสมบัติทางกล (แรงกดและการดูดซึมน้ำ) กับภาชนะถ้วยเยื่อกระดาษสำเร็จรูปที่มีจำหน่ายทั่วไป เพื่อประเมินความสามารถในการแข่งขันของวัสดุจากใบตอง โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



(1) ถ้วยภาชนะจากใบตอง (2) ถ้วยภาชนะจากเยื่อกระดาษ

รูปที่ 3 การทดสอบคุณสมบัติทางกลโดยการทดสอบแรงกด

ตารางที่ 1 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของใบตอง

ลำดับ ที่	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (นาที)	จำนวน ชั้น	แรงกด (kN)	การดูดซึมน้ำ (%)
1	119.92	3	2	6.80	15.10
2	100	2.9	2	5.20	16.20
3	140	4	3	8.90	15.90
4	140	3	3	8.60	15.60
5	134.60	3.1	4	8.90	15.80
6	100	3.1	4	6.20	16.40
7	100	4	3	6.60	16.10
8	120	3	3	7.30	15.70
9	140	2	3	8.00	15.90
10	122	2	2	6.50	15.40
11	140	3.1	2	7.80	15.60
12	124	4	4	8.20	16.20
13	100	2.9	2	5.10	16.30
14	100	4	3	6.40	16.10
15	140	3.1	2	7.90	15.54
16	122	2	2	6.60	15.40
17	120	2.34	4	7.10	16.00
18	118	4	2	6.50	15.50
19	100	2	3	5.80	16.10
20	100	2	3	5.90	16.08
*21	140	2	4	9.07	14.80
22	100	2	4	6.20	16.20

จากตารางที่ 1 ผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมโดยการประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมที่สุด (D-optimal) พบว่าปัจจัยด้านจำนวนชั้นของใบตองและอุณหภูมิการอัดขึ้นรูปมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ โดยถ้วยที่ผลิตจากใบตองจำนวน 4 ชั้น และอุณหภูมิการอัดขึ้นรูป 140 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2

นาที่ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงกดสูงสุดเท่ากับ 9.07 กิโลนิวตัน และการดูดซึมน้ำต่ำสุดเท่ากับ 14.80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในกลุ่มชุดทดลองทั้ง 22 ชุดการทดลอง

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบแรงกดและการดูดซึมน้ำของภาชนะถ้วย

ภาชนะถ้วยจากไบตองที่ผลิตด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด (ตามที่สรุปในตารางที่ 1) ได้ถูกนำมาทดสอบซ้ำจำนวน 10 ครั้ง เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของคุณสมบัติภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ได้แก่ จำนวนชั้นของไบตองจำนวน 4 ชั้น อุณหภูมิการอัดขึ้นรูป 140 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการอัดขึ้นรูป 2 นาที การนี้มีเป้าหมายเพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของค่าความแข็งแรงต่อแรงกดและการดูดซึมน้ำของภาชนะถ้วยจากไบตองเมื่อผลิตซ้ำหลายครั้ง โดยผลการทดสอบสรุปแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงกด และการดูดซึมน้ำของไบตอง

ครั้งที่	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (นาที)	จำนวนชั้น	แรงกด (kN)	การดูดซึมน้ำ (%)
1	140	2	4	8.50	15.20
2	140	2	4	8.70	15.00
3	140	2	4	8.90	14.90
4	140	2	4	9.00	14.85
5	140	2	4	9.07	14.80
6	140	2	4	9.20	14.85
7	140	2	4	9.30	14.90
8	140	2	4	9.40	15.00
9	140	2	4	9.50	15.20
10	140	2	4	9.60	15.50
เฉลี่ย				9.12	15.02

จากผลการทดสอบในตารางที่ 2 พบว่าจำนวนชั้นของไบตองและอุณหภูมิการอัดขึ้นรูปเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยการขึ้นรูปด้วยไบตองจำนวน 4 ชั้น ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 นาที ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงกดเฉลี่ย 9.12 กิโลนิวตัน และมีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ย 15.02 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริง

