กระดาษลามิเนตชีวภาพจากเปลือกโกโก้สำหรับบรรจุภัณฑ์เบเกอรี

Biodegradable Laminated Paper from Cocoa Pod Husk for Bakery Containers

กนกศักดิ์ ลอยเลิศ[1/*] ประยูร เอ็นมาก[1/] นภัสสร เลียบวัน[1/] สุกัญญา นิติยนต์[1/] ศิวัช พลายเสน[1/]

Kanoksak Loiloes[1/*] Prayoon Enmak[1/] Napatsorn Leabwan[1/] Sukanya Nitiyon[1/] Siwat Plaisen[1/]

Received 4 Jun. 2025/Revised 14 Aug. 2025/Accepted 17 Aug. 2025

ABSTRACT

Paper derived from cocoa pod husk generally exhibits limited mechanical durability. This research investigates the use of cocoa pod husk, a waste material, to produce disposable paperboard containers for bakery products. The chemical pulping process utilized sodium hydroxide-anthraquinone (SAQ) for pulping cocoa pod husks. The resulting cocoa pod husk pulp, referred to as SAQ5, displayed the best overall properties for paper production. The characteristics of the SAQ5 pulp included a yield of 77.87±2.57%, a kappa number of 26.0±0.1, a lignin content of 3.38±0.01%, and a freeness of 802.67±63.79 CSF. Subsequently, modified starch was added to the paper as a binding material. The paper produced, known as pulp 10 g and modified starch 0.25 g, exhibited the best overall properties for paper formation. The paper had an air permeability of 12.6±3.3 Pa·s/m, and a basis weight of 67.33±12.92 g/m². Laminating paper with polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) film improved its resistance to water and oil. Among the samples tested, the paper laminate (PBAT 4-layer/paper/PBAT 4-layer) exhibited improved resistance to water and oil. It had a basis weight of 119.70±7.94 g/m² and a density of 1.40±0.20 g/cm³. When formed into containers for bakery products, such as sausage and mayonnaise-filled bread, butter cake, almond mixed butter cookies, and milk-flavored croissants, demonstrated resistance to fats and oils after 180 minutes.

Keywords: bakery products; cocoa pod husk; paper; packaging; polybutylene adipate-co-terephthalate

[1/] กองวิจัยพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร 50 ถ.พหลโยธิน จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

[1/] Postharvest and Processing Research and Development Division, 50 Phahonyothin Rd., Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

*** Corresponding author: sakagro176@gmail.com**

บทคัดย่อ

กระดาษเปลือกโกโก้มีข้อจำกัดเรื่องความทนทานด้านเชิงกล จึงศึกษาการใช้เปลือกโกโก้ที่เป็นวัสดุเหลือใช้เพื่อผลิตภาชนะกระดาษซึ่งลามิเนตด้วยพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) สำหรับผลิตภัณฑ์เบเกอรี โดยต้มเยื่อเปลือกโกโก้ด้วยวิธีการทางเคมีซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์-แอนทราควิโนน (SAQ) แล้วทดสอบสมบัติทางกายภาพและเคมี พบว่า การต้มเยื่อเปลือกโกโก้สูตร SAQ5 (โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 (%โดยน้ำหนัก/ปริมาตร) แอนทราควิโนน 0.1 (%โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 140°ซ. ใช้เวลา 60 นาที) ได้ปริมาณเยื่อสูงสุด 77.87±2.57% คัปปานัมเบอร์ 26.0±0.1 ลิกนิน 3.38±0.01% และสภาพการระบายน้ำ 802.67±63.79 ซีเอสเอฟ การขึ้นรูปกระดาษโดยใช้สตาร์ชดัดแปรเป็นตัวประสาน พบว่า เยื่อเปลือกโกโก้ 10 ก. สตาร์ชดัดแปร 0.25 ก. มีความต้านทานการไหลของอากาศ 12.6±3.3 ปาสคาล. วินาที/ม. และน้ำหนักมาตรฐาน 67.33±12.92 ก./ตร.ม. เมื่อใช้พลาสติก PBAT ลามิเนตเพื่อต้านทานน้ำและไขมัน พบว่า PBAT 4 ชั้น/กระดาษ/ PBAT 4 ชั้น ให้สมบัติดีที่สุด มีน้ำหนักมาตรฐาน 119.70±7.94 ก./ตร.ม. มีความหนาแน่น 1.40±0.20 ก./ลบ.ซม แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับชุดควบคุม เมื่อขึ้นรูปแล้วนำมาใช้เป็นภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์เบเกอรีชนิดขนมปังไส้กรอกมายองเนส บัตเตอร์เค้ก คุกกี้เนยผสมอัลมอนด์ และครัวซองท์รสนม แสดงแนวโน้มการเพิ่มคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ/น้ำมันจากค่ามุมสัมผัสและผลการทดสอบต้านทานไขมันและน้ำมันเชิงคุณภาพได้ทุกผลิตภัณฑ์เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที

คำสำคัญ: ผลิตภัณฑ์เบเกอรี; เปลือกโกโก้; กระดาษ; บรรจุภัณฑ์; พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท

บทนำ

โกโก้เป็นพืชเศรษฐกิจที่นำเมล็ดของโกโก้มาผ่านกระบวนการผลิตได้เป็นช็อกโกแลต โดยมีของเหลือใช้จากการผลิตช็อกโกแลตที่สำคัญคือเปลือกโกโก้ ซึ่งมีปริมาณสูงถึง 76% ของผลโกโก้ เมล็ดโกโก้แห้ง 1 ตัน มีเปลือกโกโก้เหลือทิ้ง 10 ตัน ซึ่งเดิมเปลือกโกโก้ไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ เกิดปัญหาด้านกลิ่นและแมลงรบกวน การนำมาใช้ประโยชน์จัดเป็นการจัดการที่มีประสิทธิภาพ (Murray et al., 2021) เปลือกโกโก้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลาง เช่น การนำมาผลิตเป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ การสกัดสารสำคัญเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร การผลิตปุ๋ย เป็นต้น (Oddoye et al., 2012) นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มมูลค่าของเปลือกโกโก้ด้วยวิธีการทางชีวภาพ ฟิสิกส์ เคมี และเคมีฟิสิกส์ (Murray et al., 2021; Vandenberghe et al., 2022) การนำมาผลิตเป็นกระดาษ พบว่ามีปริมาณเซลลูโลสสูง 34% ปริมาณลิกนินน้อยกว่า 30% และปริมาณเถ้าที่ต่ำ (Lu et al., 2018) แต่การผลิตกระดาษโดยใช้เปลือกโกโก้ยังต้องมีการพัฒนาเพื่อให้มีคุณภาพเหมาะสมกับการใช้งาน

กระดาษโดยทั่วไปมีข้อด้อย คือ เป็นวัสดุที่ทนต่อความชื้นต่ำหรือมีความชอบน้ำ (hydrophilic materials) สามารถดูดน้ำและความชื้นจากสิ่งแวดล้อมได้ดี ส่งผลต่อการสูญเสียความแข็งแรงเชิงกล เพื่อทำให้กระดาษไม่สัมผัสกับของเหลวโดยตรง จึงต้องเคลือบกระดาษด้วยพอลิเมอร์ประเภทพลาสติก เช่น ใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเคลือบกระดาษ (ธัญญารัตน์, 2557) พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติมีหลายชนิด เช่น พอลิแลกติคแอซิด (polylactic acid, PLA) พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate,

