

บทที่ 4

ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ผลการทดลอง แบ่งออกเป็น 5 ตอน คือ ตอนที่ 1 ศึกษาวิธีที่เหมาะสมในการเตรียมเยื่อกระดาษจากฟางข้าวและเยื่อจากกระดาษใช้แล้ว ตอนที่ 2 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างเส้นใยฟางข้าวกับเส้นใยกระดาษใช้แล้วในการผลิตเป็นกระดาษ ตอนที่ 3 ศึกษาปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่เหมาะสมที่เติมลงในกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษใช้แล้วเพื่อปรับปรุงความแข็งแรงของกระดาษ ตอนที่ 4 ศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่เติมลงในกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษใช้แล้ว ตอนที่ 5 เพื่อศึกษาสมบัติในการชะลอการสุกของกล้วยหอมของกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษใช้แล้วและผงถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาวิธีที่เหมาะสมในการเตรียมเยื่อกระดาษจากฟางข้าวและเยื่อกระดาษใช้แล้ว ด้วยวิธีโซดาและวิธีหมักน้ำ

1. วิธีโซดา ทำโดยแช่ฟางข้าว ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 2% w/w เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำให้สะอาด นำเข้าเครื่องตีเยื่อแล้งจึง นำไปอบให้แห้ง

2. วิธีหมักน้ำ นำกระดาษใช้แล้วมาแช่น้ำไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำมาปั่นด้วยเครื่องปั่นจากนั้น นำไปอบให้แห้ง และทำการศึกษาสมบัติลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใย ด้วยเครื่องทดสอบ

ตอนที่ 1.1 ศึกษาวิธีเตรียมเส้นใยฟางข้าวด้วยวิธีโซดา

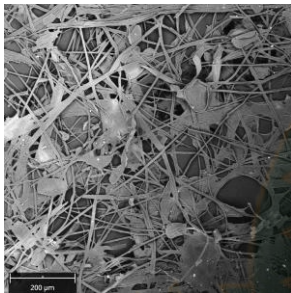
ฟางข้าวพันธุ์ข้าวเหนียว กข22 นำมาตัดให้มีขนาด 3-5 เซนติเมตร แช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2% (w/w) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำเส้นใยมาล้างด้วยน้ำเปล่าจนค่า pH เป็นกลาง

จากการทดลองพบว่าเมื่อฟางข้าวผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้ว เดิมฟางข้าวที่มีลักษณะเป็นท่อนแข็งทรงกระบอกกลวง จะกลายเป็นเส้นใยฟางข้าวที่มีขนาดเล็กอ่อนนุ่ม แยกออกจากกันมีสีเหลืองอ่อน ดังแสดงในภาพที่ 4.1

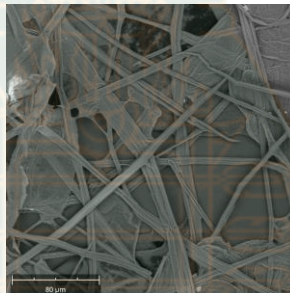


ภาพที่ 4.1 เส้นใยฟางข้าว

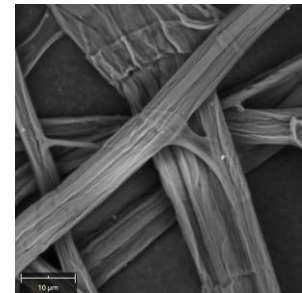
เมื่อนำเส้นใยฟางข้าวไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังไฟ 10 KV ความดัน 0.1 Pa ที่กำลังขยายต่าง ๆ ตั้งแต่ 300, 1,000 และ 5,000 เท่า พบว่าเส้นใยฟางข้าวมีลักษณะเป็นเส้นใยเดี่ยว เส้นใยมีขนาดเล็ก มีลักษณะเป็นทอกลมยาว แต่ละเส้นใยมีขนาดอยู่ในช่วง 10–30 ไมครอน ดังแสดงในภาพที่ 4.2



กำลังขยาย 300 เท่า



กำลังขยาย 1,000 เท่า



กำลังขยาย 5,000 เท่า

ภาพที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของเส้นใยฟางข้าวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 300, 1,000 และ 3,000 เท่า

ตอนที่ 1.2 ศึกษาวิธีเตรียมเยื่อกระดาษใช้แล้วด้วยวิธีหมักน้ำ

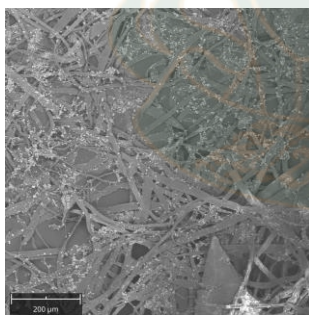
กระดาษใช้แล้วในงานวิจัยนี้เป็นกระดาษที่เหลือจากกระบวนการตัดเจียนขอบตำราเรียน มสธ. นำมาแช่ในน้ำกลั่น 24 ชั่วโมง ตีเยื่อด้วยเครื่องตีเยื่อความเร็วรอบ 1,792 รอบต่อ นาที เป็นเวลา 30 วินาที

จากการทดลองพบว่าเมื่อกระดาษใช้แล้วผ่านการแช่น้ำและผ่านกระบวนการตีเยื่อแล้ว จากกระดาษใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นแผ่นแข็งเรียบมีลักษณะเป็นแถบยาว จะกลายเป็นเส้นใย สั้น ๆ มีขนาดเล็กลงมาก มีความอ่อนนุ่ม กระจุกตัวกันเป็นก้อน มีสีขาวคงเดิม แสดงในภาพที่ 4.3

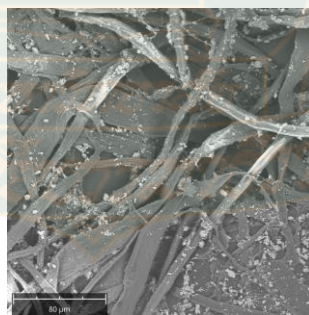


ภาพที่ 4.3 เส้นใยกระดาษใช้แล้ว

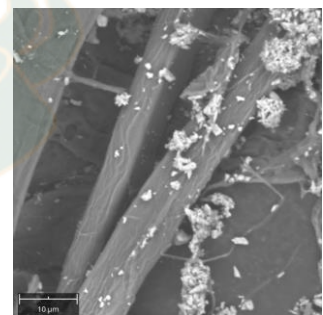
เมื่อนำเส้นใยกระดาษใช้แล้วไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังไฟ 10 KV ความดัน 0.1 Pa ที่กำลังขยาย 300, 1,000 และ 5,000 เท่า พบว่าเส้นใยกระดาษใช้แล้วมีลักษณะเป็นเส้นใยเดี่ยว เป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีลักษณะเป็นเส้นยาว ส่วนใหญ่มีรูปทรงแบน เนื่องจากเป็นเส้นใยที่ผ่านกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม เส้นใยต้องเคลื่อนที่ผ่านลูกกลิ้งจำนวนมาก ทำให้เส้นใยมีลักษณะลึบแบน และแตกออกจากกัน เส้นใยกระดาษใช้แล้วมีทั้งเส้นใยที่เป็นเส้นตรง และเส้นใยที่เป็นเส้นโค้ง แต่เส้นใยมีขนาดอยู่ในช่วง 1-10 ไมครอน และยังพบก้อนกลมสีขาวขนาดประมาณ 0.5 ไมครอน กระจายอยู่ทั่วเส้นใย ทั้งแบบกระจุกตัวเป็นกลุ่ม และแบบเม็ดเดี่ยว ๆ คาดว่าจะเป็นสารเติมแต่งที่เติมลงในกระดาษ เพื่อเพิ่มสมบัติความขาว และความแข็งแรงให้กระดาษ เป็นที่น่าสังเกตว่าเส้นใยกระดาษใช้แล้วมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยจากฟางข้าว ดังแสดงในภาพที่ 4.4



กำลังขยาย 300 เท่า



กำลังขยาย 1,000 เท่า



กำลังขยาย 5,000 เท่า

ภาพที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของเส้นใยเส้นใยกระดาษใช้แล้วจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 300, 1,000 และ 5,000 เท่า

วิธีที่เหมาะสมในการเตรียมเชื้อ พบว่าวิธีโซดาเหมาะสำหรับการใช้เตรียมเชื้อจากฟางข้าว เนื่องจากยังจำเป็นต้องใช้สารละลายต่างในการย่อยลิกนินออกจากฟางข้าว และการใช้วิธีหมักน้ำเป็นวิธีที่เหมาะสมในการเตรียมเชื้อกระดาษใช้แล้ว เพราะกระดาษเคยผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้ว หากใช้วิธีโซดาอีกเป็นครั้งที่ 2 อาจทำให้เส้นใยที่ได้มีขนาดสั้นลงและทำให้สมบัติเชิงกลของกระดาษลดลงได้



ตอนที่ 2 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างเส้นใยฟางข้าวกับเส้นใยกระดาษใช้แล้ว
ในการผลิตเป็นกระดาษดูดซับเอทิลีน

ตอนที่ 2.1 ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างเส้นใยฟางข้าวกับเส้นใยกระดาษใช้แล้ว

นำเส้นใยฟางข้าวที่ปรับสภาพแล้วและเส้นใยใช้แล้วมาชั่งน้ำหนักตามสัดส่วนที่กำหนดไว้ โดยกำหนดอัตราส่วนระหว่างเส้นใยฟางข้าวต่อเส้นใยกระดาษใช้แล้วที่ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ตามลำดับ โดยกำหนดเป็นชุดทดลอง A1 ถึง A5 ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนระหว่างเส้นใยฟางข้าวต่อเส้นใยกระดาษใช้แล้ว

	Rice Straw (%)	Waste Paper (%)
Formula A1	100	0
Formula A2	75	25
Formula A3	50	50
Formula A4	25	75
Formula A5	0	100

นำเส้นใยฟางข้าวที่ปรับสภาพและเส้นใยใช้แล้วที่ชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่กำหนดมาเติมน้ำแล้วผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องตีเยื่อ LABTECH ความเร็วรอบ 1,792 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที ในทุกชุดการทดลอง จากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นกระดาษด้วยแม่พิมพ์ขนาด 25 x 25 เซนติเมตร แล้งจึงนำแม่พิมพ์กระดาษมาตากให้แห้งเป็นเวลา 1 วัน เมื่อกระดาษแห้งแล้วให้ลอกกระดาษออกจากแม่พิมพ์ และเก็บกระดาษไว้ในที่แห้ง

ในภาพที่ 4.5 แสดงกระดาษจากเส้นใยฟางข้าวผสมเส้นใยกระดาษใช้แล้วที่อัตราส่วนต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่า สามารถนำเส้นใยฟางข้าวและเส้นใยใช้แล้วมาขึ้นรูปเป็นแผ่นกระดาษได้ทุกอัตราส่วน พบว่ากระดาษสูตร A1 ที่มีปริมาณฟางข้าวร้อยละ 100 จะมีสีเหลืองมากที่สุด กระดาษสูตร A5 ที่มีปริมาณกระดาษใช้แล้วร้อยละ 100 จะมีสีขาวที่สุด และไล่เรียงเฉดสีตามลำดับ