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบแรงกด และการดูดซึมน้ำของภาชนะถ้วยเยื่อกระดาษ

ครั้งที่	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (นาที)	จำนวนชั้น	แรงกด (kN)	การดูดซึมน้ำ (%)
1	140	2	4	12.50	16.10
2	140	2	4	13.40	16.60
3	140	2	4	12.90	16.30
4	140	2	4	14.20	16.90
5	140	2	4	13.00	16.70
6	140	2	4	14.80	17.00
7	140	2	4	13.60	16.20
8	140	2	4	15.00	17.20
9	140	2	4	12.80	16.50
10	140	2	4	13.90	16.80
เฉลี่ย				13.61	16.63

จากตารางที่ 3 ภาชนะถ้วยเยื่อกระดาษที่ใช้ในการเปรียบเทียบไม่ได้ถูกขึ้นรูปใหม่ แต่เป็นภาชนะที่ทำหน่วยทั่วไปในท้องตลาด ซึ่งถูกนำมาทดสอบกับค่าพารามิเตอร์ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับภาชนะจากไบตอง คือ ใช้อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการอัดขึ้นรูป 2 นาที ผลการวิเคราะห์พบว่าภาชนะเยื่อกระดาษมีค่าความแข็งแรงต่อแรงกดเฉลี่ย 13.61 กิโลนิวตัน และมีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ย 16.63 เปอร์เซ็นต์ ค่าที่ได้อยู่ในช่วงมาตรฐานของกระดาษและกระดาษแข็งที่ใช้ผลิตภาชนะและกล่องบรรจุภัณฑ์ ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 3037:2022 สำหรับการทดสอบแรงกด และมาตรฐาน ISO 535:2014 สำหรับการทดสอบการดูดซึมน้ำโดยใช้น้ำแช่เป็นเวลา 60 วินาที

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบจากตารางที่ 2 และตารางที่ 3 พบว่าภาชนะจากไบตองซึ่งผลิตด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงกดเฉลี่ย 9.12 กิโลนิวตัน และค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ย 15.02 เปอร์เซ็นต์ แม้ค่าความแข็งแรงจะน้อยกว่าภาชนะเยื่อกระดาษ แต่ค่าการดูดซึมน้ำของไบตองอยู่ในระดับใกล้เคียงกันและยังอยู่ในเกณฑ์การใช้งานจริง อีกทั้งข้อได้เปรียบที่สำคัญคือความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ ทำให้ไบตองยังคงมีศักยภาพเป็นวัสดุทดแทนที่เหมาะสมในเชิงพาณิชย์

4.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

จากนั้นจึงนำผลการทดสอบภาชนะถ้วยจากไบตองมาเปรียบเทียบกับภาชนะถ้วยเยื่อกระดาษที่มีวางจำหน่ายทั่วไป เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลและค่าการดูดซึมน้ำ โดยใช้

การวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Two-Sample T-Test ในระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยตั้งสมมติฐานดังสมการที่ (2) และ (3)

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad (2)$$

$$H_1: \mu_1 < \mu_2 \quad (3)$$

โดยที่

μ_1 คือ ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบจากภาชนะใบบทอง

μ_2 คือ ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบจากภาชนะเยื่อกระดาษ

Two-Sample T-Test and CI: ค่าแรงกดของวัสดุใบบทอง, ค่าแรงกดของวัสดุเยื่อกระดาษ
Two-Sample T for ค่าแรงกดของวัสดุใบบทอง vs ค่าแรงกดของวัสดุเยื่อกระดาษ

	N	Mean	StDev	SE Mean
ค่าแรงกดของวัสดุใบบทอง	10	9.117	0.352	0.11
ค่าแรงกดของวัสดุเยื่อกระดาษ	10	13.610	0.856	0.27

Difference= μ_1 (ค่าแรงกดของวัสดุใบบทอง) - μ_2 (ค่าแรงกดของวัสดุเยื่อกระดาษ)