PBS) เป็นต้น สำหรับพลาสติกชีวภาพ PBAT จัดเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ประเภทเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถขึ้นรูปประเภทฟิล์มได้ดี (Li et al., 2015) การผสานกระดาษและพลาสติกเข้าด้วยกันจะช่วยเสริมสมบัติให้ดียิ่งขึ้น โดยเรียกกระบวนการผสานนี้ว่า การลามิเนต (lamination) เป็นการยึดติดกันของชั้นบาง ๆ ของชั้นฟิล์มพลาสติกกับวัสดุอื่น เช่น กระดาษ จำนวนของชั้นลามิเนตควรมีอย่างน้อย 2 ชั้น และหนึ่งในชั้นเหล่านั้นต้องเป็นเทอร์โมพลาสติก (รุ่งนภา, 2562)

สำหรับแนวทางในการพัฒนาการผลิตกระดาษจากเปลือกโกโก้ให้มีคุณภาพเหมาะสมกับการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์นั้น กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษจากเปลือกโกโก้ทางเคมี และกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์กระดาษจากเปลือกโกโก้ทั้งการขึ้นรูปกระดาษ และการลามิเนตพลาสติกชีวภาพ โดยใช้วิธีการผลิตที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งยังไม่มีการผลิตออกมาใช้งานเพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์กระดาษสำหรับผลิตภัณฑ์อาหาร ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาภาชนะกระดาษจากเยื่อเปลือกโกโก้ที่ลามิเนตด้วยพลาสติกชีวภาพ PBAT เพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์แบบคงรูปชนิดใช้แล้วทิ้ง เพื่อใช้กับผลิตภัณฑ์เบเกอรี โดยบรรจุภัณฑ์มีความสามารถในการต้านทานไขมันได้

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมี

เตรียมเปลือกโกโก้พันธุ์ลูกผสมชุมพร1 ทำความสะอาดเปลือกโกโก้ด้วยน้ำสะอาด ลดขนาดเปลือกโกโก้ด้วยเครื่องหั่นสไลด์วัสดุให้มีขนาดความยาว 1-2 นิ้ว หนา 0.4 ซม. จากนั้นอบเปลือกโกโก้ให้แห้งที่อุณหภูมิ 80°ซ. เป็นเวลา 24 ชม. หรือจนกว่าเปลือกโกโก้แห้ง แล้วเก็บรักษาในถุงพลาสติกพอลิพรอพิลีน วิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบของเปลือกโกโก้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชั่น (field emission scanning electron microscope: FESEM) (Model: JEOL JSM7800F, Japan) และเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (energy dispersive X-ray spectrometer: EDS) (model: Oxford X-Max 20, United Kingdom) วิเคราะห์ทางเคมีของเปลือกโกโก้ ได้แก่ การละลายในน้ำร้อน การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% เพนโตซาน ลิกนิน โฮโล-เซลลูโลส อัลฟาเซลลูโลส เบตาเซลลูโลส และแกมมาเซลลูโลส ตามมาตรฐานการทดสอบอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษ (TAPPI)

2. การผลิตเยื่อจากเปลือกโกโก้

ต้มเปลือกโกโก้ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์-แอนทราควิโนน (SAQ) โดยใช้เปลือกโกโก้หั่นสไลด์ปริมาณ 10 ก. วางแผนการทดลองแบบ 3x2x2 factorial in RCBD 3 ซ้ำ มี 3 ปัจจัย คือ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลา ดังนี้

กรรมวิธีที่ 1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% (โดยน้ำหนัก/ปริมาตร)-แอนทราควิโนน 0.1% (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 140°ซ. เป็นเวลา 60 นาที (SAQ1)

กรรมวิธีที่ 2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% (โดยน้ำหนัก/ปริมาตร)-แอนทราควิโนน 0.1% (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 160°ซ. เป็นเวลา 60 นาที (SAQ2)

กรรมวิธีที่ 3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 15% (โดยน้ำหนัก/ปริมาตร)-แอนทราควิโนน 0.1% (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 140°ซ. เป็นเวลา 60 นาที (SAQ3)

กรรมวิธีที่ 4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 15% (โดยน้ำหนัก/ปริมาตร)-แอนทราควิโนน 0.1% (โดย

น้ำหนัก/น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 160°ซ. เป็นเวลา 60 นาที (SAQ4)

กรรมวิธีที่ 5 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% (โดยน้ำหนัก/ปริมาตร)-แอนทราควิโนน 0.1% (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 140°ซ. เป็นเวลา 60 นาที (SAQ5)

กรรมวิธีที่ 6 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% (โดยน้ำหนัก/ปริมาตร)-แอนทราควิโนน 0.1% (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 160°ซ. เป็นเวลา 60 นาที (SAQ6)

กรรมวิธีที่ 7 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% (โดยน้ำหนัก/ปริมาตร)-แอนทราควิโนน 0.1% (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 140°ซ. เป็นเวลา 120 นาที (SAQ7)

กรรมวิธีที่ 8 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% (โดยน้ำหนัก/ปริมาตร)-แอนทราควิโนน 0.1% (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 160°ซ. เป็นเวลา 120 นาที (SAQ8)

กรรมวิธีที่ 9 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 15% (โดยน้ำหนัก/ปริมาตร)-แอนทราควิโนน 0.1% (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 140°ซ. เป็นเวลา 120 นาที (SAQ9)

กรรมวิธีที่ 10 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 15% (โดยน้ำหนัก/ปริมาตร)-แอนทราควิโนน 0.1% (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 160°ซ. เป็นเวลา 120 นาที (SAQ10)

กรรมวิธีที่ 11 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% (โดยน้ำหนัก/ปริมาตร)-แอนทราควิโนน 0.1% (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 140°ซ. เป็นเวลา 120 นาที (SAQ11)

กรรมวิธีที่ 12 โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% (โดยน้ำหนัก/ปริมาตร)-แอนทราควิโนน 0.1% (โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 160°ซ. เป็นเวลา 120 นาที (SAQ12)

ศึกษาสมบัติของเยื่อที่ผลิตได้ ได้แก่ 1) ความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำต้มเยื่อ (pulping liquor) 2) ความชื้น (TAPPI T 258 om-21) 3) ผลผลิตเยื่อ 4) ส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ (reject) 5) คัปปานัมเบอร์ (ISO 302: 2004) 6) ระดับลิกนิน 7) สภาพการระบายน้ำ (freeness) (TAPPI T 227 om-99) และ 8) วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเยื่อจากเปลือกโกโก้

3. การขึ้นรูปกระดาษ

เลือกวิธีการผลิตเยื่อจากเปลือกโกโก้ที่ให้สภาวะเหมาะสมที่สุดจาก ข้อ 2. ขึ้นรูปเยื่อกระดาษให้มีน้ำหนักมาตรฐาน 60 แกรม ตามมาตรฐานการทดสอบอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษ (TAPPI) T205 sp-02 แปรปริมาณเยื่อจากเปลือกโกโก้ 4 5 6 7 8 9 และ 10 ก. โดยใช้เยื่อแช่น้ำปริมาตร 250 มล. เป็นเวลา 24 ชม. หลังจากนั้นเติมน้ำอีก 750 มล. เติมสตาร์ชดัดแปร (ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปของ บริษัท สยามโมดิฟายด์สตาร์ช Lot No.11802814 ผลิตจากมันสำปะหลัง) โดยใช้ปริมาณสตาร์ชดัดแปร 0.0 0.25 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 ก. ปั่นเยื่อให้กระจายตัวด้วยเครื่องปั่น 3 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแผ่นกระดาษ ตั้งเวลาในการเติมน้ำ 40 วินาที กวน 8 วินาที และเซตตัว 5 วินาที จากนั้นนำไปอัดแผ่นด้วยแรงดัน 0.125 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 1 นาที อัดแผ่นกระดาษให้เรียบด้วยเครื่องอัดแผ่นกระดาษที่แรงดัน 0.35 เมกะปาสคาล 2 ครั้ง เป็นเวลา 5 และ 2 นาที ตามลำดับ แล้วผึ่งให้แห้ง

