

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

แววบุญ แยมแสงสังข์

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

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

Weawboon Yamsaengsung

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

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

วันที่รับบทความ 29 มกราคม 2569

วันแก้ไขบทความ 6 กุมภาพันธ์ 2569

วันตอบรับบทความ 11 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

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

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์, กล้วยหอม, กระดาษฟางข้าว, กระดาษรีไซเคิล

ABSTRACT

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

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

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

1. บทนำ

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

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการเปลี่ยนเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีมูลค่าต่ำอย่างฟางข้าว ซึ่งมักถูกกำจัดด้วยการเผาในที่โล่งจนก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศในวงกว้าง ให้กลายเป็นทรัพยากรต้นน้ำที่มีมูลค่าสูง ทั้งในบทบาทของเส้นใยเสริมแรงเชิงกลและสารดูดซับเอทิลีน และการผสมเส้นใยฟางข้าวกับเยื่อกระดาษรีไซเคิล ช่วยยกระดับมูลค่าขยะจากกระบวนการอุตสาหกรรมและชุมชน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติในการควบคุมบรรยากาศและ ชะลอการเสื่อมสภาพของผลผลิตทางการเกษตรได้และมีคุณสมบัติในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ส่งเสริมแนวคิดวัสดุหมุนเวียนซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการลดการพึ่งพาพลาสติกสังเคราะห์ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร

งานวิจัยนี้เป็นการนำกระดาษเคลือบถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากฟางข้าวผสมกับกระดาษรีไซเคิล นำมาเป็นวัสดุดูดซับเอทิลีน เพื่อศึกษาสมบัติในการชะลอการสุกของกล้วยหอมที่บรรจุในกล่องกระดาษลูกฟูก โดยเปรียบเทียบกับสารดูดซับเอทิลีนทางการค้า โดยพื้นฐานเป็นกระดาษที่ผลิตจากฟางข้าวผสมกับกระดาษรีไซเคิล นำมาเคลือบด้วยถ่าน กัมมันต์ 30% โดยกระดาษรีไซเคิลเป็นของเสียแบบปฐมภูมิที่ได้จากการตัดเจียนภายในสำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาสมบัติในการชะลอการสุกของกล้วยหอมทอง โดยใช้กระดาษเคลือบถ่านกัมมันต์ ร้อยละ 30 ที่ผลิตจากฟางข้าวผสมกับกระดาษรีไซเคิล

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

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

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

3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

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

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

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

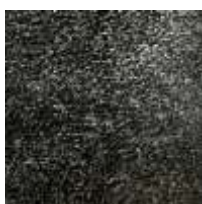
แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาจะมีการศึกษาการเคลือบถ่านกัมมันต์บนกระดาษเชิงพาณิชย์ หรือการผลิตกระดาษจากเส้นใยพืชชนิดต่างๆ แต่ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ เส้นใยฟางข้าวผสมกับเยื่อกระดาษรีไซเคิล เพื่อเป็นโครงสร้างฐาน (Substrate) สำหรับการเคลือบผิวด้วยถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้งานวิจัยส่วนใหญ่มักจำกัดขอบเขตเพียงการวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นฐานของวัสดุในห้องปฏิบัติการ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

4. วิธีดำเนินงานวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

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



(ก) กระดาษที่ผลิตจากเส้นใยฟางข้าวผสมเส้นใยกระดาษรีไซเคิล



(ข) สารดูดเอทิลีนทางการค้า



(ค) กล่องกระดาษลูกฟูก

ภาพที่ 1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง



(ง) กัลลย



(จ) ทำเครื่องหมายที่ผลกัลลย

ภาพที่ 2 กัลลยที่ใช้ในการทดลอง

กัลลยหอมทอง คัดเลือกกัลลยหอมที่ระยะเก็บเกี่ยวเพื่อการค้า ที่มีขนาด สี รูปร่าง และน้ำหนัก ใกล้เคียงกัน เก็บมาจากสวนเดียวกัน ปราศจากแมลงและรอยตำหนิ ความสมบูรณ์ของกัลลยหอมร้อยละ 75-80 นำมาเช็ดทำความสะอาดด้วยผ้าแห้ง ทำการติตรหัส ติดสติ๊กเกอร์แสดงตำแหน่งในการวัดค่าสี เพื่อให้วัดที่จุดเดียวกัน โดยกำหนด 3 ตำแหน่งได้แก่ ตำแหน่งด้านหัว ตำแหน่งตรงกลาง และตำแหน่งด้านปลายของผลกัลลย