Estimate for difference: -4.493

95% CI for difference: (-5.137, -3.849)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -15.35 P-Value = 0.000 DF = 11

รูปที่ 4 ผลการทดสอบทางสถิติของการทดสอบค่าแรงกด

จากรูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบทางสถิติ Two-Sample T-Test สำหรับการเปรียบเทียบค่าแรงกดของภาชนะถ้วยระหว่างวัสดุใบบทองและวัสดุเยื่อกระดาษ พบค่า T-Value = -15.35 และ p-value < 0.001 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 และสรุปได้ว่าค่าแรงกดของภาชนะใบบทองและภาชนะเยื่อกระดาษแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าแรงกดเฉลี่ยของภาชนะใบบทอง (9.12 กิโลนิวตัน) ต่ำกว่าภาชนะเยื่อกระดาษ (13.61 กิโลนิวตัน) และช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ของค่าความแตกต่างอยู่ที่ [-5.137, -3.849] ซึ่งหมายความว่าค่าความแตกต่างของค่าแรงกดระหว่างสองกลุ่มจะอยู่ในช่วงนี้ 95 เปอร์เซ็นต์ ของระยะเวลาการอัดขึ้นรูป และเนื่องจากช่วงนี้ไม่ครอบคลุมค่า 0 จึงยืนยันว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้แม้ค่าแรงกดของใบบทองจะต่ำกว่าเยื่อกระดาษ แต่ยังคงสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำ 8 กิโลนิวตัน ตาม

มาตรฐาน ISO 3037:2022 จึงถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานทั่วไป

Two-Sample T-Test and CI: การดูดซึมน้ำของวัสดุใบบทอง, การดูดซึมน้ำของวัสดุเยื่อกระดาษ
Two-Sample T for การดูดซึมน้ำของวัสดุใบบทอง vs การดูดซึมน้ำของวัสดุเยื่อกระดาษ

	N	Mean	StDev	SE Mean
การดูดซึมน้ำของวัสดุใบบทอง	10	15.020	0.219	0.069
การดูดซึมน้ำของวัสดุเยื่อกระดาษ	10	16.630	0.359	0.110

Difference= μ_1 (การดูดซึมน้ำของวัสดุใบบทอง) - μ_2 (การดูดซึมน้ำของวัสดุเยื่อกระดาษ)

Estimate for difference: -1.610

95% CI for difference: (-1.895, -1.325)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -12.11 P-Value = 0.000 DF = 14

รูปที่ 5 ผลการทดสอบทางสถิติของการทดสอบการดูดซึมน้ำ

จากรูปที่ 5 แสดงผลการทดสอบทางสถิติ Two-Sample T-Test สำหรับการเปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำของภาชนะถ้วยระหว่างวัสดุใบบทองและวัสดุเยื่อกระดาษ พบค่า T-Value = -12.11 และ p-value < 0.001 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 และสรุปได้ว่าค่าการดูดซึมน้ำของภาชนะใบบทองและภาชนะเยื่อกระดาษแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของภาชนะใบบทอง (15.02 เปอร์เซ็นต์) ต่ำกว่าของเยื่อกระดาษ (16.63 เปอร์เซ็นต์) และช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ของค่าความแตกต่างอยู่ที่ [-1.895, -1.325] ซึ่งแสดงว่าค่าความแตกต่างจะอยู่ในช่วงนี้ 95 เปอร์เซ็นต์ ของระยะเวลา และยืนยันว่าภาชนะใบบทองดูดซึมน้ำน้อยกว่า จึงมีความต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้ดีกว่า อีกทั้งยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ISO 535:2014 ที่กำหนดไม่เกิน 17 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการใช้งานทั่วไป

ดังนั้นการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab ในระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบชี้ชัดว่าภาชนะใบบทองมีค่าความแข็งแรงและค่าการดูดซึมน้ำที่แตกต่างจากภาชนะเยื่อกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ แม้ค่าความแข็งแรงของใบบทองจะน้อยกว่า แต่ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและเหมาะสมต่อการใช้งานจริง พร้อมทั้งมีข้อได้เปรียบในแง่ความเป็นวัสดุธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ จึงมีศักยภาพในการเป็นวัสดุทดแทนภาชนะพลาสติกและเยื่อกระดาษในอนาคต

5. อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการอัดขึ้นรูปภาชนะถ้วยจากใบตอง โดยพิจารณาปัจจัยสำคัญ ได้แก่ 1) จำนวนชั้นของใบตอง 2) อุณหภูมิการอัดขึ้นรูป และ 3) ระยะเวลาการอัดขึ้นรูป ผลการออกแบบการทดลองแบบ D-optimal พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ 1) จำนวนชั้นของใบตองจำนวน 4 ชั้น 2) อุณหภูมิการอัดขึ้นรูป 140 องศาเซลเซียส และ 3) ระยะเวลาการอัดขึ้นรูป 2 นาที ซึ่งให้ค่าแรงกดเฉลี่ย 9.12 กิโลนิวตัน และค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ย 15.02 เปอร์เซ็นต์

เมื่อเปรียบเทียบกับภาชนะเยื่อกระดาษที่มีจำหน่ายทั่วไป พบว่าค่าแรงกดและค่าการดูดซึมน้ำของใบตองแตกต่างจากเยื่อกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} < 0.001$) โดยค่าแรงกดของใบตองต่ำกว่าเยื่อกระดาษ (9.12 กิโลนิวตัน < 13.61 กิโลนิวตัน) แต่ยังสูงกว่าค่ามาตรฐานขั้นต่ำ 8 กิโลนิวตัน ตามมาตรฐาน ISO 3037:2022 ทำให้มั่นใจได้ว่าภาชนะใบตองยังคงมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้งาน ส่วนค่าการดูดซึมน้ำของใบตองต่ำกว่าเยื่อกระดาษ (15.02 เปอร์เซ็นต์ < 16.63 เปอร์เซ็นต์) และยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ISO 535:2014 ที่กำหนดไม่เกิน 17 เปอร์เซ็นต์ จึงสามารถรองรับการบรรจุอาหารหรือของเหลวในระดับหนึ่งได้อย่างปลอดภัย การวิเคราะห์ทางสถิติทั้งหมดดำเนินการด้วยโปรแกรม Minitab ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ผลการศึกษาที่มีความสอดคล้องบางส่วนกับงานวิจัยของ Arumugam et al. [2] ที่ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของใบกล้วย และพบว่าการเพิ่มจำนวนชั้นของใบมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของบรรจุภัณฑ์ งานของ Arumugam ใช้ความร้อน 140 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับงานนี้ แต่มีความแตกต่างในชนิดของวัสดุและขั้นตอนการขึ้นรูป เนื่องจากใบกล้วยมีลักษณะเส้นใยและความหนาไม่เหมือนกับใบตอง อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองของทั้งสองงานยืนยันในทิศทางเดียวกันว่า การเลือกจำนวนชั้นและอุณหภูมิที่เหมาะสมมีผลต่อคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและการดูดซึมน้ำของภาชนะที่ผลิตขึ้น

งานวิจัยนี้สามารถตอบวัตถุประสงค์หลักได้ชัดเจนว่าภาชนะที่ผลิตจากใบตองภายใต้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมมีคุณสมบัติอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน และสามารถใช้ทดแทนภาชนะพลาสติกหรือเยื่อกระดาษได้ในสถานการณ์

ทั่วไป นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นศักยภาพของใบตองในการเป็นวัสดุทดแทนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

การทดลองนี้จัดทำในสภาวะห้องปฏิบัติการที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ทำให้ไม่สะท้อนเงื่อนไขการใช้งานจริงได้ทั้งหมด อีกทั้งคุณภาพของใบตองอาจแปรผันตามฤดูกาล แหล่งปลูก และการเก็บรักษา ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงและการดูดซึมน้ำในแต่ละครั้ง