คัดเลือกสูตรที่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษ 3 สูตร ทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของแผ่นกระดาษ (จำนวน 3 ซ้ำ) ได้แก่ 1) ความชื้น (TAPPI T550 om-03) 2) ความหนาแน่น 3) ความต้านทานการไหลของอากาศ (TAPPI T460 om-02) 4) น้ำหนักมาตรฐาน (TAPPI T410 om-08) 5) ความขาวสว่าง (ISO 2470-1: 2016) 6) ความทึบแสง (ISO 2471: 2008) จากนั้นเลือกกระดาษ

ที่ให้สมบัติดีที่สุดเพื่อใช้เป็นวัสดุเชิงประกอบ/วัสดุร่วม (composite) ด้วยพลาสติกชีวภาพ

4. การลามิเนตพลาสติกชีวภาพ

เม็ดพลาสติกชีวภาพ PBAT นำมาทดสอบสมบัติก่อนการขึ้นรูปพลาสติก (จำนวน 3 ซ้ำ) ได้แก่ 1) ความหนาแน่น 2) จุดหลอมเหลว และ 3) อัตราการหลอมไหลของพลาสติก (melt flow rate) จากนั้นขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเป่าถุง (blown film extrusion) (TPBI Public Co., Ltd, Thailand) ช่วงอุณหภูมิของ หัวดาย (die) 3 โซน คือ 116 115 และ 115°ซ. ตามลำดับ และช่วงอุณหภูมิของสกรูว์ฟีด (screw feed) 3 โซน คือ 120 120 และ 120°ซ. ตามลำดับ ความเร็วของเกลียวหนอน (screw) 40 รอบ/นาที ทดสอบสมบัติของพลาสติกชีวภาพ PBAT ได้แก่ 1) สมบัติเชิงกล และ 2) สมบัติทางกายภาพ ก่อนนำไปลามิเนต

คัดเลือกกรรมวิธีที่ดีที่สุดในการขึ้นรูปกระดาษจากข้อ 3 ลามิเนตด้วยพลาสติกชีวภาพ PBAT ทั้งสองด้านของกระดาษ ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัดร้อน (hot compression moulding) (TPBI Public Co., Ltd, Thailand) ที่อุณหภูมิ 150°ซ. แรงดัน 4.14 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 8 นาที วางแผนการทดลองแบบ CRD 3 ซ้ำ 5 กรรมวิธี ดังนี้

กรรมวิธีที่ 1 กระดาษเปลือกโกโก้ไม่ลามิเนตพลาสติกชีวภาพ (C0: ชุดควบคุม)

กรรมวิธีที่ 2 กระดาษเปลือกโกโก้ลามิเนตพลาสติกชีวภาพ 4 ชั้น (C1: PBAT 2 ชั้น/กระดาษ/PBAT 2 ชั้น)

กรรมวิธีที่ 3 กระดาษเปลือกโกโก้ลามิเนตพลาสติกชีวภาพ 6 ชั้น (C2: PBAT 3 ชั้น/กระดาษ/PBAT 3 ชั้น)

กรรมวิธีที่ 4 กระดาษเปลือกโกโก้ลามิเนตพลาสติกชีวภาพ 8 ชั้น (C3: PBAT 4 ชั้น/กระดาษ/PBAT 4 ชั้น)

กรรมวิธีที่ 5 กระดาษเปลือกโกโก้ลามิเนตพลาสติกชีวภาพ 10 ชั้น (C4: PBAT 5 ชั้น/กระดาษ/PBAT 5 ชั้น)

ทดสอบสมบัติของกระดาษลามิเนตด้วยพลาสติกชีวภาพ PBAT ได้แก่ 1) น้ำหนักมาตรฐาน (TAPPI T410 om-08) 2) ความหนาแน่น 3) ความขาวสว่าง (ISO 2470-1: 2016) 4) ความทึบแสง (ISO 2471: 2008) และ 5) ความต้านแรงทิ่มทะลุ (ISO 3036: 2013) จากนั้นคัดเลือกกรรมวิธีที่ดีที่สุดขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์

ทดสอบการใช้งานกับผลิตภัณฑ์เบเกอรี โดยขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุในรูปแบบจานกระดาษด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัดร้อนจากกรรมวิธีที่ดีที่สุดไปทดสอบกับประเภทผลิตภัณฑ์เบเกอรี 4 ประเภท ได้แก่ ขนมปัง เค้ก บิสกิต/คุกกี้ และพาย ซึ่ง Guiné (2022) รายงานการศึกษาจากงานวิจัยจาก 37 วารสารทั่วโลกว่า มีสถิติการวิจัยสูงสุด 4 อันดับแรก โดยคัดเลือกผลิตภัณฑ์เบเกอรีที่วางจำหน่ายในร้านสะดวกซื้อ ดังนี้ ขนมปังไส้กรอกมายองเนส บัตเตอร์เค้ก คุกกี้เนยผสม อัลมอนด์ และครัวซองท์รสนม ทำ 3 ซ้ำ โดยวางผลิตภัณฑ์เบเกอรีบนภาชนะ บริเวณทดสอบห้องต้องเป็นสัดส่วนแยกจากสิ่งรบกวนต่างๆ ผนังเป็นพื้นสีขาวเพื่อไม่ให้สีของตัวอย่างทดสอบเปลี่ยนไป แสงสว่างมีความสม่ำเสมอเพียงพอ สังเกตการซึมผ่านของไขมันและน้ำมันของภาชนะบรรจุกระดาษ (จากการมองเห็นด้วยตาเปล่า แบ่งระดับการซึมผ่านของไขมันและน้ำมันผ่านภาชนะ 3 ระดับ คือ 0=ไม่พบ 1=พบคราบทะลุบางส่วน 2=พบคราบทะลุเท่ากับพื้นผิวที่เบเกอรีสัมผัสกับภาชนะ) ทุกๆ 30 นาที จนครบเวลา 180 นาที จากนั้นวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตบรรจุภัณฑ์

วิเคราะห์ความแปรปรวนและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Tukey's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p<0.05$)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมี

โครงสร้างของเปลือกโกโก้แห้งที่กำลังขยาย 100 500 และ 1,000 เท่า พบว่า พื้นผิวของเปลือกโกโก้มีรอยแตกไม่สม่ำเสมอ ไม่ปรากฏรูพรุน (porous) เส้นใยยึดติดกันแน่นเหมาะสำหรับเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตเยื่อ (Figure 1a-1c) ธาตุที่พบประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) 47.31% และออกซิเจน (O) 46.20% เป็นองค์ประกอบหลักของเซลลูโลส ช่วยทำให้โครงสร้างเส้นใยแข็งแรงและมีหมู่ไฮดรอกซิลที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนเส้นใยดูดซับน้ำได้เกิดพันธะไฮโดรเจนยึดเกาะระหว่างเส้นใย สามารถขึ้นรูปเป็นกระดาษได้ (Daud et al., 2014) (Figure 1d) ใกล้เคียงกับ Córdova et al. (2020) ที่รายงานพบธาตุ C 50.60% และ O 46.60% ส่วนผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกโกโก้แห้งสำหรับการผลิตเยื่อกระดาษซึ่งองค์ประกอบทางเคมีบ่งชี้สมบัติเบื้องต้นของเปลือกโกโก้ ทำให้ทราบถึงการละลายในสารละลายชนิดต่างๆ เช่น การละลายในน้ำร้อน และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% รวมถึงปริมาณลิกนินเพื่อเป็นแนวทางในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อ และปริมาณเซลลูโลสที่ได้จากการสกัดเยื่อ (รมณีย์และคณะ, 2554) (Table 1)

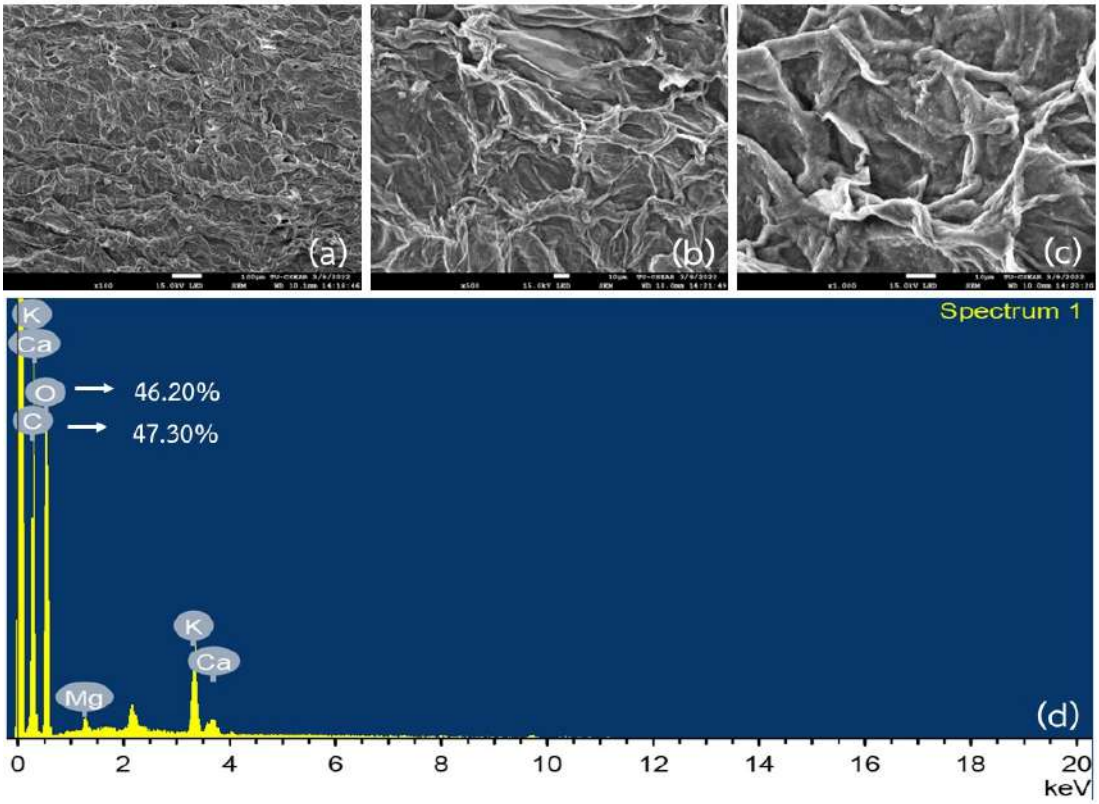


Figure 1 FESEM image (a) x100 (b) x500 (c) x1000 and EDS image (d) of cocoa pod husk for producing paper pulp

Table 1 Solubility and chemical composition of cocoa pod husk for producing paper pulp

Solubility and structural component	Amount (% w/w, dry weight)	Standard test methods
Hot water solubles	44.8	TAPPI T 207 cm-08
1%NaOH solubles	68.1	TAPPI T 212 om-08
Pentosan	2.4	TAPPI T 223 cm-10
Lignin	20.1	TAPPI T 222 om-15
Holocellulose	58.8	Isolation of chlorite holocellulose in TAPPI SECTION
Alpha-cellulose	35.8	TAPPI T 203 cm-09
Beta-cellulose	10.2	TAPPI T 203 cm-09
Gramma-cellulose	12.8	TAPPI T 203 cm-09

TAPPI T = Technical Association of the Pulp and Paper Industry test methods

2. การผลิตเยื่อจากเปลือกโกโก้

การต้มเยื่อเปลือกโกโก้ในสูตร SAQ1 ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (Table 2) เนื่องจากการใช้อุณหภูมิที่ 140℃. เวลา 60 นาที และปริมาณสารโซเดียมไฮดรอกไซด์-แอนทราควิโนนที่ใช้ ส่งผลให้กระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารโซเดียมไฮดรอกไซด์-แอนทราควิโนนที่ใช้ในการต้มกับเปลือกโกโก้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแอนทราควิโนนในกระบวนการผลิตเยื่อช่วยลดระยะเวลา และเพิ่มปริมาณผลผลิตเยื่อที่ได้ (Mannai et al., 2017) ส่วนสารแอนทราควิโนนมีสมบัติในการเพิ่มอัตราการดูดซับของสารละลายเข้าไปในเยื่อพืช และช่วยลดปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับผลิตเยื่อ (รมณีย์และคณะ, 2554)

ความชื้นของเยื่อ (moisture content) จากเยื่อเปลือกโกโก้ 2 สูตรแรก (SAQ1 และ SAQ2) อยู่ระหว่าง 9.89±3.48 และ 9.60±2.97% ต่ำกว่าสูตรอื่นๆ เนื่องจากการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาน้อยกว่า ส่วนสูตรที่เหลือ (SAQ3-SAQ12) ค่าความชื้นอยู่ระหว่าง 10.52±2.66-14.36±2.90% โดยปกติแล้วเยื่อที่สกัดได้ต้องมีความชื้นอยู่ระหว่าง 10-15% ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่เหมาะสมแก่การนำเยื่อที่ได้ไปผลิตเป็นกระดาษเพื่อให้คุณภาพที่ดีของกระดาษ แต่ถ้าเยื่อมีความชื้นมากกว่า 15% กระดาษที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำ เนื่องจากเส้นใยสานตัวกันแบบหลวมๆ กระดาษเกิดการสลายตัวได้ง่ายขึ้น (Akpabio et al., 2012) สำหรับอุณหภูมิและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อผลผลิตเยื่อที่ได้ โดยสูตร SAQ5 ให้ปริมาณผลผลิตเยื่อสูงสุด คือ 77.87±2.57% รองลงมา คือ SAQ3 และ SAQ7 มีค่า 77.73±11.39 และ 77.46±9.46% ตามลำดับ แต่ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 2) สำหรับเยื่อที่ไม่สามารถนำมาผลิตได้ (%Rejects) มีปริมาณที่น้อยมาก ค่าน้อยกว่า 1% ทุกสูตร ไม่ส่งผลต่อการผลิตเยื่อของสูตร SAQ5