4.2 การออกแบบการทดลอง

ได้ออกแบบการทดลอง 4 ชุดการทดลอง แสดงในภาพที่ 3 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- (1) ชุดควบคุม บรรจุกัลลยหอม 1 ลูก ลงในกล่องกระดาษลูกฟูก
 - (2) บรรจุกัลลยหอม 1 ลูก ลงในกล่องกระดาษลูกฟูก ที่ผาด้านบนของกล่องกระดาษลูกฟูก มีกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบผงถ่านกัมมันต์ แผ่นเล็กติดไว้
 - (3) บรรจุกัลลยหอม 1 ลูก ลงในกล่องกระดาษลูกฟูก ที่ผาด้านบนของกล่องกระดาษลูกฟูก มีกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิลเคลือบผงถ่านกัมมันต์ แผ่นใหญ่ติดไว้
 - (4) บรรจุกัลลยหอม 1 ลูก ลงในกล่องกระดาษลูกฟูก และใส่สารดูดเอทิลีนทางการค้า จำนวน 1 ซอง
- ทำการเก็บกัลลยหอมในกล่องกระดาษลูกฟูก จำนวน 1 ผลต่อกล่อง คิดเป็น 1 ชุดการทดลอง โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ เก็บในห้องอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 0, 3, 6, 9, 12 และ 15 วัน และบันทึกผล

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

AC = กระดาษฟางข้าวผสมกระดาษรีไซเคิล

EA= ซองสารดูดเอทิลีน

ภาพที่ 3 การออกแบบการทดลอง

4.3 การทดสอบสมบัติของกล้วย

การศึกษาร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของกล้วยหอม โดยชั่งน้ำหนักกล้วยในแต่ละชุดทดลอง โดยวัดผลทุก 3 วัน ซึ่งจะหยุดบันทึกผลเมื่อเปลือกของกล้วยหอมเปลี่ยนเป็นสีดำเกินกว่าร้อยละ 70 และทำการบันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดการเก็บรักษา โดยคิดเป็นร้อยละการสูญเสียน้ำหนักดังนี้

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

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

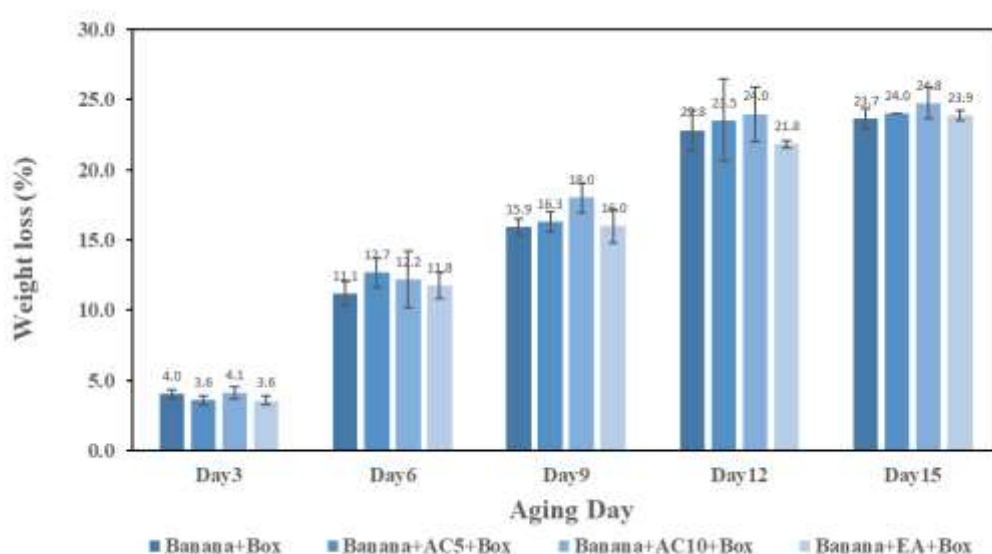
การศึกษาความแน่นเนื้อของกล้วย โดยใช้เครื่อง Universal Testing machine (Hounsfield) ทดสอบการต้านทานแรงกด (Crush test)

การศึกษาปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของกล้วย โดยใช้เครื่อง Hand Refractometer (MASTER-M Brix Atago)

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

5.1 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของกล้วยหอม

ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของกล้วยหอมดังแสดงในภาพที่ 4 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของกล้วยหอม ภายในระยะเวลาในการเก็บรักษา 15 วัน ของชุดการทดลอง 4 รูปแบบ