ในอนาคตควรมีการพัฒนาเทคนิคการเคลือบผิวหรือการเสริมวัสดุเพื่อเพิ่มความทนทานและลดการดูดซึมน้ำ ควรทดสอบการใช้งานจริง เช่น การบรรจุอาหารร้อน อาหารมัน หรือการเก็บในสภาวะเย็นจัดเพื่อประเมินความเหมาะสมในระยะยาว รวมถึงการขยายผลสู่การผลิตเชิงอุตสาหกรรมเพื่อให้สามารถใช้ทดแทนบรรจุภัณฑ์พลาสติกได้อย่างยั่งยืน

6. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอัดขึ้นรูปภาชนะถ้วยจากใบตอง โดยอาศัยการออกแบบการทดลองแบบ D-optimal เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสามารถให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่แข็งแรงและใช้งานได้จริงได้ ปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ 1) จำนวนชั้นของใบตอง 2) อุณหภูมิการอัดขึ้นรูป และ 3) ระยะเวลาการอัดขึ้นรูป ผลการศึกษาพบว่าการใช้จำนวนชั้นของใบตองจำนวน 4 ชั้น 2) อุณหภูมิการอัดขึ้นรูป 140 องศาเซลเซียส และ 3) ระยะเวลาการอัดขึ้นรูป 2 นาที เป็นค่าที่ให้ผลดีที่สุด โดยภาชนะที่ได้มีค่าแรงกดเฉลี่ย 9.12 กิโลนิวตัน และค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ย 15.02 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบเปรียบเทียบกับภาชนะเยื่อกระดาษที่มีจำหน่ายทั่วไปแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงและค่าการดูดซึมน้ำของภาชนะจากใบตองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} < 0.001$) แม้ค่าความแข็งแรงของใบตองจะต่ำกว่าเยื่อกระดาษ แต่ยังสูงกว่ามาตรฐานขั้นต่ำ 8 กิโลนิวตัน ตามมาตรฐาน ISO 3037:2022 ขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำของใบตองต่ำกว่าเยื่อกระดาษและอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่เกิน 17 เปอร์เซ็นต์ ตามมาตรฐาน ISO 535:2014 ซึ่งยืนยันได้ว่าภาชนะใบตองมีคุณสมบัติที่สามารถรองรับการใช้งานทั่วไปได้จริง และมีความปลอดภัยต่อการบรรจุอาหารหรือของเหลวในระดับที่ยอมรับได้

ผลการศึกษาทั้งสองสอดคล้องกับงานวิจัยที่พบว่าการเพิ่มจำนวนชั้นของใบมีผลอย่างมากต่อความแข็งแรงและการป้องกันการซึมผ่านของน้ำ แม้จะมีความแตกต่างในลักษณะของวัสดุและกระบวนการผลิต แต่ทั้งสองงานยืนยันว่าการเลือกจำนวนชั้นและอุณหภูมิที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดคุณภาพของบรรจุภัณฑ์ธรรมชาติ