A1

A2

A3

A4

A5

ฟาง 100:กระดาษ 0

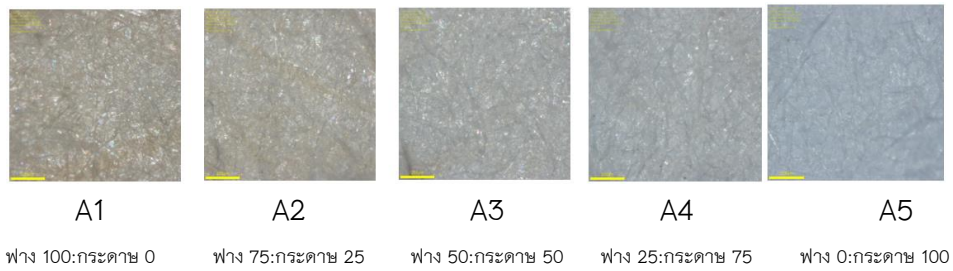
ฟาง 75:กระดาษ 25

ฟาง 50:กระดาษ 50

ฟาง 25:กระดาษ 75

ฟาง 0:กระดาษ 100

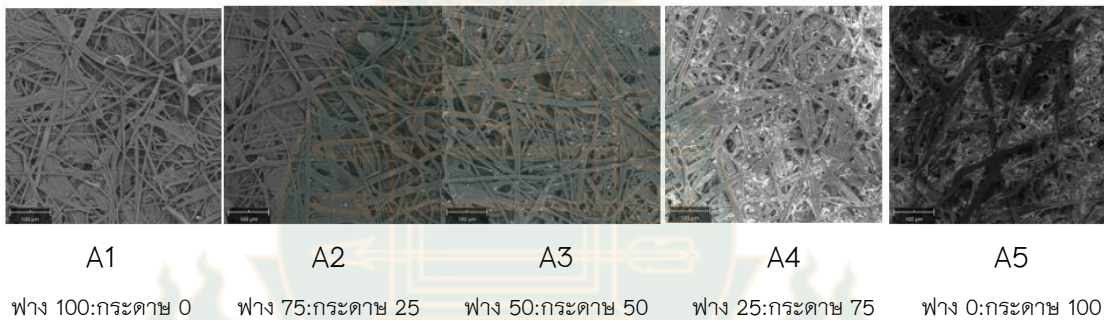
ภาพที่ 4.5 กระดาษจากเส้นใยฟางข้าวผสมเส้นใยกระดาษใช้แล้วที่อัตราส่วนต่าง ๆ



ภาพที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของเส้นใยคาร์บอนใช้แล้วจากกล้องจุลทรรศน์

แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 4 เท่า

จากภาพที่ 4.6 แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยคาร์บอนใช้แล้วจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง Optical Microscope (OM) ด้วยโหมด Bright Field Microscope (BF) ที่กำลังขยาย 4 เท่า พบว่าคาร์บอนเกิดจากเส้นใยจำนวนมากมาเรียงทับกันไปมา จุดที่เส้นใยทับกันไม่สนิทจะเกิดช่องว่างที่แสงส่องผ่านได้ จะเห็นเป็นจุดสว่างในภาพ แสดงว่าคาร์บอนที่มองด้วยตาเปล่าว่าเป็นคาร์บอนแผ่นเรียบที่บดแสง เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง จะพบว่าคาร์บอนมีลักษณะพื้นผิวที่เป็นรูพรุน กระจายอยู่ทั่วผิวนำคาร์บอน



ภาพที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของเส้นใยคาร์บอนใช้แล้วจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

แบบส่องกราด

จากภาพที่ 4.7 แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยคาร์บอนใช้แล้วโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยโหมดสัญญาณภาพจากการวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Detector) ที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่ 15 kV แรงดัน 0.1 Pa. โดยนำชิ้นงานไปเคลือบด้วยทองคำก่อนนำมาทดสอบ

พบว่าสูตร A1 ที่มีปริมาณเส้นใยฟางข้าว 100% เส้นใยมีลักษณะเป็นท่อกลมยาว ในขณะที่สูตร A2-A5 ที่มีปริมาณเส้นใยคาร์บอนใช้แล้วมาผสม เส้นใยมีลักษณะเป็นท่อแบนยาว และมีอนุภาคสีขาวกระจายอยู่ โดยอนุภาคดังกล่าวเมื่อทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ควบคู่กับเครื่องวิเคราะห์ธาตุจากรังสีเอกซ์ (SEM/EDX) ทำการตรวจวัดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image: BEI) พบว่ามีองค์ประกอบ

หลักเป็นธาตุแคลเซียม ดังนั้นอนุภาคสีขาวดังกล่าวจึงน่าจะเป็นสารแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการเพิ่มความขาวที่เติมลงในกระดาษ

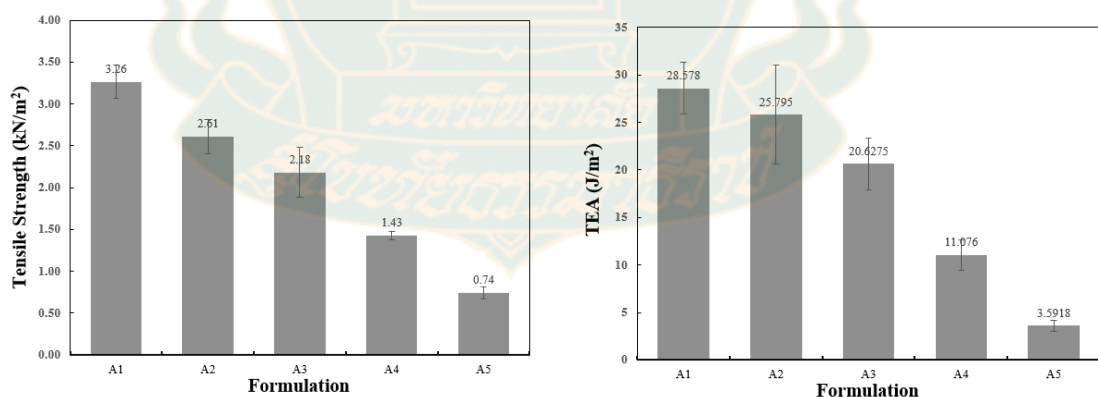
ตอนที่ 2.2 ศึกษาสมบัติของกระดาษจากเส้นใยฟางข้าวที่ปรับสภาพและเส้นใยกระดาษใช้แล้ว

นำกระดาษจากเส้นใยฟางข้าวที่ปรับสภาพและเส้นใยกระดาษใช้แล้วมาทดสอบสมบัติกายภาพ ได้แก่ น้ำหนักกระดาษ ความหนากระดาษ และความหนาแน่นของกระดาษ พบว่า กระดาษที่ได้มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 90–96 กรัมต่อตารางเมตร มีความหนาอยู่ในช่วง 35–40 ไมครอน มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2.29–2.45 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ต่อไป โดยผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของกระดาษแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติกายภาพของกระดาษจากเส้นใยฟางข้าวผสมเส้นใยกระดาษใช้แล้ว

	A1	A2	A3	A4	A5
g/m ³	93.44±0.10	90.10±0.22	96.73±0.13	94.24±0.12	94.53±0.17
Thickness (μ)	37.46±1.8	35.53±2.4	38.26±4.8	40.53±3.1	36.40±2.8
Density (g/cm ³)	2.36±0.04	2.29±0.09	2.45±0.05	2.38±0.05	2.39±0.07

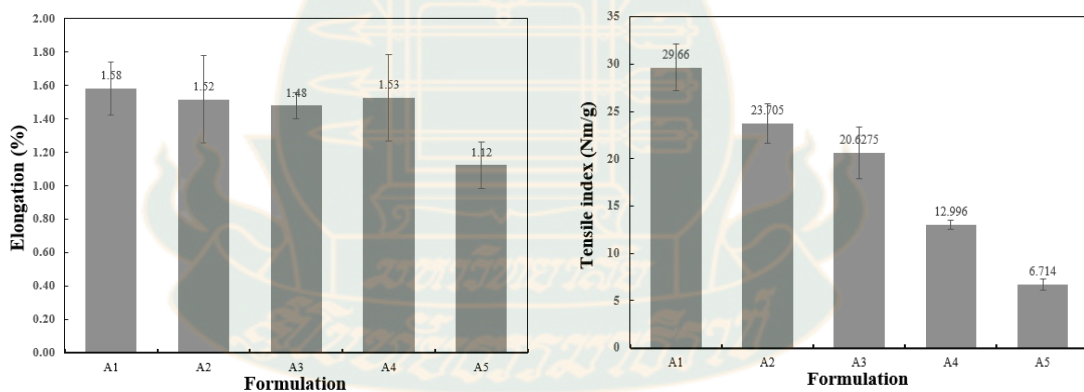
นำกระดาษจากเส้นใยฟางข้าวและเส้นใยใช้แล้วมาทดสอบความต้านทานแรงดึงและทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุ โดยการทดสอบความต้านทานแรงดึงอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D828 และทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 2578



ภาพที่ 4.8 ค่าความต้านทานแรงดึงและค่า TEA ของกระดาษจากเส้นใยฟางข้าวผสมเส้นใยกระดาษใช้แล้ว

ภาพที่ 4.8 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงและค่า TEA ของกระดาษจากเส้นใยฟางข้าวผสมเส้นใยกระดาษใช้แล้ว ค่าความต้านทานแรงดึงของกระดาษสูตร A1 มีค่าเท่ากับ 3.26 kN/m² ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับกระดาษสูตรอื่น ๆ ลำดับถัดไปคือค่าความต้านทานแรงดึงของกระดาษสูตร A2 มีค่าเท่ากับ 3.61 kN/m² โดยที่กระดาษสูตร A5 มีค่าความต้านทานแรงดึงน้อยที่สุดเท่ากับ 0.74 kN/m² ค่าความต้านทานแรงดึงของกระดาษมีแนวโน้มลดลง เมื่อเติมเส้นใยกระดาษใช้แล้วในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าเส้นใยกระดาษใช้แล้วมีความแข็งแรงน้อยกว่าเส้นใยฟางข้าว เพราะเส้นใยจากกระดาษใช้แล้ว เป็นเส้นใยที่ผ่านกระบวนการผลิตและขึ้นรูปมาก่อน เมื่อเติมลงไปปริมาณมาก จะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง

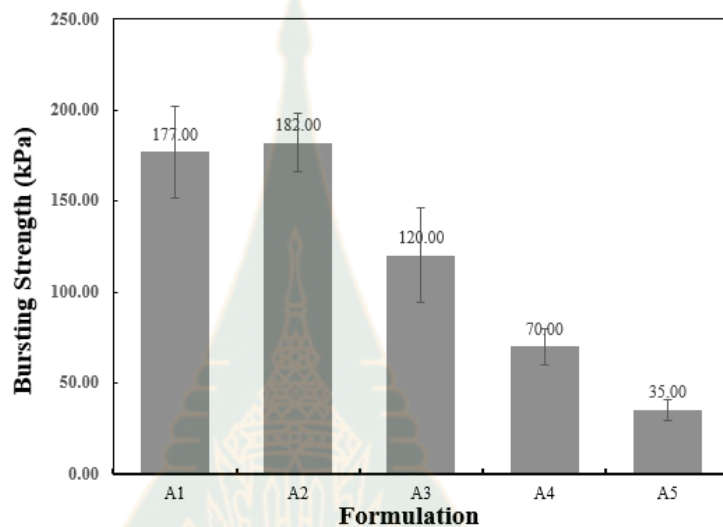
ค่า TEA (ปริมาณพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งกระดาษได้รับความยืดจากแรงดึงสูงสุดจนขาด) ของกระดาษสูตร A1 มีค่าเท่ากับ 28.57 J/m² ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับกระดาษสูตรอื่น ๆ ลำดับถัดไปคือค่า TEA ของกระดาษสูตร A2 มีค่าเท่ากับ 25.79 J/m² พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงและค่า TEA ของกระดาษจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณเส้นใยฟางข้าวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเส้นใยฟางข้าวเป็นเส้นใยที่มีขนาดใหญ่และมีความยาวมากกว่าเส้นใยกระดาษใช้แล้ว ดังนั้นกระดาษที่มีปริมาณเส้นใยฟางข้าวมากกว่าจึงมีความแข็งแรงมากกว่าเนื่องจากถูกเสริมแรงด้วยเส้นใยฟางข้าว