สำหรับค่าคัปปานัมเบอร์และระดับลิกนินของเยื่อสูตร SAQ5 มีค่าต่ำสุด คือ 26.0±0.1 และ 3.38±0.01% ตามลำดับ ส่วนสภาพการระบายน้ำ (freeness) บ่งบอกการระบายน้ำของเยื่อ (drainage) พบว่า เยื่อสูตร SAQ5 มีค่าสภาพการระบายน้ำสูงสุดที่ 802.67±63.79 ซีเอสเอฟ สามารถระบายน้ำจากตะแกรงได้ดีและใช้เวลาน้อยสำหรับขั้นตอนการเตรียมขึ้นรูปเยื่อเป็นแผ่นกระดาษ เมื่อพิจารณาความ

คุ้มค่าในการผลิตเยื่อ พบว่า เยื่อสูตร SAQ5 ให้ผลผลิตเยื่อสูงสุด รวมถึงสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความชื้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตกระดาษ ค่าคัปปานัมเบอร์และระดับของลิกนินในระดับต่ำ และสภาพการระบายน้ำสูง ดังนั้น จึงเลือกวิธีการสกัดเยื่อสูตร SAQ5 (โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 (%โดยน้ำหนัก/ปริมาตร) แอนทราควิโนน 0.1 (%โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 140°ซ. เป็นเวลา 60 นาที) (Table 2)

Table 2 Physical and chemical properties of pulps produced from cocoa husk

Production process	pH of pulping liquor	Moisture content (%)	Pulp yield (%)	Reject (%)	Kappa number	Lignin level (%)	Freeness (CSF)
SAQ1	11.64±0.05 a	9.89±3.48 a	74.34±5.80 a	0.20±0.15 a	26.0±0.5 h	3.38±0.07 h	752.33±55.54 ab
SAQ2	11.37±0.03 cd	9.60±2.97 a	70.96±7.14 a	0.05±0.06 a	26.2±0.2 h	3.41±0.02 h	622.00±16.64 c
SAQ3	11.46±0.01 b	10.52±2.66 a	77.73±11.39 a	0.25±0.03 a	31.8±0.2 ef	4.13±0.03 ef	712.67±60.30 abc
SAQ4	11.45±0.03 b	10.34±2.35 a	72.08±11.18 a	0.24±0.04 a	33.6±0.4 d	4.37±0.05 d	711.67±48.95 abc
SAQ5	11.46±0.02 b	14.46±3.52 a	77.87±2.57 a	0.16±0.02 a	26.0±0.1 h	3.38±0.01 h	802.67±63.79 a
SAQ6	11.42±0.01 bc	13.81±3.21 a	74.08±2.00 a	0.21±0.23 a	30.9±0.1 g	4.02±0.01 g	695.00±34.39 abc
SAQ7	11.41±0.03 bc	14.44±3.83 a	77.46±9.46 a	0.34±0.20 a	35.4±0.4 c	4.60±0.05 c	761.33±45.61 ab
SAQ8	11.38±0.01 cd	14.02±2.54 a	62.04±2.51 a	0.26±0.24 a	32.1±0.4 e	4.17±0.05 e	718.33±40.81 abc
SAQ9	11.34±0.00 d	14.50±2.56 a	69.11±1.63 a	0.28±0.15 a	38.9±0.3 a	5.06±0.05 a	711.00±70.77 abc
SAQ10	11.35±0.00 cd	14.03±2.51 a	66.56±5.22 a	0.09±0.01 a	37.8±0.2 b	4.91±0.02 b	654.00±19.05 bc
SAQ11	11.16±0.01 e	14.46±3.41 a	71.84±3.65 a	0.30±0.00 a	31.3±0.3 fg	4.07±0.03 fg	685.33±34.39 abc
SAQ12	11.18±0.06 e	14.36±2.90 a	65.69±3.29 a	0.13±0.01 a	36.0±0.5 c	4.68±0.06 c	663.33±36.86 bc
F-test	**	ns	ns	ns	**	**	**
CV (%)	0.186	23.815	7.547	45.617	0.904	0.904	6.117

Means within the column followed by the same letter are not significantly different at 5% level (p>0.05);

**=significant at 1% level (p<0.01); ns=not significant (p>0.05)

3. การขึ้นรูปกระดาษจากเปลือกโกโก้

เลือกวิธีการสกัดเยื่อสูตร SAQ5 ขึ้นรูปแผ่นกระดาษสูตรที่แตกต่างกัน ด้วยการเติมและไม่เติมสตาร์ชดัดแปร พบว่า สามารถขึ้นรูปกระดาษจากเยื่อเปลือกโกโก้ที่เติมสตาร์ชดัดแปรเพื่อเป็นตัวประสานให้เส้นใย ยึดติดกันได้สมบูรณ์ 3 สูตร ได้แก่ 1) เยื่อเปลือกโกโก้ 5 ก. สตาร์ชดัดแปร 1.5 ก. 2) เยื่อเปลือกโกโก้ 7 ก. สตาร์ชดัดแปร 0.5 ก. และ 3) เยื่อเปลือกโกโก้ 10 ก. สตาร์ชดัดแปร 0.25 ก. (Table 3) ถ้าเพิ่มปริมาณส่วนผสมในปริมาณที่สูงขึ้นไม่สามารถขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษได้ ตะแกรงในการขึ้นรูปตัน สมบัติของกระดาษที่ผลิตได้ พบว่า ค่าความชื้นอยู่ในช่วง 9.32±0.06-9.76±0.10% ความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.60±0.01-0.66±0.00 ก./ลบ.ซม น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษอยู่ในช่วง 41.55±10.19-67.33±12.92 ก./ตร.ม จึงเลือกการขึ้นรูปกระดาษเยื่อเปลือกโกโก้ 10 ก. สตาร์ชดัดแปร 0.25 ก. ซึ่งมีน้ำหนักมาตรฐานสูงสุด และความต้านทานการไหลของอากาศต่ำ12.6±3.3 ปาสคาล.วินาที/ม. ไปผลิตเป็นกระดาษลามิเนต

Table 3 Physical properties of paper sheets produced from pulp of cocoa pod husk

Paper sheet process	Moisture content (%)	Density (g/cm^3)	Air permeability (Pa.s/m)	Basis weight (g/m^2)
Pulp 5 g+starch 1.5 g	9.32±0.06 a	0.60±0.15 a	59.2±14.6 a	41.55±10.19 b
Pulp 7 g+starch 0.5 g	9.31±0.30 a	0.66±0.05 a	12.0±2.7 b	42.32±6.53 b
Pulp10 g+starch 0.25 g	9.76±0.10 a	0.65±0.01 a	12.6±3.3 b	67.33±12.92 a
F-test	ns	ns	**	**
CV (%)	1.668	12.471	24.707	19.725

Means within the column followed by the same letter are not significantly different at 5% level (p>0.05);

**=significant at 1% level (p<0.01), ns=not significant (p>0.05)

Table 4 Physical, mechanical and thermal properties of PBAT for laminating with cocoa pod husk paper