เพื่อต่อยอดการวิจัย ควรมีการประเมินความทนทานของภาชนะจากใบตองในสภาวะการใช้งานจริง เช่น การบรรจุอาหารที่มีความร้อนสูง อาหารที่มีน้ำมัน หรือการเก็บรักษาในตู้เย็นเป็นระยะเวลานาน อีกทั้งควรทดลองใช้วัสดุธรรมชาติชนิดอื่น เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติและความเหมาะสม นอกจากนี้ยังควรพัฒนาเทคนิคเสริมความแข็งแรง เช่น การเคลือบผิวการปรับความหนาของใบตอง หรือการเพิ่มวัสดุเสริมเพื่อให้ภาชนะมีความทนทานมากขึ้นและพร้อมต่อการใช้งานเชิงพาณิชย์ในวงกว้าง ซึ่งจะช่วยลดการใช้พลาสติกและบรรจุภัณฑ์แบบใช้ครั้งเดียว และสนับสนุนการพัฒนาอย่างยั่งยืน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ประสิทธิ์ เวชบรรยงรัตน์. ออกแบบบรรจุภัณฑ์รักษ์โลก. *Journal of Information Technology and Innovation*. 2018;17(1): 37–48.
- [2] Arumugam S, Pugazhenth G, Selvaraj S. Investigations on mechanical properties of processed banana leaves for sustainable food packaging applications. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024;14(18): 22527-22537.
- [3] Mvuma AC, Alexander AN. The emerging use of palm and banana leaves in food packaging. *International Journal of Multidisciplinary Research and Development*. 2023;10(12): 81–3.
- [4] นธีทร ม่วงเอี่ยม, พัฒนพงษ์ เพชรโต, พิษณุ ชาวพิจิตร, ปิยณัฐ ขุนทอง. การศึกษาลักษณะทางกายภาพของภาชนะจากธรรมชาติ. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรสุพรรณบุรี*. 2564;3(1): 1–9.
- [5] Luthfi N, Wang X, Kito K. Effect of drying temperature on the physical properties of binderless fiberboard from bagasse: study of water absorption. *Science & Technology Asia*. 2021;26(3): 30–8.
- [6] Adekunle K, Åkesson D, Skrifvars M. Biobased composites prepared by compression molding with a novel thermoset resin from soybean oil and a natural-fiber reinforcement. *Journal of Applied Polymer Science*. 2010;116(3): 1759 – 1765.
- [7] Alibekov RS, Urazbayeva KU, Azimov AM, Rozman AS, Hashim N, Maringgal B. Advances in biodegradable food packaging using wheat-based materials: fabrications and innovations, applications, potentials, and challenges. *Foods*. 2024;13(18): 2964.
- [8] Begum HA, Tanni TR, Shahid MA. Analysis of water absorption of different natural fibers. *Journal of Textile Science and Technology*. 2021;7(4): 152-160.
- [9] Klein P, Kennedy M. Fundamentals of plastics thermoforming [Internet]. Cham: Springer Nature Switzerland; 2025. Synthesis Lectures on Materials and Optics). Available from: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-63528-1>.
- [10] Bootklad M, Kaewtatip K. Biodegradation of thermoplastic starch/eggshell powder composites. *Carbohydrate Polymers*. 2013;97(2): 315-320.
- [11] Yuvaraj G, Ramesh M. Mechanical, wear, and hydrophobic properties of silane-treated Corn husk fiber and betel nut epoxy composites. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023;13(16): 15227-15234.
- [12] Henrion D, Lasserre JB. Approximate D-optimal design and equilibrium measure. *Comptes Rendus. Mathématique*. 2025;363(G8): 739-756.
- [13] Luesak P, Pitakaso R, Sethanan K, Golinska-Dawson P, Srichok T, Chokanat P. Multi-objective modified differential evolution methods for the optimal parameters of aluminum friction stir

welding processes of AA6061-T6 and AA5083-H112. *Metals*. 2023;13(2): 252.

- [14] Huang Y, Li K, Mandal A, Yang J. ForLion: A new algorithm for D-optimal designs under general parametric statistical models with mixed factors. *Statistics and Computing*. 2024;34(5): 157.
- [15] Kang L, Deng X, Jin R. *Bayesian D-optimal design of experiments with quantitative and qualitative Responses*. Available from: <https://arxiv.org/abs/2304.08701> [Accessed 28th July 2025].
- [16] Srimornsak P, Sunthornvarabhas J, Nunthanid J. Design of biodegradable food packaging using heat-molded natural materials. *Kasetsart Journal: Natural Science*. 2017;51(3): 499–506.
- [17] International Organization for Standardization. *Corrugated Fibreboard—Determination of Edgewise Crush Resistance (Non-Waxed Edge Method) (ISO Standard No. 3037:2022)*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 2022. Report No.: ISO 3037:2022. Available from: <https://www.iso.org/standard/80310.html> [Accessed 7th May 2025].
- [18] International Organization for Standardization. *Paper and Board — Determination of Water Absorptiveness — Cobb Method (ISO Standard No. 535:2014)*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 2014. Report No.: ISO 535:2014. Available from: <https://www.iso.org/standard/60490.html> [Accessed 7th May 2025].