ภาพที่ 4.9 ค่าร้อยละการยืดตัวและดัชนีการดึงยืดของกระดาษจากเส้นใยฟางข้าวผสมเส้นใยกระดาษใช้แล้ว

ค่าร้อยละการยืดตัวและดัชนีการดึงยืดของกระดาษจากเส้นใยฟางข้าวผสมเส้นใยกระดาษใช้แล้ว แสดงในภาพที่ 4.9 พบว่าค่าร้อยละการยืดตัวของกระดาษสูตร A1 มีค่าเท่ากับ 1.58% การยืดตัวของกระดาษสูตร A2, A3, A4, A5 มีค่าเท่ากับ 1.52%, 1.48%, 1.53%, 1.12% ตามลำดับ

1.53% และ 1.12% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการยึดตัวและดัชนีการดึงยึดของกระดาษ มีแนวโน้มลดลง เมื่อมีปริมาณเส้นใยกระดาษใช้แล้วเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเส้นใยกระดาษใช้แล้ว เป็นเส้นใยที่มีเล็กใหญ่ มีรูปร่างแบน และมีความยาวน้อยกว่าเส้นใยฟางข้าว ดังนั้นกระดาษที่มีปริมาณเส้นใยกระดาษใช้แล้วมากกว่า จะมีค่าร้อยละการยึดตัวและดัชนีการดึงยึดน้อยกว่า เนื่องจากเส้นใยมีความแข็งแรงน้อยกว่า

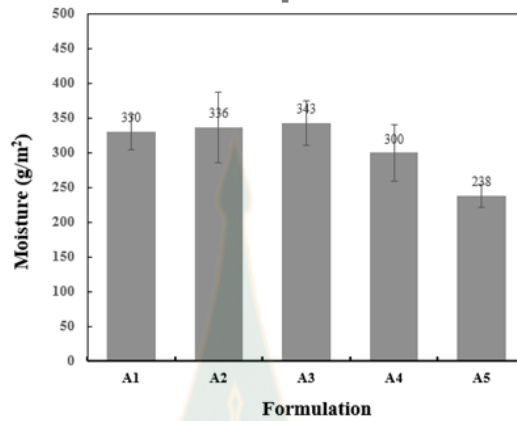


ภาพที่ 4.10 ค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษจากเส้นใยฟางข้าวผสมเส้นใยกระดาษใช้แล้ว

จากภาพที่ 4.10 แสดงค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษจากเส้นใยฟางข้าวผสมเส้นใยกระดาษใช้แล้ว กรณีกระดาษสูตร A2 (ฟาง 75% กระดาษใช้แล้ว 25%) พบว่ามีค่าความต้านทานแรงดันทะลุสูงสุดที่ 182 kPa เมื่อเทียบกับกระดาษสูตรอื่น ๆ อาจอธิบายได้ว่า ณ อัตราส่วนดังกล่าวเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปเป็นกระดาษที่ต้านทานแรงดันทะลุได้ดี โดยส่วนที่เป็นกระดาษใช้แล้วที่มีขนาดเส้นใยที่เล็กกว่าสามารถแทรกเข้าไปเสริมความแข็งแรงให้แก่ช่องว่างที่เกิดจากการสานกันของเส้นใยฟางข้าวได้อย่างเหมาะสม

แต่ถ้าเพิ่มสัดส่วนของกระดาษใช้แล้วมากขึ้นเรื่อย ๆ ตั้งแต่ 50-100% (สูตร A3-A5) พบว่าค่าความต้านทานแรงดันทะลุมีแนวโน้มลดลง อยู่ในช่วง 120-35 kPa อาจอธิบายได้ว่า ณ สัดส่วนผสมดังกล่าว เมทริกซ์ หรือโครงสร้างหลักที่รับแรงของระบบได้เปลี่ยนจากเส้นใยฟางข้าว เป็นเส้นใยกระดาษใช้แล้วเป็นหลัก ซึ่งจากการศึกษาสัญญาณวิทยาของเส้นใยก่อนหน้านี้พบว่า เส้นใยจากกระดาษใช้แล้วเป็นเส้นใยที่มีขนาดเล็ก มีรูปร่างแบน และมีความยาวน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยฟางข้าว อีกทั้งเส้นใยกระดาษใช้แล้วเป็นเส้นใยไร้ไซเคิล โดยเส้นใยนี้เคยผ่านกระบวนการรีดด้วยลูกกลิ้งมาก่อน ทำให้เกิดความเครียดสะสมตกค้าง

ในเส้นใย ทำให้เส้นใยกระดาษใช้แล้วมีความแข็งแรงลดลง ดังนั้นจึงทำให้ค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษ สูตร A3-A5 ที่มีปริมาณเส้นใยกระดาษใช้แล้ว 50-100% มีค่าความต้านทานแรงดันทะลุลดลง



ภาพที่ 4.11 ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษจากเส้นใยฟางข้าวผสมเส้นใยกระดาษใช้แล้ว

ภาพที่ 4.11 แสดงค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษจากเส้นใยฟางข้าวผสมเส้นใยกระดาษใช้แล้ว ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษสูตร A1, A2, A3, A4 และ A5 มีค่าเท่ากับ 330, 336, 343, 300 และ 238 g/m² ตามลำดับ พบว่ากระดาษสูตร A5 มีค่าการดูดซึมน้ำน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่น แสดงให้เห็นว่า เส้นใยฟางข้าวมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ดีกว่าเส้นใยกระดาษใช้แล้ว เนื่องจากเส้นใยฟางข้าวเป็นเส้นใยจากธรรมชาติมีลักษณะเป็นทรงกลมยาว เส้นใยพอลิเมอร์ภายในอยู่กันแบบหลวม ๆ จึงสามารถดูดซับน้ำได้ดีกว่า ในขณะที่เส้นใยจากกระดาษใช้แล้วได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปกระดาษ ผ่านลูกกลิ้งอัดรีดเพื่อปรับความหนาของกระดาษ บีบอัดให้เส้นใยมีลักษณะแบน สายโซ่พอลิเมอร์ถูกบีบอัดเข้าหากัน เมื่อสัมผัสกับน้ำในระยะเวลาที่เท่ากันจึงดูดซับน้ำได้น้อยกว่า

สรุป เมื่อพิจารณาจากสมบัติต่าง ๆ รวมทั้งสมบัติทางสัญญาณวิทยา และการประยุกต์ใช้งานในรูปแบบบรรจุภัณฑ์กระดาษ จึงเลือกกระดาษสูตร A2 (ฟางข้าว 75:กระดาษใช้แล้ว 25) ไปทดลองในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากมีเป้าหมายในการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์กระดาษ จึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับสมบัติความดันทะลุเป็นหลัก และกระดาษสูตร A2 เป็นสูตรที่ให้ค่าความต้านทานการดันทะลุสูงที่สุด

ตอนที่ 3 ศึกษาปริมาณแป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่เหมาะสมที่เติมลงในกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษใช้แล้วเพื่อปรับปรุงความแข็งแรงของกระดาษ

ตอนที่ 3.1 การเคลือบแป้งมันสำปะหลังตัดแปรลงบนกระดาษ

นำกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษใช้แล้ว สูตร A2 มาปรับปรุงความแข็งแรงของกระดาษให้ดียิ่งขึ้นด้วยการเคลือบผิวด้วยแป้งมันสำปะหลังตัดแปร โดยควบคุมความหนาของชั้นเคลือบด้วยบาร์โค้ด (Barcode) เริ่มจากนำกระดาษมาเคลือบผิวด้วยสารละลายแป้งมันสำปะหลังตัดแปร กำหนดเป็นชุดทดลอง B1 – B5 โดยปรับเปลี่ยนความหนาชั้นเคลือบที่ 0, 50, 60, 80 และ 100 ไมครอน ตามลำดับ ดังแสดงความหนาของชั้นเคลือบและเบอร์ของบาร์โค้ด ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ความหนาของชั้นแป้งที่เคลือบลงบนผิวกระดาษ

	Wet film Deposit (μM)	Barcode No.
Formula B1	0	0
Formula B2	50	5
Formula B3	60	6
Formula B4	80	7
Formula B5	100	8

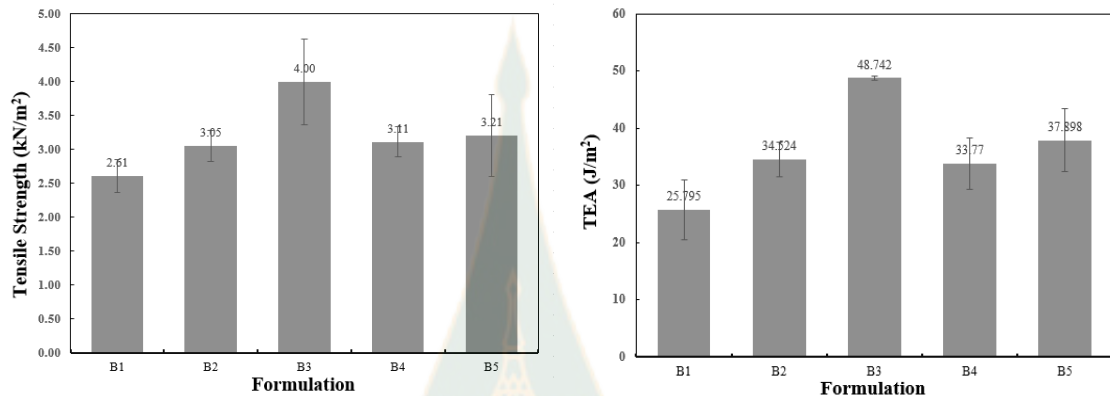
ตอนที่ 3.2 การศึกษาสมบัติของกระดาษเคลือบแป้งมันสำปะหลังตัดแปร

นำกระดาษเคลือบแป้งมันสำปะหลังตัดแปร มาทดสอบสมบัติกายภาพ ได้แก่ น้ำหนักกระดาษ ความหนากระดาษ และความหนาแน่นของกระดาษ พบว่า กระดาษเคลือบแป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่ได้มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 90–104 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากชั้นแป้งที่เคลือบลงไป กระดาษเคลือบแป้งมันสำปะหลังตัดแปรมีความหนาอยู่ในช่วง 35–46 ไมครอน สอดคล้องกับบาร์โค้ดที่ใช้เคลือบ กระดาษเคลือบแป้งมันสำปะหลังตัดแปรมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2.29–2.45 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมบัติกายภาพของกระดาษเคลือบแป้งมันสำปะหลังตัดแปร