ภาพที่ 4 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของกล้วยหอม

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

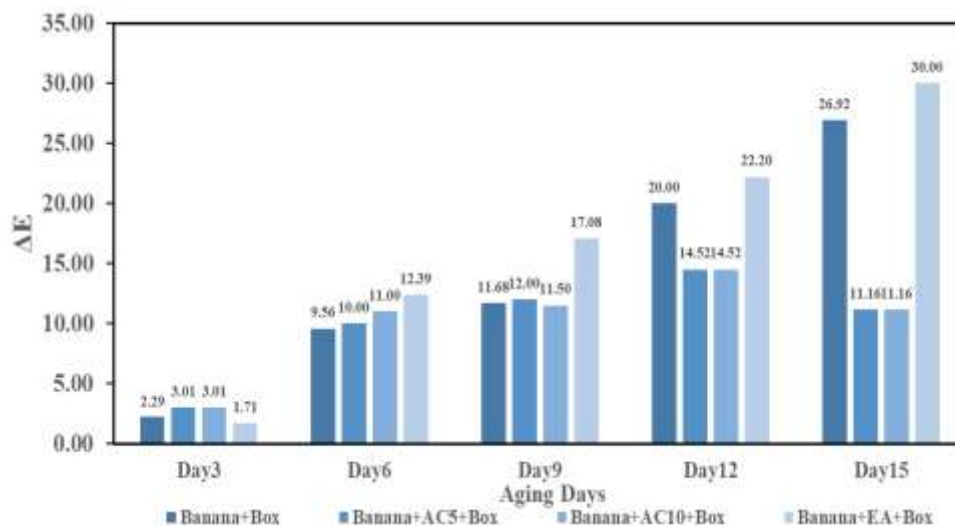
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองพบว่าชุดใส่สารดูดซับเอทิลีนมีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด รองลงมาคือชุดควบคุมที่ไม่ใส่สารดูดซับเอทิลีน กระดาษเคลือบผงถ่านขนาดเล็กและขนาดใหญ่ตามลำดับ (AC5 และ AC10) ซึ่ง

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

5.2 การเปลี่ยนแปลงของค่าสีของกล้วยหอม

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

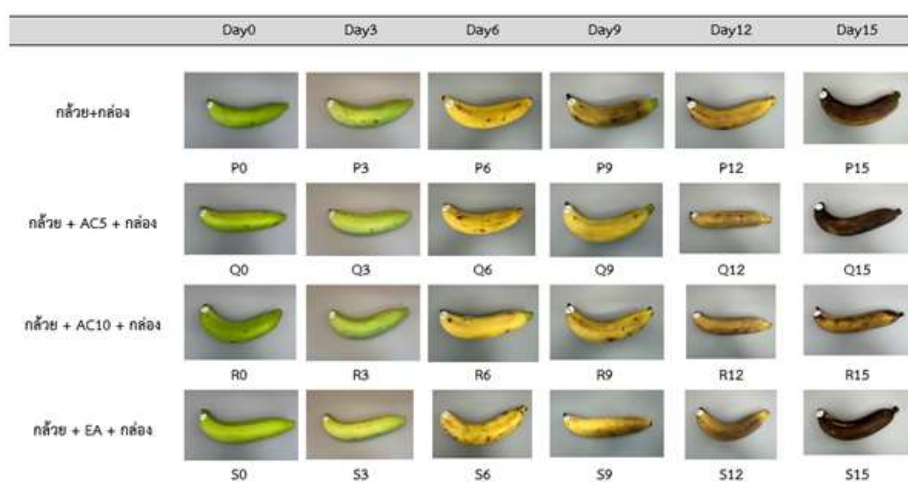
ผลการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาการบรรจุกล้วยเพิ่มมากขึ้น กล้วยหอมจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าสีเพิ่มขึ้นในทุกชุดการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองพบว่า การบรรจุกล้วยพร้อมกับกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ขนาด มีแนวโน้มที่จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสีน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับบรรจุกล้วยในชุดควบคุมที่ไม่ใส่สารดูดซับเอทิลีน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