Properties	Value	Standard/method
PBAT pellets		
Density (g/cm^3)	1.24	ISO 1183
Melting point (°C)	145	DSC
Melt flow rate (g/10min) 190°C 2.16 kg	4	ISO 1133
PBAT film		
Thickness (mm)	0.05	ISO 4593:1993
Tensile strength (MPa) - MD	102	ASTM D882-02
Tensile strength (MPa) - CD	55	ASTM D882-02
Elongation at break (%) - MD	114	ASTM D882-02
Elongation at break (%) - CD	72	ASTM D882-02
Oxygen transmission rate (cm^3/m^2.day)	1,291	ASTM D 3985-17
Water vapor transmission rate (g/m^2/day)	142	ASTM E 398-20
Puncture (J)	0.0148	ASTM F 1306-21
Water contact angle (°)	73.6	ASTM D 5946-04
Diiodomethane contact angle (°)	71.0	ASTM D 5946-04
Surface energy (mN/m)	29.26	ASTM D 5946-04
Polar component (mN/m)	11.02	ASTM D 5946-04
Dispersion component (mN/m)	18.24	ASTM D 5946-04
Surface roughness (µm)	0.30	ISO 25178
Transparency (%) at 560 nm	21.88	ASTM D 1746-03

4. การลามิเนตพลาสติกชีวภาพบนกระดาษเปลือกโกโก้

เม็ดพลาสติก PBAT ที่ใช้มีความหนาแน่นสูง จุดหลอมเหลวของพลาสติกที่ไม่สูงมาก และอัตราการหลอมไหลของพลาสติกที่ต่ำเหมาะสำหรับการผลิตพลาสติกแบบแผ่นบางได้ดีโดยพลาสติกที่ได้มีความสม่ำเสมอตลอดการขึ้นรูป (Table 4) สามารถเป่าขึ้นรูปพลาสติกในรูปแบบของท่อได้อย่างต่อเนื่อง (Figure 2) สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของพลาสติกที่ได้จากการขึ้นรูปนั้นเพื่อประยุกต์ใช้งานสำหรับการลามิเนตกระดาษได้อย่างเหมาะสม (Table 4) พลังงานพื้นผิว 29.26 มิลลินิวตัน/ม. ส่งผลต่อการเกิดพันธะมีขั้ว (polar component) ที่ต่ำ เนื่องจากพลังงานพื้นผิวประกอบด้วย polar component เช่น พันธะไฮโดรเจน เป็นต้น ซึ่งถ้าค่า polar component มีค่าต่ำแสดงให้เห็นว่ามีความชอบน้ำต่ำ ลักษณะจุลสัณฐานวิทยาของมุมสัมผัสใช้สารที่อยู่ในสถานะของเหลว 2 ชนิด ได้แก่ น้ำ (25℃.) 73.6° ทนต่อการสัมผัสของน้ำ และไดไอโอโดมีเทนเพื่อทดสอบการทนต่อของเหลวที่ไม่มีขั้ว 71.0° ทนไขมันและน้ำมันได้ดี (โสรญา, 2560) และความขรุขระของพลาสติก PBAT มีลักษณะปรากฏไม่สม่ำเสมอมีค่า 0.30 ไมโครเมตร ส่งผลต่อการยึดติดกับวัสดุชนิดอื่นได้เป็นอย่างดี (Figure 3)



Figure 2 PBAT pellets for biodegradable plastic (a), blown film production form PBAT (b-c) and PBAT film (d) with its low melt flow rate, it is ideal for producing plastic with uniformity throughout the forming process

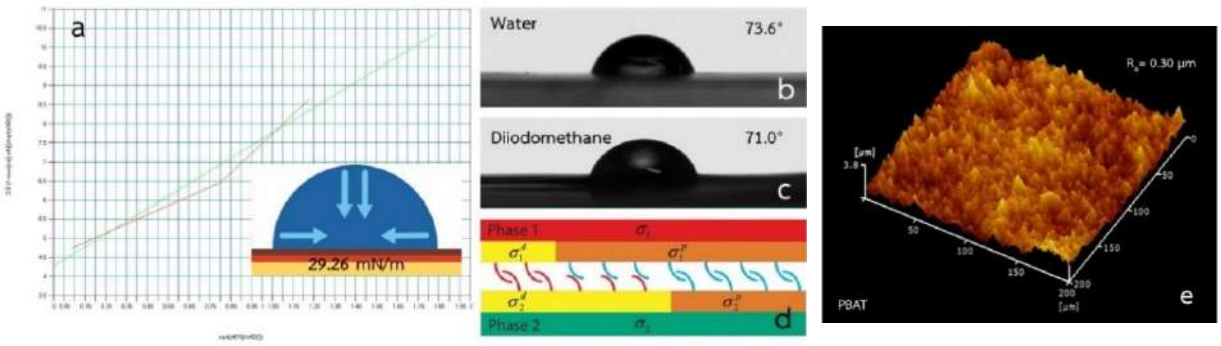


Figure 3 Surface energy (a), contact angle (b, c) micromorphology, polar and dispersion component (d) and roughness (e) of PBAT film for laminating with cocoa pod husk paper

สูตรเยื่อเปลือกโกโก้ 10 ก. สตาร์ชดัดแปร 0.25 ก. ที่ให้สมบัติดีที่สุดจากข้อ 3. โดยมีน้ำหนักมาตรฐานสูงสุดในสูตรที่ทำการผลิตกระดาษรวมถึงความต้านทานการไหลของอากาศต่ำ ลามิเนตด้วยพลาสติกชีวภาพ PBAT เปรียบเทียบกับชุดควบคุมด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบกดอัดร้อนเป็นกระบวนการที่ใช้แรงกดและความร้อนกดอัดให้พลาสติกและกระดาษเชื่อมติดกันได้ กระดาษที่ได้จะมีความเรียบเนียนและแข็งแรงขึ้น พบว่า สามารถลามิเนตกระดาษด้วยพลาสติกชีวภาพ PBAT ทั้งสองด้านของกระดาษได้ทุกกรรมวิธี (สูตร C1-C4) โดยความหนาแน่นของพลาสติกชีวภาพ PBAT มีค่า 1.24 ก./ตร.ซม สอดคล้องกับ Nabels et al. (2022) กล่าวว่า การลามิเนตกระดาษด้วยพลาสติกชีวภาพ ความหนาแน่นของพอลิเมอร์อยู่ระหว่าง 1.23-1.26 ก./ลบ.ซม. พอลิเมอร์มีความสามารถในการจัดเรียงตัวเกิดเป็นชั้นลามิเนตยึดติดกับกระดาษได้ดี และสูตร C4 มีค่าน้ำหนักมาตรฐานและความหนาแน่นสูงสุดที่ 121.56±8.79 ก./ตร.ม และ 1.51±0.20 ก./ลบ.ซม. ตามลำดับอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (Figure 4)