	B1	B2	B3	B4	B5
g/m ³	90.10±0.22	101±0.22	107±0.13	108±0.12	104±0.17
Thickness (μ)	35.53±2.4	43.27±5.05	46.87±5.48	46.20±5.44	42.4±2.72
Density (g/cm ³)	2.29±0.09	2.29±0.09	2.45±0.05	2.38±0.05	2.39±0.07

นำกระดาษที่เคลือบผิวด้วยสารละลายแป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่ความหนาต่าง ๆ มาทดสอบความต้านทานแรงดึงและทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุ โดยการทดสอบความต้านทานแรงดึงอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D828 และทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 2578 โดยนำกระดาษไปทดสอบสูตรละ 7 ซ้ำ แสดงผลการทดสอบเป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



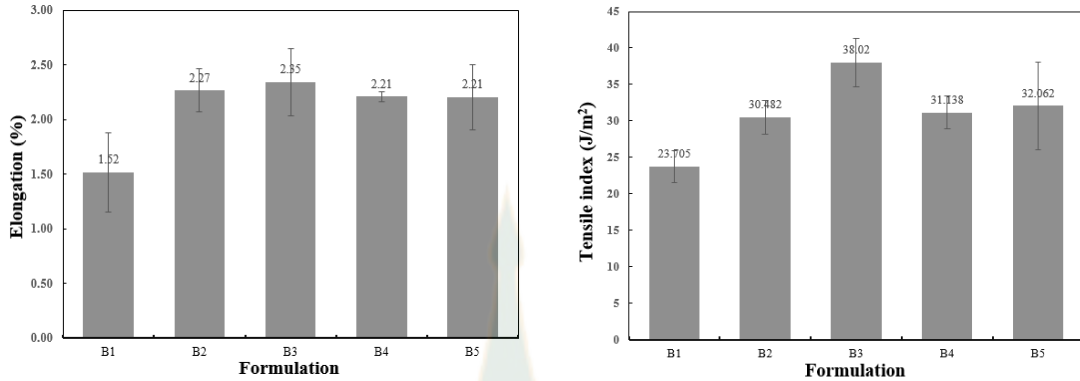
ภาพที่ 4.12 ค่าความต้านทานแรงดึงและค่า TEA ของกระดาษที่เคลือบผิวด้วยแป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่ความหนาต่าง ๆ

จากภาพที่ 4.12 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงและค่าดัชนีการดึงยึดกระดาษที่เคลือบผิวด้วยแป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่ความหนาต่าง ๆ พบว่าในช่วงแรก กระดาษสูตร B1-B3 มีความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 2.61, 3.05 และ 4.00 kN/m² ตามลำดับ โดยค่าความต้านทานแรงดึงของกระดาษสูตร B3 มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด หลังจากนั้นเมื่อเคลือบแป้งที่ความหนามากขึ้นพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงกลับมีค่าลดลง โดยค่าความต้านทานแรงดึงของกระดาษสูตร B4 และ B5 มีค่าเท่ากับ 3.11 และ 3.21 kN/m² ตามลำดับ

ค่า TEA (ปริมาณพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งกระดาษได้รับความยึดจากแรงดึงสูงสุดจนขาด) ของกระดาษมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ กระดาษสูตร B1-B3 มีค่า TEA เท่ากับ 25.79, 34.2 และ 48.74 J/m² ตามลำดับ โดยค่า TEA ของกระดาษสูตร B3 มีค่า TEA สูงที่สุด หลังจากนั้นเมื่อเคลือบแป้งที่ความหนามากขึ้น พบว่าค่า TEA กลับมีค่าลดลง โดยค่า TEA ของกระดาษสูตร B4 และ B5 มีค่าเท่ากับ 33.77 และ 37.89 J/m² ตามลำดับ

ค่าความต้านทานแรงดึงและค่า TEA ของกระดาษจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาของแป้งที่ใช้เคลือบ โดยเพิ่มถึงจุดสูงสุดที่สูตร B3 ที่ความหนา 60 ไมครอน ใช้บาร์โค้ดเบอร์ 6 หลังจากนั้น แม้จะใช้บาร์โค้ดที่ให้ความหนาชั้นเคลือบมากขึ้น แต่ค่าการต้านทานแรงดึงมีค่าลดลง อาจเกิดจากปริมาณแป้งที่มากขึ้น ทำให้แป้งเกิดการเกาะกลุ่มกันเองมากกว่าที่จะไปเคลือบบน

ผิวกระดาษ ดังนั้นการกระจายตัวของชั้นเคลือบที่ไม่สม่ำเสมอจึงเป็นเหตุให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง



ภาพที่ 4.13 ค่าร้อยละการยืดตัวและดัชนีการดึงยึดของของกระดาษที่เคลือบผิวด้วยแป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่ความหนาต่าง ๆ

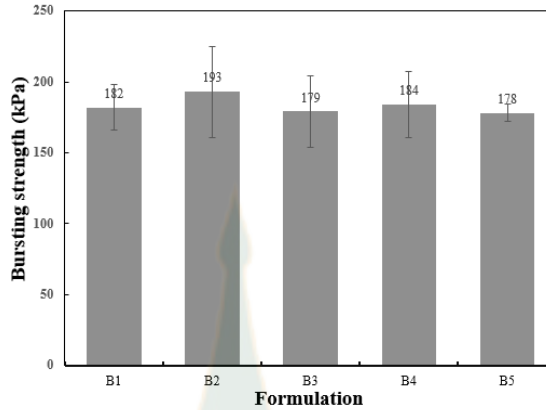
จากภาพที่ 4.13 แสดงค่าร้อยละการยืดตัวและดัชนีการดึงยึดของกระดาษที่เคลือบผิวด้วยแป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่ความหนาต่าง ๆ

ค่าร้อยละการยืดตัวของกระดาษแบบไม่เคลือบแป้งสูตร B1 มีค่าเท่ากับ 1.52% เมื่อเคลือบแป้งลงไปบนผิวด้านบนของกระดาษ ทำให้ค่าร้อยละการยืดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกระดาษสูตร B2 และ B3 มีค่าร้อยละการยืดตัวเท่ากับ 2.27% และ 2.35% ตามลำดับ โดยกระดาษสูตร B3 ให้ค่าร้อยละการยืดตัวสูงที่สุด หลังจากเคลือบแป้งให้มีความหนาเพิ่มขึ้น พบว่าค่าร้อยละการยืดตัวของกระดาษไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก โดยค่าร้อยละการดึงยึดของกระดาษสูตร B4 และ B5 มีค่าเท่ากันที่ 2.21%

ค่าดัชนีการดึงยึดของกระดาษแบบไม่เคลือบแป้งสูตร B1 มีค่าเท่ากับ 23.70 J/m² เมื่อเคลือบแป้งลงไปบนผิวด้านบนของกระดาษทำให้ค่าดัชนีการดึงยึดตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกระดาษสูตร B2 และ B3 มีค่าดัชนีการดึงยึดเท่ากับ 30.48 และ 38.02 J/m² ตามลำดับ โดยกระดาษสูตร B3 ให้ค่าดัชนีการดึงยึดสูงที่สุด หลังจากเคลือบแป้งให้มีความหนาเพิ่มขึ้น พบว่าค่าดัชนีการดึงยึดของกระดาษไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก โดยค่าดัชนีการดึงยึดของกระดาษสูตร B4 และ B5 มีค่าเท่ากันที่ 31.13 และ 32.06 J/m² ตามลำดับ

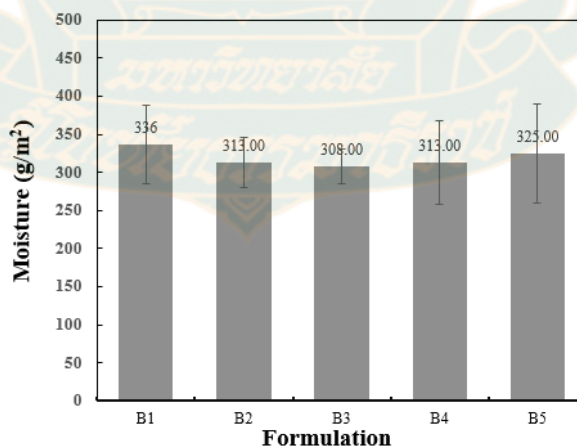
จึงพบว่าค่าร้อยละการยืดตัวและดัชนีการดึงยึดของกระดาษจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มความหนาของแป้งที่ใช้เคลือบ โดยเพิ่มถึงจุดสูงสุดที่ สูตร B3 ที่ความหนา 60 ไมครอน ใช้บาร์โค้ดเบอร์ 6 หลังจากนั้น แม้จะใช้บาร์โค้ดที่ให้ความหนาชั้นเคลือบมากขึ้น แต่ค่าการต้านทานแรงดึงลดลง ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณแป้งที่มากขึ้น ทำให้แป้งเกิดการเกาะกลุ่มกันเองมากกว่าที่

จะไปเคลือบบนผิวกระดาษ ดังนั้นการกระจายตัวของชั้นเคลือบที่ไม่สม่ำเสมอจึงเป็นเหตุให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง



ภาพที่ 4.14 ค่าความต้านทานแรงดึงตันทะลุของกระดาษที่เคลือบผิวด้วยแป้งมันสำปะหลังตัดแปร ที่ความหนาต่าง ๆ

ภาพที่ 4.14 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงตันทะลุของกระดาษที่เคลือบผิวด้วยแป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่ความหนาต่าง ๆ กระดาษที่ไม่เคลือบแป้งสูตร B1 มีค่าความต้านทานแรงดึงตันทะลุเท่ากับ 182 kPa เมื่อนำกระดาษมาเคลือบแป้งค่าความต้านทานแรงดึงตันทะลุของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยกระดาษสูตร B2 มีค่าความต้านทานแรงดึงตันทะลุเท่ากับ 193 kPa เมื่อเคลือบแป้งหนาขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงตันทะลุมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย โดยกระดาษสูตร B3, B4 และ B5 มีค่าความต้านทานแรงดึงตันทะลุเท่ากับ 179, 184 และ 178 kPa ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงดึงก่อนหน้า

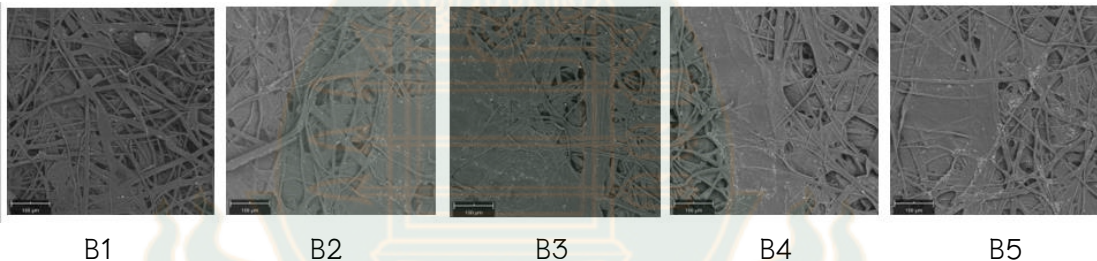


ภาพที่ 4.15 ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษเคลือบแป้งมันสำปะหลังตัดแปร