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

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

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

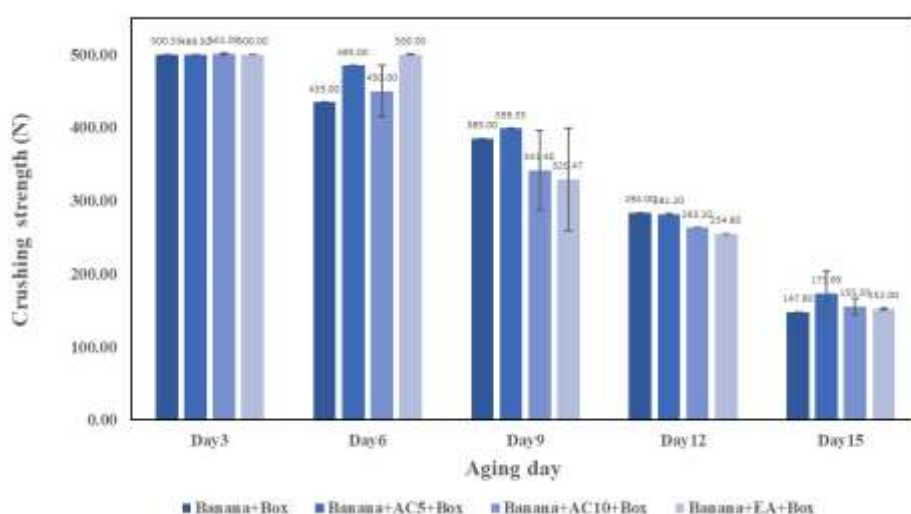


ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงสีของกล้วย

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

5.3 ความแน่นเนื้อของกล้วย

ความแน่นเนื้อของกล้วยหอมแสดงในภาพที่ 7 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นเนื้อของกล้วยหอม ของชุดการทดลอง 4 รูปแบบ

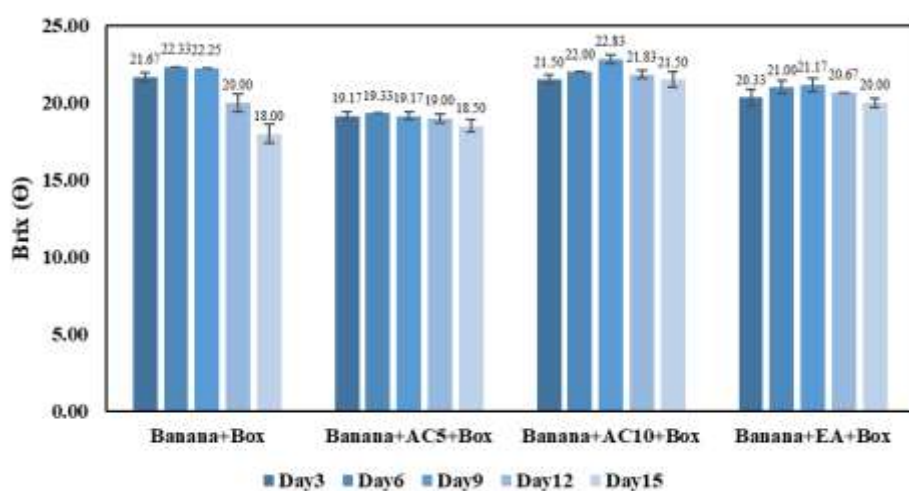


ภาพที่ 7 ความแน่นเนื้อของกล้วยหอม

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

5.4 ศึกษาปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้

ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของกล้วยหรือค่าความหวาน แสดงในภาพที่ 8 โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ หรือค่าความหวานของกล้วย



ภาพที่ 8 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้

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

6. สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

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

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

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

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

7. ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยพบว่าผงถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุธรรมชาติที่ผลิตได้ภายในประเทศ มีศักยภาพในการชะลอการสุกของกล้วยหอม ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้านสมรรถนะการดูดซับเอทิลีนโดยตรง และการพัฒนารูปแบบการบรรจุผงถ่านกัมมันต์ลงในบรรจุภัณฑ์ ในการออกแบบเพื่อป้องกันผงถ่านไม่ให้หลุดร่วงลงไปสัมผัสกับผลไม้ที่บรรจุอยู่ภายใน หรือออกแบบให้สะดวกต่อการใช้งาน เช่น ทำเป็นสติ๊กเกอร์ติดภายในบรรจุภัณฑ์ หรือใส่ในรูปแบบซอง เพื่อขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้งานและให้ความหลากหลายมากยิ่งขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัยนวัตกรรม จากมหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีการพิมพ์และบรรจุภัณฑ์และกลุ่มวิจัย P-Prof มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย

9. เอกสารอ้างอิง

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

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

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