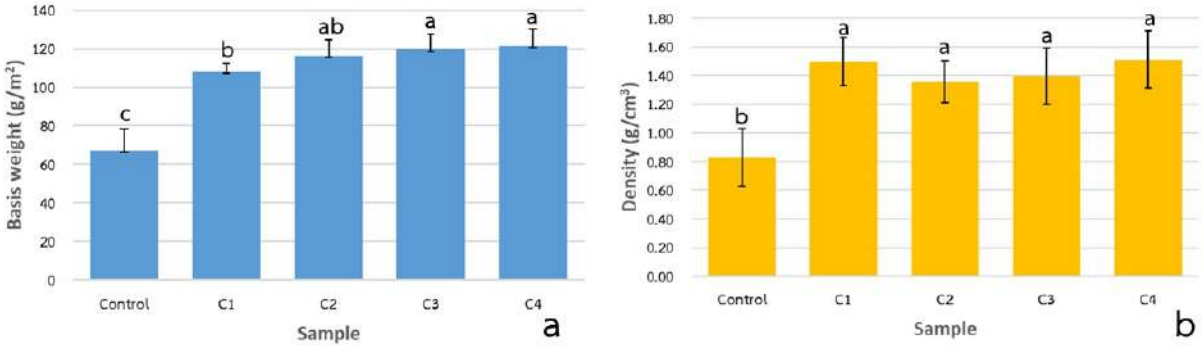


Figure 4 Basis weight (a) and density (b) of PBAT film laminated paper

ค่าความขาวสว่างและความทึบแสงของกระดาษลามิเนตด้วยพลาสติกชีวภาพ PBAT ลดลง โดยกระดาษลามิเนตสูตร C1 มีค่าสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (Table 5) แต่เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของพอลิเมอร์ความขาวสว่างมีแนวโน้มลดลงจากการซ้อนทับกันของพอลิเมอร์แต่ละชั้น รวมถึงตัวพอลิเมอร์ทำให้การทะลุผ่านของแสงเพิ่มขึ้นได้ ส่งผลให้ค่าความทึบแสงลดลง ส่วนการทดสอบแรงทิ่มทะลุ พบว่า กระดาษที่มีจำนวนชั้นลามิเนตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านแรงทิ่มทะลุสูงขึ้นไปด้วย โดยกระดาษลามิเนตสูตร C3 มีค่าสูงสุด รองลงมา คือ กระดาษลามิเนตสูตร C2 ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากจำนวนชั้นของพลาสติกที่น้อยจะปรากฏรูที่มีขนาดเล็กของพลาสติกมากกว่า ทำให้ความต้านแรงทิ่มทะลุต่ำ แต่เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นพลาสติกส่งผลให้ความต้านแรงทิ่มทะลุสูงขึ้น (Riley, 2012) แต่เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของพลาสติกจนถึงระดับหนึ่งค่าความต้านแรงทิ่มทะลุต่ำลง อาจเนื่องมาจากการสะสมความร้อนในขณะที่ทำการลามิเนตมากจนเกินไป ส่งผลต่อการทำลายพันธะที่เชื่อมต่อกันของพลาสติกแต่ละชั้นทำให้ความแข็งแรงลดลงซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากกระดาษลามิเนตสูตร C4 ดังนั้น จึงเลือกกระดาษลามิเนตสูตร C3 สำหรับการทดสอบกับผลิตภัณฑ์เบเกอรีเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด

Table 5 Optical and mechanical properties of PBAT film laminated paper from cocoa pod pulp 10 g and modified starch 0.25 g

Sample	Brightness (%)	Opacity (%)	Puncture (J)
Control	6.12±0.04 d	88.26±0.20 c	0.0056±0.0001 d
C1: PBAT 2 layer/paper/PBAT 2 layer	7.45±0.03 a	97.30±0.18 a	0.0152±0.0002 c
C2: PBAT 3 layer/paper/PBAT 3 layer	7.39±0.00 b	95.90±0.62 b	0.0181±0.0003 a
C3: PBAT 4 layer/paper/PBAT 4 layer	6.64±0.00 c	86.80±0.10 d	0.0182±0.0002 a
C4: PBAT 5 layer/paper/PBAT 5 layer	6.65±0.00 c	81.90±0.07 e	0.0162±0.0001 b
F-test	**	**	**
CV (%)	0.303	0.257	1.309

Means within the column followed by the same letter are not significantly different at 5% level (p>0.05);

**=significant at 1% level (p<0.01)

การต้านทานการซึมผ่านของไขมันและน้ำมันของกระดาษลามิเนตสูตร C3 ขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุในรูปแบบของจานกระดาษ พบว่า สามารถต้านทานการซึมผ่านของไขมันและน้ำมันจากผลิตภัณฑ์เบเกอรีได้ทุกชนิด เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที (Table 6) โดยค่าพลังงานพื้นผิว (surface energy) มีค่าต่ำ ซึ่งกำลังการดูดซับที่ต่ำของพอลิเมอร์หรือวัสดุนั้นๆ ส่งผลให้มุมสัมผัส (contact angle) ที่ได้มีค่าสูง (Choi et al., 2019) เสมือนเกราะป้องกันไม่ให้โมเลกุลของไขมันหรือน้ำมันซึมผ่านไปได้ และชั้นของพอลิเมอร์ที่ใช้ลามิเนตมีจำนวนชั้นมากพอช่วยลดการซึมผ่านของไขมันหรือน้ำมันได้ (Tayeb et al., 2020) อย่างไรก็ตามก่อนนำไปใช้งานจริง ควรเพิ่มการทดสอบวัสดุสัมผัสอาหารของกระดาษและพลาสติก PBAT โดยการทดสอบกระดาษใช้แบบอาหารจำลอง ได้แก่ เอทานอล 50 และ 95% และอาหารจริง วิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) เพื่อตรวจสารที่อาจย้ายออกมา (Zubiaguirre et al., 2021) พลาสติกใช้แบบอาหารจำลอง ได้แก่ เอทานอล 10 และ 95% กรดอะซิติก 3% พร้อมใช้เทคนิควิเคราะห์ด้วย GC-MS และวิเคราะห์การแยกและระบุสารในตัวอย่างโดยละเอียด (UHPLC-Q-TOF-MS) เพื่อหาสารจากพลาสติกย้ายออกไปสู่อาหาร (Wongphan et al., 2025)

Table 6 Effect of bakery products on the fat and oil barrier of paperboard containers (C3)

Product type	Bread	Cake	Biscuits/cookie	Pastries
Category	Sausage with mayonnaise filled bread*	Butter cake*	Almond mixed butter cookies*	Milk flavored croissant*
				
Fat and oil penetration levels	0	0	0	0

* Commercial products from convenience stores and specify the ingredients (listed in descending order of percentage)

0 = no penetration observed; 1 = partial penetration or staining observed; 2 = full penetration through the surface

ต้นทุนการผลิตบรรจุภัณฑ์จากเปลือกโกโก้

การผลิตเยื่อจากเปลือกโกโก้ สูตร SAQ5 เปลือกโกโก้แห้ง 100 ก. ได้เยื่อ 77.87 ก. (โดยไม่รวมค่าวัตถุดิบซึ่งเป็นผลพลอยได้ รวมทั้งค่าพลังงานและอุปกรณ์) ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 ก. ราคา 91.0 บาท และแอน ทราควิโนน 1 ก. ราคา 1.89 บาท รวม 92.89 บาท

การผลิตจานกระดาษลามิเนตพลาสติกชีวภาพ PBAT สูตร C3 1 ใบ ใช้เยื่อเปลือกโกโก้ 10 ก. มูลค่า 11.92 บาท (92.89 บาท x 10 ก./77.87 ก.) เม็ดพลาสติก PBAT ชนิดเกรดเป่าฟิล์ม ขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก ราคา 160 บาท/กก. สำหรับลามิเนตกระดาษสูตร C3 ใช้น้ำหนักฟิล์ม 3 ก. คิดเป็นมูลค่า 0.48 บาท (160 บาท x 3 ก./1,000 ก.) รวมทั้งสิ้น 12.40 บาท (11.92 บาท + 0.48 บาท) ทั้งนี้ไม่รวมค่าวัตถุดิบซึ่งเป็นผลพลอยได้ รวมทั้งค่าพลังงานและอุปกรณ์