จากภาพที่ 4.15 ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษเคลือบแป้งมันสำปะหลังดัดแปร พบว่ากระดาษที่ไม่เคลือบแป้งมันสำปะหลัง สูตร B1 มีค่าการดูดซึมน้ำประมาณ 340 g/m^2 แต่กระดาษหลังจากเคลือบแป้งมันสำปะหลังสูตร B2–B4 จะมีค่าการดูดซึมน้ำลดลง โดยมีค่าอยู่ในช่วง $310\text{--}320 \text{ g/m}^2$ เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านกระบวนการต้มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จะทำให้แป้งเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นเจล เคลือบผิวด้านบนของกระดาษไว้เมื่อนำกระดาษที่เคลือบแป้งมาทดสอบการดูดซึมน้ำ น้ำจึงถูกกั้นไว้ด้วยชั้นเจลแป้ง น้ำจึงไม่สัมผัสกับเส้นใยโดยตรง ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง

เป็นที่น่าสังเกตว่า กระดาษที่เคลือบแป้งมันสำปะหลังในปริมาณมากที่สุดคือ สูตร B5 มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงเกือบเท่ากระดาษที่ไม่เคลือบแป้งมันสำปะหลัง อาจเป็นเพราะการเคลือบแป้งมันสำปะหลังในปริมาณที่มากเกินไป อาจทำให้แป้งรวมตัวกันมากกว่า ที่จะไปเคลือบที่ผิวกระดาษ จึงทำให้กระดาษถูกเคลือบอย่างไม่สม่ำเสมอ มีช่องว่างให้น้ำไหลลงไปกระดาษและถูกเส้นใยดูดซับได้ในปริมาณมาก เมื่อนำมาทดสอบการดูดซึมน้ำจึงมีค่าที่เพิ่มขึ้น

ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษเคลือบแป้งมันสำปะหลังดัดแปรสูตร B1–B5 ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากในแต่ละสูตรมีความแตกต่างของชั้นเคลือบน้อยมาก (ระดับไมครอน)



ภาพที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของกระดาษเคลือบแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากภาพที่ 4.16 แสดงสัณฐานวิทยาของกระดาษเคลือบแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยโหมดสัญญาณภาพจากการวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Detector) ที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่ 15 kV แรงดัน 0.1 Pa . โดยนำชิ้นงานไปเคลือบด้วยทองคำก่อนนำมาทดสอบ

พบว่าสูตร A1 เป็นกระดาษที่ไม่ได้เคลือบผิวด้วยแป้งมันสำปะหลังดัดแปร จะมองเห็นเส้นใยและรูพรุนบนผิวกระดาษได้อย่างชัดเจน ในขณะที่กระดาษสูตร A2–A5 ที่มีการเคลือบ

ผิวด้วยแป้งมันสำปะหลังดัดแปร จะเห็นชั้นของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเคลือบอยู่บนผิวของ
กระดาษอย่างชัดเจน และชั้นของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทำให้ความพรุนบนผิวกระดาษลดลง

สรุป เมื่อพิจารณาจากสมบัติต่าง ๆ ของกระดาษ จึงเลือกกระดาษสูตร B3 เคลือบ
แป้งมันสำปะหลังที่มีความหนา 60 ไมครอน (บาร์โค้ดหมายเลข 6) ไปทดลองในขั้นตอนต่อไป
เนื่องจากให้กระดาษที่มีความแข็งแรงและมีความสามารถในการดัดยี่ดที่ดี และสามารถขึ้นรูป
ได้ง่ายเมื่อเทียบกับสูตรอื่น



ตอนที่ 4 ศึกษาศึกษาปริมาณถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่เติมลงในกระต่ายฟางข้าว ผสมกระต่ายใช้แล้ว

ตอนที่ 4.1 การศึกษาสมบัติของผงถ่านกัมมันต์

การศึกษาศสมบัติของผงถ่านกัมมันต์ ได้แก่ การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ค่าคาร์บอนคงตัว และศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาลักษณะหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

ตอนที่ 4.1.1 การศึกษาศสมบัติของผงถ่านกัมมันต์

การศึกษาศสมบัติของผงถ่านกัมมันต์ ได้แก่ การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ค่าคาร์บอนคงตัว แสดงผลในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สมบัติของผงถ่านกัมมันต์

สมบัติของผงถ่านกัมมันต์	หน่วย
Iodine Number	1,006 mg/g
Moisture	2.7%
Volatile Matter	2.5%
Fix Carbon	91.3%
Ash	3.5%
pH	10.2
Surface area	800 m ² /g
Particle Size Distribution Under 325 Mesh	
+200	0.7% Retained
+325	9.2% Retained
-325	90.1% Retained
Corrected Bulk Density	0.58 g/cc

ผงถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองเป็นเกรด HRO M325-60 ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Carbokarm Co., Ltd. จากการทดสอบพบว่า ผงถ่านกัมมันต์มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ

1,006 mg/g มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 2.7% ปริมาณสารระเหยเท่ากับ 2.5% ค่าคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 91.3% การกระจายตัวของอนุภาคผงถ่าน โดยร่อนผ่านตะแกรง 325 Mesh พบว่า ค้างตะแกรง +200 คิดเป็น 0.7% ค้างตะแกรง +325 คิดเป็น 9.2% ผ่านตะแกรง +200 คิดเป็น 90.1%

ตอนที่ 4.1.2 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของผงถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ได้ศึกษาสัณฐานวิทยาของผงถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยโหมดสัญญาณภาพจากการวัดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Detector) ที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่ 15 kV แรงดัน 0.1 Pa. ได้ผลการศึกษาในภาพต่อไปนี้

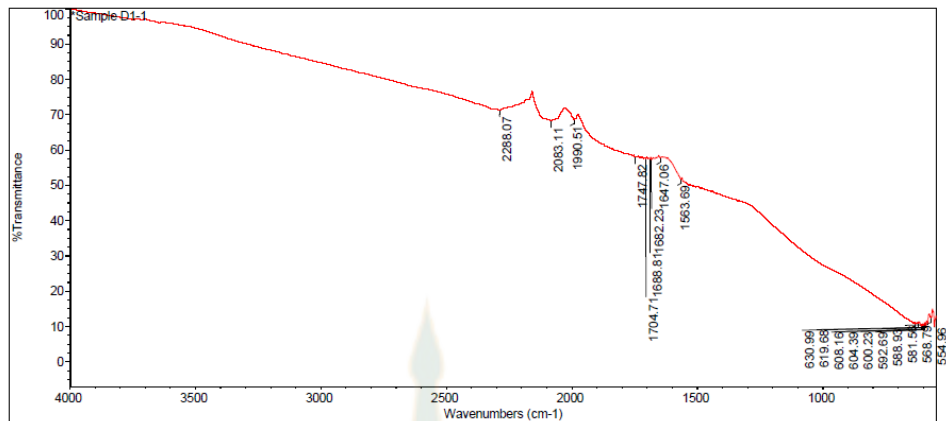


ภาพที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของผงถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากภาพที่ 4.17 แสดงสัณฐานวิทยาของเส้นใยกระดาษใช้แล้วจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากผลการศึกษาพบว่าผงถ่านกัมมันต์มีทั้งที่เป็นชิ้น รูปทรงไม่สมมาตร และมีลักษณะพื้นผิวที่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก โดยรูพรุนมีขนาด 1-3 ไมครอน

ตอนที่ 4.1.3 ศึกษาลักษณะหมู่ฟังก์ชันของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค FTIR

การวิเคราะห์คุณภาพของผงถ่านกัมมันต์ โดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ที่ความยาวคลื่น 4,000-500 cm^{-1} จำนวนสแกน 64 รอบ/ครั้ง แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันที่มีอยู่ในผงถ่านกัมมันต์แสดงในภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผงถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

จากภาพที่ 4.18 แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผงถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี แสดงลักษณะเฉพาะของผงถ่านกัมมันต์ดังนี้

พบการดูดกลืนรังสีช่วงประมาณ $1,560\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงพันธะ $C = C$ ในหมู่แอโรมาติก ถ่านเป็นผลิตภัณฑ์ที่หลงเหลือจากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลซึ่งคาดว่าอยู่ในรูปของลิกนินเป็นส่วนใหญ่ ลิกนินเป็นสารประกอบพอลิเมอร์มีโครงสร้างพื้นฐานคือวงแหวนอะโรมาติก

พบการดูดกลืนรังสีช่วงประมาณ $2,800\text{--}2,900\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของกลุ่ม $C - H$, $C = H$ stretching ของหมู่ aromatic methoxyl groups ตามลำดับ

การไม่พบแถบสเปกตรัมดูดกลืนรังสีสูงกว่า $3,000\text{ cm}^{-1}$ ของผงถ่านกัมมันต์แสดงถึงพื้นผิวไม่มีพันธะหมู่กรด เช่น กรดคาร์บอกซิลิก หรือฟีนอลซึ่งจะดูดซับรังสีสูงกว่า $3,000\text{ cm}^{-1}$

สรุป ผงถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลอง มีค่าไอโอดีนนมเบอร์เท่ากับ 1006 mg/g มีปริมาณความชื้นเท่ากับ 2.7% ปริมาณสารระเหยเท่ากับ 2.5% ค่าคาร์บอนคงตัวเท่ากับ 91.3% สัณฐานวิทยาของเส้นใยกระดาษใช้แล้วจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าผงถ่านกัมมันต์มีทั้งที่เป็นชิ้น รูปทรงไม่สมมาตร และมีลักษณะพื้นผิวที่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก โดยรูพรุนมีขนาด $1\text{--}3\text{ ไมครอน}$ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผงถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบการดูดกลืนรังสีช่วงประมาณ $1,560\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงพันธะ $C = C$ ในหมู่แอโรมาติก พบการดูดกลืนรังสีช่วงประมาณ $2,800\text{--}2,900\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของกลุ่ม $C - H$, $C = H$ stretching ของหมู่ aromatic methoxyl groups

ตอนที่ 4.2 การศึกษาปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่เติมลงในกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษใช้แล้ว

การศึกษาปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่เติมลงในกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษใช้แล้ว โดยนำกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษใช้แล้วชุดทดลอง B3 มาเคลือบด้วยผงถ่านกัมมันต์เพื่อให้กระดาษมีสมบัติในการดูดซับก๊าซเอทิลีนเพื่อชะลอการสุกของผลไม้ได้ โดยควบคุมความหนาของชั้นเคลือบด้วยบาร์โค้ดเบอร์ 6 โดยเติมผงถ่านกัมมันต์ขนาด 150-179 ไมครอนที่ปริมาณร้อยละ 0-30% (w/w) ผสมลงไปในสารละลายแป้งสุก กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ออกแบบการทดลองเป็นชุดทดลอง C2-C5 ตามลำดับ และการทดลองชุดควบคุมแบบไม่เติมผงถ่านกัมมันต์ (C1)

ตารางที่ 4.6 ปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่เคลือบลงบนผิวกระดาษ

	Activated Charcoal (%)
Formula C1	0
Formula C2	5
Formula C3	10
Formula C4	20
Formula C5	30



ภาพที่ 4.19 กระดาษจากเส้นใยฟางข้าวผสมเส้นใยกระดาษใช้แล้วเคลือบผงถ่านกัมมันต์ที่ปริมาณต่าง ๆ

จากภาพที่ 4.19 แสดงลักษณะของกระดาษที่เคลือบผิวด้วยผงถ่านกัมมันต์ที่ร้อยละ 0-30 (w/w) จากผลการทดลองพบว่า สามารถเคลือบผงถ่านกัมมันต์สูงสุดได้ที่ร้อยละ 30 ถ้ามากกว่านั้นจะผสมผงถ่านกัมมันต์ลงในสารละลายแป้งได้ยาก สารละลายจะมีความหนืดสูงมาก เคลือบพื้นผิวได้ไม่สม่ำเสมอ จากภาพที่ 4.19 พบว่าเมื่อเติมผงถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่มากขึ้น กระดาษที่ได้จะมีสีเข้มขึ้นไปตามลำดับ และเมื่อเพิ่มปริมาณผงถ่านมากขึ้น การหลุดลอกของผงถ่านกัมมันต์ยิ่งเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

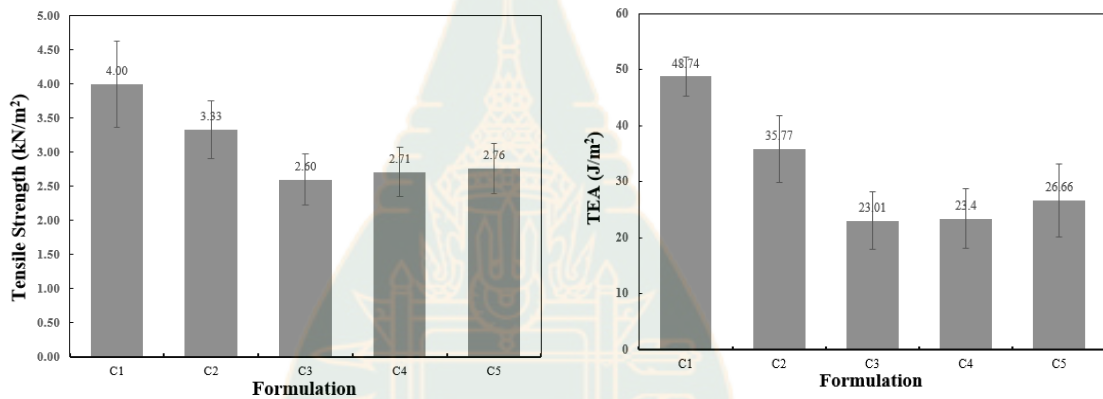
ตอนที่ 4.3 ศึกษาสมบัติของกระดาษฟางข้าวผสมกระดาษใช้แล้วเคลือบผงถ่านกัมมันต์

นำกระดาษที่เคลือบผิวด้วยผงถ่านกัมมันต์ปริมาณต่าง ๆ มาทดสอบความต้านทานแรงดึงและทดสอบความต้านทานแรงด้นทะลุ โดยการทดสอบความต้านทานแรงดึงอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D828 และทดสอบความต้านทานแรงด้นทะลุอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 2578 การศึกษาสมบัติของกระดาษที่ได้ ได้แก่ สัญญาณวิทยาของเส้นใยด้วยเครื่องทดสอบ Scanning Electron Microscope (SEM)

ตอนที่ 4.3.1 ผลการทดลองความต้านทานแรงดึงและทดสอบความต้านทานแรงด้นทะลุ

ตอนที่ 4.3.1.1 ผลการทดลองความต้านทานแรงดึงและทดสอบความต้านทาน

แรงด้นทะลุ



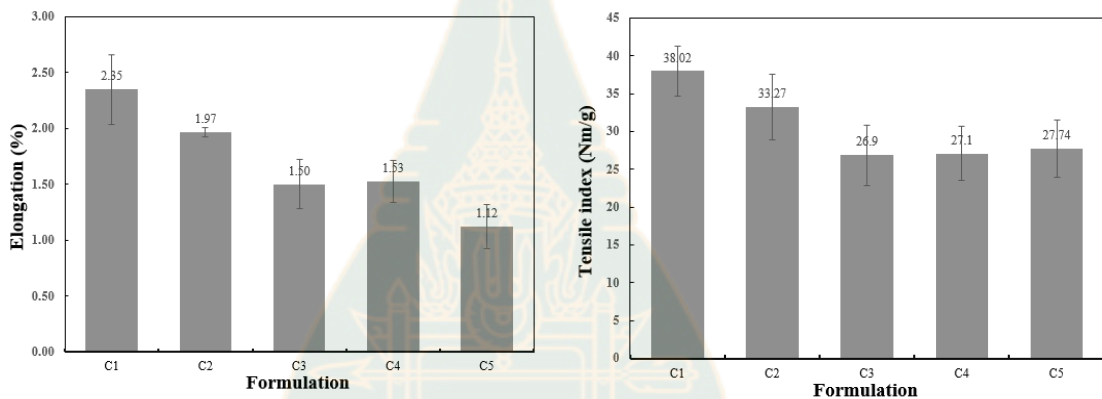
ภาพที่ 4.20 ค่าความต้านทานแรงดึงและค่า TEA ของกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์

ค่าความต้านทานแรงดึงและค่า TEA ของกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.20 กระดาษที่เคลือบผงถ่านกัมมันต์จะมีค่าความต้านทานแรงดึงลดลง กระดาษที่ไม่เคลือบผงถ่านสูตร C1 มีค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 4.00 kN/m² กระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ที่ผิวสูตร 5% สูตร C2 มีค่าความต้านทานแรงดึงเท่ากับ 3.33 kN/m² เมื่อเคลือบผงถ่านในปริมาณที่มากขึ้นพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงมีแนวโน้มลดลง โดยค่าความต้านทานแรงดึงยึดของกระดาษสูตร C3, C4 และ C5 มีค่าเท่ากับ 2.60, 2.71 และ 2.76 kN/m² ตามลำดับ

กรณีค่า TEA (ปริมาณพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งกระดาษได้รับความยึดจากแรงดึงสูงสุดจนขาด) กระดาษที่เคลือบผงถ่านจะมีค่า TEA ลดลง กระดาษที่ไม่เคลือบผงถ่านสูตร C1 มีค่า TEA เท่ากับ 48.74 J/m² กระดาษเคลือบผงถ่านที่ผิวสูตร 5% สูตร C2 มี TEA เท่ากับ 35.77

J/m² เมื่อเคลือบผงถ่านในปริมาณที่มากขึ้นพบว่าค่า TEA มีแนวโน้มลดลง โดยค่า TEA ของ กระจกสูตร C3, C4 และ C5 มีค่าเท่ากับ 23.01, 23.40 และ 26.66 J/m² ตามลำดับ

พบว่าค่าความต้านทานแรงดึงและค่า TEA ของกระจกจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่ม ปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่ใช้เคลือบผิว เนื่องจากการเคลือบผงถ่านกัมมันต์เป็นการเพิ่มวัสดุที่ ความแข็งสูง (เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยเซลลูโลสในกระจก) ดังนั้นเมื่อกระจกได้รับแรงดึง บริเวณชั้นของถ่านกัมมันต์ชั้นบน ซึ่งเป็นจุดที่มีความแข็งเกร็งมากกว่าชั้นกระจก จึงเกิดการเสีย สภาพแบบพลาสติกได้มากกว่าและเร็วกว่า แผ่นกระจกแบบไม่เคลือบ ซึ่งการลดลงของค่า ความต้านทานแรงดึงและค่า TEA ดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นที่ปริมาณผงถ่านกัมมันต์ 0-5% (กระจก สูตร C1 และ C2) และเริ่มคงที่ที่ปริมาณผงถ่าน 10-30% (กระจกสูตร C3, C4 และ C5)



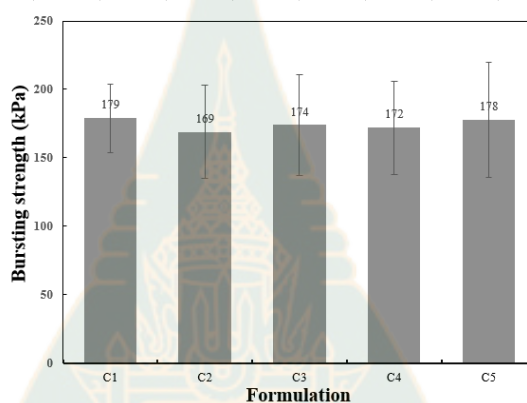
ภาพที่ 4.21 ค่าร้อยละการยืดตัวและดัชนีการดึงยืดของกระจกเคลือบผงถ่านกัมมันต์

ค่าร้อยละการยืดตัวและดัชนีการดึงยืดของกระจกเคลือบผงถ่านกัมมันต์ แสดงในภาพที่ 4.21 กระจกที่ไม่เคลือบผงถ่านจะมีค่าร้อยละการยืดตัวมากกว่ากระจกที่เคลือบด้วยผง ถ่านกัมมันต์ กระจกที่ไม่เคลือบผงถ่านกัมมันต์ สูตร C1 มีค่าร้อยละการดึงยืดเท่ากับ 2.35% ส่วนกระจกที่เคลือบผงถ่านกัมมันต์ 5% กระจกสูตร C2 มีค่าร้อยละการยืดตัวเท่ากับ 1.97% เมื่อเติมผงถ่านในปริมาณที่มากขึ้น กระจกมีค่าร้อยละการยืดตัวน้อยลงเรื่อยๆ โดยค่าร้อยละ การยืดตัวของกระจกสูตร C3, C4 และ C5 ที่เคลือบผงถ่านกัมมันต์ 10%, 20% และ 30% มีค่า ร้อยละการดึงยืดเท่ากับ 1.50%, 1.63% และ 1.12% ตามลำดับ

กรณีค่าดัชนีการดึงยืด กระจกที่ไม่เคลือบผงถ่านกัมมันต์จะมีค่าดัชนีการดึงยืดมากกว่า กระจกที่เคลือบด้วยผงถ่านกัมมันต์ กระจกที่ไม่เคลือบผงถ่านกัมมันต์ สูตร C1 มีค่าดัชนีการ ดึงยืด เท่ากับ 38.02 Nm/g ส่วนกระจกที่เคลือบผงถ่านกัมมันต์ 5% กระจกสูตร C2 มีค่าดัชนี การดึงยืด เท่ากับ 33.27 Nm/g เมื่อเติมผงถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่มากขึ้น กระจกมีค่าดัชนีการ

ดึงยึดน้อยลงเรื่อย ๆ โดยค่าดัชนีการดึงยึดของกระดาษสูตร C3, C4 และ C5 ที่เคลือบผงถ่านกัมมันต์ 10%, 20% และ 30% มีค่าดัชนีการดึงยึด เท่ากับ 26.90, 27.10 และ 27.74 Nm/g ตามลำดับ

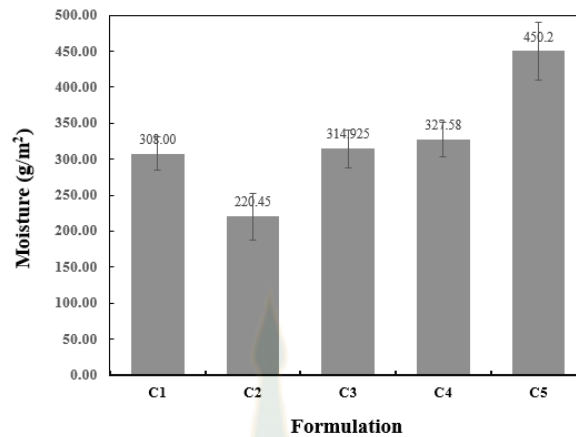
พบว่าค่าร้อยละการยึดตัวและดัชนีการดึงยึดของกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ จะมีแนวโน้มลดลง คล้ายคลึงกับค่าความต้านทานแรงดึงและค่า TEA คือเมื่อเพิ่มปริมาณผงถ่านที่ใช้เคลือบผิว บริเวณชั้นของถ่านกัมมันต์ชั้นบน ซึ่งเป็นจุดที่มีความแข็งแรงมากกว่าชั้นกระดาษ จึงเกิดการเสียหายแบบพลาสติกได้มากกว่าและเร็วกว่าแผ่นกระดาษแบบไม่เคลือบ ซึ่งค่าร้อยละการยึดตัวและดัชนีการดึงยึดของกระดาษจะเพิ่มขึ้นที่ปริมาณผงถ่านกัมมันต์ 0-5% (กระดาษสูตร C1 และ C2) และเริ่มคงที่ที่ปริมาณผงถ่านกัมมันต์ 10-30% (กระดาษสูตร C3, C4 และ C5)