การผลิตบรรจุภัณฑ์จากเปลือกโกโก้มีความคุ้มค่า เนื่องจากเป็นการเพิ่มมูลค่าให้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร แม้ว่าต้นทุนเริ่มต้นอาจอยู่ในระดับสูง แต่เมื่อขยายการผลิตสู่ระดับอุตสาหกรรมต้นทุนต่อหน่วยมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ ความสามารถในการแข่งขันด้านราคาขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต โดยแนวทางการพัฒนาควรมุ่งเน้นการสร้างมูลค่าเพิ่มด้านความยั่งยืนและการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนอย่างคุ้มค่า เนื่องจากเปลือกโกโก้เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมแปรรูปที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้

สรุปผลการทดลอง

กระดาษจากเยื่อเปลือกโกโก้ที่ลามิเนตด้วยพลาสติกชีวภาพ PBAT เพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์แบบคงรูปชนิดใช้แล้วทิ้งกับผลิตภัณฑ์เบเกอรี พบว่า เปลือกโกโก้ให้ปริมาณเยื่อสูงสุดถึง 77.87±2.57% ด้วยวิธีการสกัดเยื่อสูตร SAQ5 (โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 (%โดยน้ำหนัก/ปริมาตร) แอนทราควิโนน 0.1 (%โดยน้ำหนัก/น้ำหนัก) ที่อุณหภูมิ 140°ซ. เป็นเวลา 60 นาที) และเมื่อนำเยื่อที่ได้โดยเติมสตาร์ชดัดแปรสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษได้ และจากการลามิเนตกระดาษด้วยพลาสติกชีวภาพ PBAT 4 ชั้น/กระดาษ/PBAT 4 ชั้น มีสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ เชิงกลและกายภาพโดยรวมดีกว่ากรรมวิธีอื่น ๆ เมื่อขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์สามารถต้านทานการซึมผ่านของไขมันและน้ำมัน จึงเหมาะสำหรับการพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ชนิดใช้แล้วทิ้งสำหรับเบเกอรีได้

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ขอขอบคุณข้าราชการ พนักงานราชการ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

ธัญญารัตน์ จิญกาญจน์. 2557. การทดสอบกระดาษและบรรจุภัณฑ์กระดาษ. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท Asia digital การพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ. 130 หน้า.

รมณีย์ หวังดีธรรม กิตติภณ เจริญพรพิทักษ์ ไพศักดิ์ อนันท์นุกูล และยุทธนันท์ สิงค์คำมา. 2554. การศึกษากระบวนการผลิตเยื่อกระดาษจากสบู่ดำ. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 84 หน้า.

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2562. การประเมินและการเพิ่มอายุการเก็บผลิตภัณฑ์อาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 2. บริษัท โอ. เอส. พริ้นติ้ง เฮ้าส์ จำกัด, กรุงเทพฯ. 397 หน้า.

โสรญา เรืองดิษฐ์. 2560. การดัดแปลงเมมเบรนพอลิซัลโฟนสำหรับการแยกแก๊ส CO_2/CH_4 โดยเทคนิคพลาสมากระแสตรง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 92 หน้า.

Akpabio, U.D., I.E. Effiong and A.E. Akpakpan. 2012. Preparation of pulp and cellulose acetate from Nypa palm leaves. International Journal of Environment and Bioenergy 1(3): 179-194.

Choi, H.J., M.S. Kim, D. Ahn, S.Y. Yeo and S. Lee. 2019. Electrical percolation threshold of carbon black in a polymer matrix and its application to antistatic fibre. Scientific Reports 9(1): 6338.

Córdova, B.M., J.P.S. Cruz, T.V. Ocampo, R.G.H. Palomino and A.M.B. Moncada. 2020. Simultaneous adsorption of a ternary mixture of brilliant green, rhodamine B and methyl orange as artificial wastewater onto biochar from cocoa pod husk waste. Quantification of dyes using the derivative spectrophotometry method. New Journal of Chemistry. 44: 8303-8316.

Daud, Z., H. Awang, A.S.M. Kassim, M.Z.M. Hatta and A.M. Aripin. 2014. Cocoa pod husk and corn stalk: alternative paper fibres. Advanced Materials Research. 911: 331–335.

Guiné, R.P.F. 2022. Textural properties of bakery products: A review of instrumental and sensory evaluation studies. Applied Sciences. 12(17): 8628.

Li, G., S. Shankar, J.W. Rhim and B.Y. Oh. 2015. Effects of preparation method on properties of poly (butylene adipate-co-terephthalate) films. Food Science and Biotechnology. 24(5): 1679-1685.

Lu, F., J.R. Garcia, I.V. Damme, N.J. Westwood, L. Shaw, J.S. Robinson, G. Warren, A. Chatzifragkou, S.M. Mason, L. Gomez, L. Faas, K. Balcombe, C. Srinivasan, F. Picchioni, P. Hdley and D. Charalampopoulos. 2018. Valorisation strategies for cocoa pod husk and its fractions. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry 14: 80-88.

Mannai, F., M. Aammar, J.G. Yanez, E. Elaloui and Y. Moussaoui. 2017. Alkaline delignification of cactus fibres for pulp and papermaking applications. Journal of Polymers and the Environment. 26(2): 798–806.

Murray, R., S. Bachu, C. Pemberton and R. Birch. 2021. Investigation of the impact of aging upon the mechanical properties of cocoa pod husk. Pelita Perkebunan. 37(2): 146-165.

Nabels, S.M., O. Platnieks, L. Grase and S. Gaidukovs. 2022. Lamination of cast hemp paper with bio-based plastics for sustainable packaging: Structure-thermomechanical properties relationship and biodegradation studies. Journal of Composites Science. 6(9): 246.

Oddoye, E.O.K., C.K.A. Badu and E.G. Akoto. 2012. Cocoa and Its By-Products: Identification and Utilization. pp. 23-37. In: Chocolate in Health and Nutrition, R.W. Ronald, V.R. Preedy and S. Zibadi (eds.). Humana Press, Totowa, NJ.

Riley, A. 2012. Plastics Manufacturing Processes for Packaging Materials. pp. 310-360. In: Packaging Technology Fundamentals, Materials and Processes, A. Emblem and H. Emblem (eds). Woodhead Publishing Limited.

Tayeb, A.H., M. Tajvidi and D. Bousfield. 2020. Paper-based oil barrier packaging using lignin-containing cellulose nanofibrils. Molecules. 25(6): 1344.

Vandenberghe, L.P.S., K.K.V. Diestra, G.A. Bittencourt, A.F.M. Mello, Z.S. Vásquez, P.Z. Oliveira, G.V.M. Pereira and C.R. Soccol. 2022. Added-value biomolecules' production from cocoa pod husks: A review. Bioresource Technology. 344: 126252.

Wongphan, P., E. Canellas, C. Nerín, C. Estremera, N. Harnkarnsujarit and P. Vera. 2025. Screening and relative quantification of migration from novel thermoplastic starch and PBAT blend packaging. Foods. 14: 1-16.

Zubiaguirre, L.B., I. Zabaleta, A. Prieto, M. Olivares, O. Zuloaga and M.P. Elizalde. 2021. Migration of photoinitiators, phthalates and plasticizers from paper and cardboard materials into different simulants and foodstuffs. Food Chemistry. 344: 1-8.