ภาพที่ 4.22 ค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์

ค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ดังแสดงในภาพที่ 4.22 กระดาษที่ไม่เคลือบผงถ่านกัมมันต์ สูตร C1 มีค่าความต้านทานแรงดันทะลุเท่ากับ 179 kPa กระดาษที่เคลือบผงถ่านกัมมันต์ 5% สูตร C2 มีค่าความต้านทานแรงดันทะลุเท่ากับ 169 kPa พบว่ามีความต้านทานแรงดันทะลุลดลงเล็กน้อย เมื่อเคลือบผงถ่านในปริมาณมากขึ้น กระดาษสูตร C3, C4 และ C5 กระดาษมีค่าความต้านทานแรงดันทะลุเท่ากับ 174, 172 และ 178 kPa ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

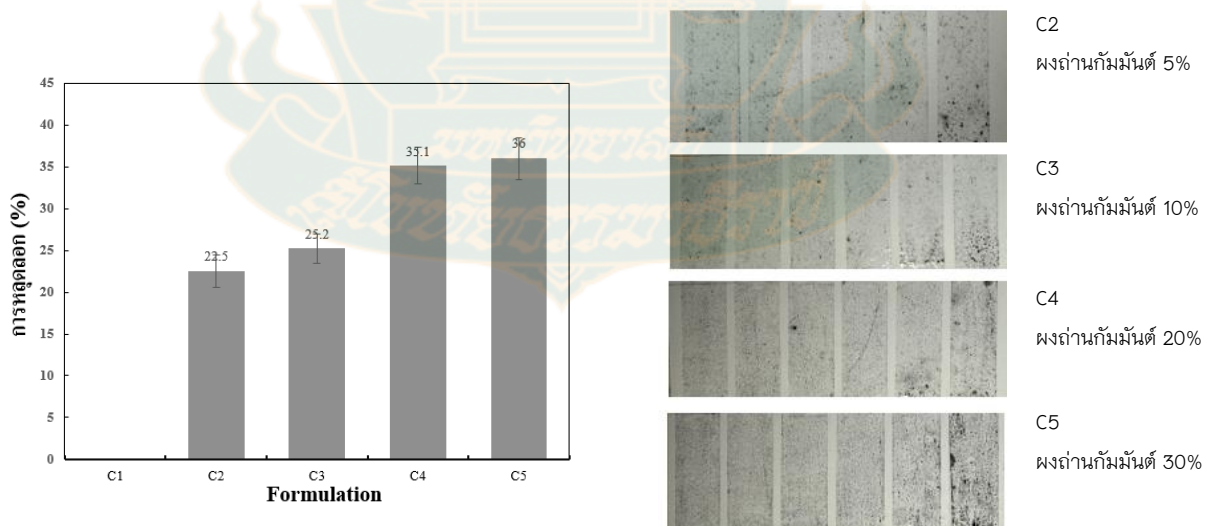
พบว่า การเพิ่มปริมาณผงถ่านในช่วง 0-30% จะทำให้ได้ชั้นฟิล์มที่มีความหนาในช่วง 50-100 ไมครอน เคลือบลงบนผิวด้านบนของกระดาษ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความหนาที่เพิ่มขึ้นของชั้นผงถ่านกัมมันต์ ส่งผลกระทบน้อยมากต่อค่าความต้านทานการดันทะลุ ซึ่งทำให้ชิ้นงานดังกล่าวมีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการใช้งานในรูปแบบบรรจุภัณฑ์



ภาพที่ 4.23 ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์

ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.23 กระดาษที่ไม่เคลือบผงถ่าน สูตร C1 มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 308 g/m² กระดาษที่เคลือบผงถ่าน 5% สูตร C2 มีค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 220.45 g/m² กระดาษเมื่อเคลือบผงถ่านในปริมาณที่มากขึ้น จะมีค่าการดูดซึมน้ำมากขึ้น โดยค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษสูตร C3–C5 มีค่าเท่ากับ 314.92, 327.58, 450.20 g/m² ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงถ่านกัมมันต์ จะทำให้กระดาษมีค่าปริมาณการดูดซึมน้ำที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผงถ่านกัมมันต์มีส่วนที่เป็นรูพรุน ซึ่งสามารถดูดซึมน้ำและความชื้นได้



ภาพที่ 4.24 ค่าร้อยละการหลุดลอกของผงถ่านกัมมันต์และชิ้นงานหลังการทดสอบ

ค่าร้อยละการหลุดลอกของผงถ่านกัมมันต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.24 จากผลการทดลองพบว่า การหลุดลอกของผงถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนที่เติมลงไป กระจกาศที่เคลือบผงถ่านกัมมันต์ 5% สูตร C2 มีค่าการหลุดลอกเท่ากับ 22.5% กระจกาศที่เคลือบผงถ่านกัมมันต์ สูตร C3-C5 มีค่าการหลุดลอกเท่ากับ 25.2, 35.1 และ 36% ตามลำดับ

เมื่อเติมผงถ่านกัมมันต์มากขึ้นจะทำให้ค่า % การหลุดลอกเพิ่มขึ้น และคงที่ที่ปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่ 20-30% (กระจกาศสูตร C4 และ C5)

ตอนที่ 4.3.1.2 การทดสอบความหนาของกระจกาศเคลือบผงถ่านกัมมันต์

นำกระจกาศเคลือบผงถ่านกัมมันต์มาทดสอบสมบัติกายภาพ โดยการชั่งน้ำหนักกระจกาศก่อนเคลือบ และชั่งน้ำหนักกระจกาศหลังเคลือบ แล้วคำนวณหาค่าน้ำหนักของกระจกาศและความหนาของกระจกาศ ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าน้ำหนักและค่าความหนาของกระจกาศหลังเคลือบ

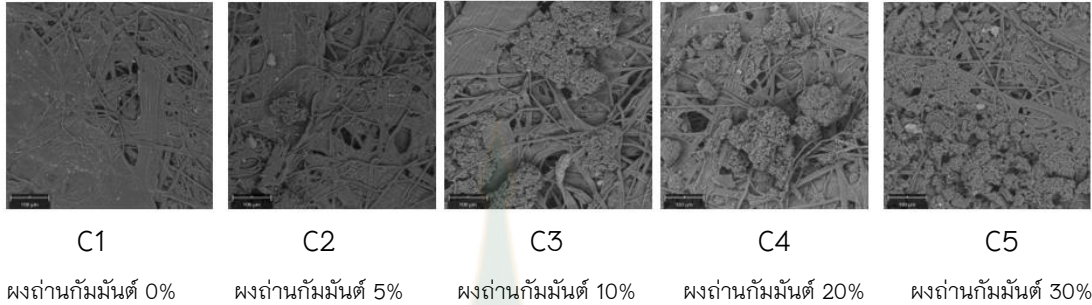
	C1	C2	C3	C4	C5
ปริมาณ ผงถ่านกัมมันต์	0%	5%	10%	20%	30%
g/m ³	107 ± 0.13	112 ± 0.06	116 ± 0.03	128 ± 0.01	141 ± 0.02
Thickness (μ)	46.87 ± 5.48	39.20 ± 4.48	40.60 ± 5.22	42.60 ± 3.31	46.20 ± 5.217

น้ำหนักและความหนาของกระจกาศเคลือบผงถ่านกัมมันต์แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่ากระจกาศเคลือบผงถ่านกัมมันต์ที่ได้มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 107-141 กรัมต่อตารางเมตร โดยกระจกาศที่ไม่เคลือบผงถ่านกัมมันต์มีค่าน้ำหนัก (แกรมเมต) เท่ากับ 107 g/m³ เมื่อเติมผงถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่มากขึ้นกระจกาศจะมีค่าน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยกระจกาศสูตร C2-C5 มีค่าแกรมเมตเท่ากับ 112, 116, 128 และ 141 g/m³

ความหนาของกระจกาศ มีความหนาอยู่ในช่วง 40-46 ไมครอน ซึ่งมีค่าความหนาและน้ำหนักกระจกาศที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับปริมาณแป้งและผงถ่านกัมมันต์ที่เคลือบลงไป โดยชั่งน้ำหนักและช่วงความหนาดังกล่าวถือเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับนำมาผลิตเป็นถุง หรือแผ่นปะหน้ากระจกาศลูกปุกสำหรับงานบรรจุภัณฑ์ได้

ตอนที่ 4.3.2 ศึกษาสมบัติของกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์

การศึกษาศมบัติทางสัญญาณวิทยาของพื้นผิวกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ดังแสดงในภาพที่ 4.25



ภาพที่ 4.25 สัญญาณวิทยาของกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์

จากภาพที่ 4.25 แสดงสัญญาณวิทยาของพื้นผิวกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า ที่ 15 kV แรงดัน 0.1 Pa.

พบว่ากระดาษสูตร C2, C3 และ C4 ที่มีการเคลือบผงถ่านกัมมันต์ลงไป 5%, 10% และ 20% ตามลำดับ จะเห็นการเกาะตัวกันของผงถ่านกัมมันต์ เป็นกลุ่ม ๆ บนผิวกระดาษ เป็นที่น่าสังเกตว่า กระดาษสูตร C5 ซึ่งเป็นสูตรที่มีการเติมผงถ่านกัมมันต์จำนวนมากที่สุดถึง 30% แม้จะมีการเติมผงถ่านในปริมาณที่มาก แต่ผงถ่านกัมมันต์กระจายตัวได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับกระดาษสูตร C2, C3 และ C4 และขณะที่ทำการทดลองเคลือบพบว่ากระดาษสูตร C5 (ผงถ่านกัมมันต์ 30%) สามารถเคลือบได้ง่าย ไหลลื่นได้ดีมากเมื่อเทียบกับสูตรอื่น

สรุป จากการศึกษาศมบัติกายภาพ สมบัติเชิงกลของกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ เมื่อยึดเป้าหมายในการพัฒนากระดาษสำหรับดูดซับก๊าซเอทิลีนเป็นหลัก จึงเลือกสูตรที่เติมผงถ่านกัมมันต์ให้ได้มากที่สุด และยังคงสมบัติอื่น ๆ ที่เหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ในการยืดอายุกล้วย จึงได้เลือกกระดาษสูตร C5 (ผงถ่านกัมมันต์ 30%) มาใช้สำหรับการทดลองขั้นตอนต่อไป

ตอนที่ 5 ศึกษาสมบัติในการชะลอการสุกของกล้วยหอมของกระดาษฟางข้าวผสม

กระดาษใช้แล้วและผงถ่านกัมมันต์

คัดเลือกกล้วยหอมที่ระยะเก็บเกี่ยวเพื่อการค้า ที่มีขนาด สี รูปร่าง และน้ำหนักใกล้เคียงกัน เก็บมาจากสวนเดียวกันปราศจากแมลงและรอยตำหนิความสมบูรณ์ร้อยละ 75-80 กระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ แบ่งเป็น 2 ขนาด คือ กระดาษแผ่นเล็ก 5 x 5 เซนติเมตร และกระดาษแผ่นใหญ่ 10 x 10 เซนติเมตร นำมาติดไว้ที่ด้านปากกล่องกระดาษลูกฟูก สารดูดเอทิลีนทางการค้าในรูปแบบซอง ยี่ห้อ BeFresh® ดังนี้

ชุดทดลอง P เป็นการทดลองชุดควบคุม โดยบรรจุกล้วยหอม 1 ลูก ลงในกล่องกระดาษลูกฟูกโดยตรง

ชุดทดลอง Q บรรจุกล้วยหอม 1 ลูก ลงในกล่องกระดาษลูกฟูก ที่ฝาด้านบนของกล่องกระดาษลูกฟูก มีกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์แผ่นเล็กติดไว้

ชุดทดลอง R บรรจุกล้วยหอม 1 ลูก ลงในกล่องกระดาษลูกฟูก ที่ฝาด้านบนของกล่องกระดาษลูกฟูก มีกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์แผ่นใหญ่ติดไว้

ชุดทดลอง S บรรจุกล้วยหอม 1 ลูก ลงในกล่องกระดาษลูกฟูก และใส่สารดูดเอทิลีนแบบซอง ยี่ห้อ BeFresh® จำนวน 1 ซอง

ปริมาณผงถ่านกัมมันต์บนกระดาษแผ่นเล็กและกระดาษแผ่นใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณผงถ่านกัมมันต์บนกระดาษแผ่นเล็ก

















































กระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ 5 X 5 เซนติเมตร	น้ำหนักผงถ่านกัมมันต์ (g.)
C2	0.43
C3	0.52
C4	0.56
C5	0.63

ตารางที่ 4.9 แสดงปริมาณผงถ่านบนกระดาษแผ่นใหญ่

กระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ 10 X 10 เซนติเมตร	น้ำหนักผงถ่านกัมมันต์ (g.)
C2	1.74
C3	2.09
C4	2.25
C5	2.51

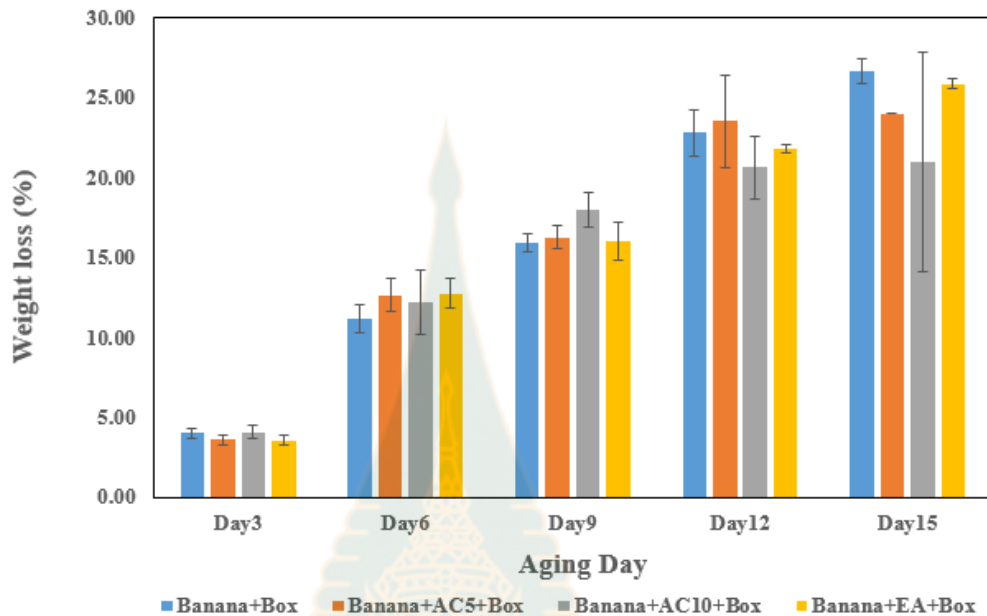
โดยเก็บกล้วยหอมในกล่องกระดาษลูกฟูก จำนวน 1 ผลต่อกล่อง คิดเป็น 1 ชุดการทดลอง โดยในการทดลองจะทำการทดลอง 3 ซ้ำ เก็บในห้องอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็น

ระยะเวลา 15 วัน โดยทำการเปิดกล่องเพื่อบันทึกผลทุก ๆ 3 วัน และทดลองเปรียบเทียบกับ การใช้ และ การวางแผนการทดลองแสดงในภาพที่ 4.26

(1) ออกแบบ การทดลอง	เริ่มการทดลอง	เก็บครั้งที่ 1	เก็บครั้งที่ 2	เก็บครั้งที่ 3	เก็บครั้งที่ 4	เก็บครั้งที่ 5
	Day 0	Day 3*	Day 6	Day 9	Day 12	Day 15
Treatment P กล้วย-กล้วย	Sample 1 	PO51 	PO61 	PO91 	P121 	P151 
	Sample 2 	PO52 	PO62 	PO92 	P122 	P152 
	Sample 3 	PO53 	PO63 	PO93 	P123 	P153 
Treatment Q กล้วย-กล้วย+ACS	Sample 1 	QO51 	QO61 	QO91 	Q121 	Q151 
	Sample 2 	QO52 	QO62 	QO92 	Q122 	Q152 
	Sample 3 	QO53 	QO63 	QO93 	Q123 	Q153 
Treatment R กล้วย-กล้วย+AC10	Sample 1 	RO51 	RO61 	RO91 	R121 	R151 
	Sample 2 	RO52 	RO62 	RO92 	R122 	R152 
	Sample 3 	RO53 	RO63 	RO93 	R123 	R153 
Treatment S กล้วย+SP-กล้วย	Sample 1 	SO51 	SO61 	SO91 	S121 	S151 
	Sample 2 	SO52 	SO62 	SO92 	S122 	S152 
	Sample 3 	SO53 	SO63 	SO93 	S123 	S153 

ภาพที่ 4.26 การวางแผนการทดลอง

การศึกษาวิจัยการสูญเสียน้ำหนักสดของกล้วยหอม ทำการบรรจุกล้วยตามเงื่อนไขที่กำหนดแล้วเปิดกล่องเพื่อบันทึกน้ำหนักของกล้วย ทุก 3 วันเป็นระยะเวลา 15 วัน ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.27

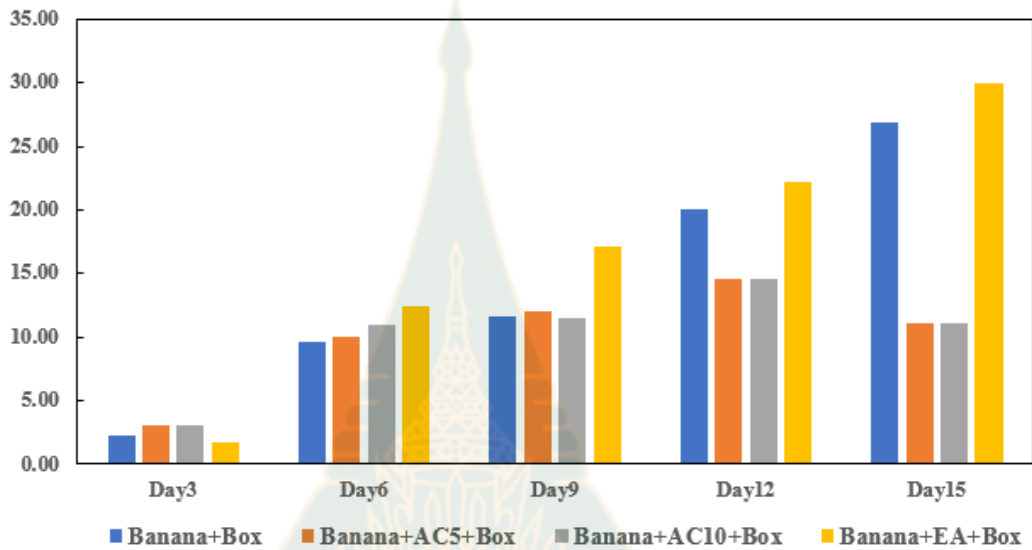


ภาพที่ 4.27 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักสดของกล้วยหอม

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อระยะเวลาการบรรจุกล้วยในกล่องกระดาษลูกฟูกเพิ่มมากขึ้น จะทำให้กล้วยสุกเพิ่มขึ้น จนสุกเต็มที่จนเปลือกกลายเป็นสีเหลืองทั้งหมด และส่งกลิ่นหอมเฉพาะออกมา พบว่าทุกชุดการทดลองทำให้กล้วยสุกได้ตามปกติ

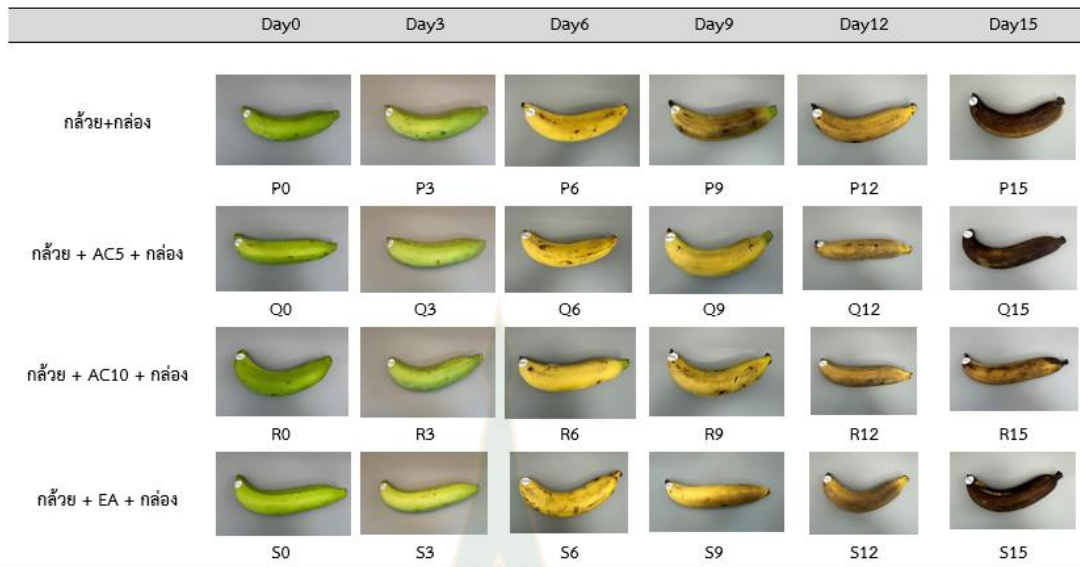
ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักสดของกล้วยหอมดังแสดงในภาพที่ 4.27 ผลการทดลองพบว่า เมื่อระยะเวลาการบรรจุกล้วยในกล่องกระดาษลูกฟูกเพิ่มมากขึ้น กล้วยจะมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักสดเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ชุดการทดลอง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองพบว่า การบรรจุกล้วยในกล่องพร้อมกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ขนาดมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกัน ตามด้วยการบรรจุกล้วยพร้อมสารดูดซับเอทิลีนทางการค้าและการบรรจุกล้วยในกล่องลูกฟูกธรรมดาตามลำดับ การบรรจุกล้วยในกล่องพร้อมกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ขนาด มีการสูญเสียน้ำหนักน้อย เมื่อเทียบกับชุดทดลองอื่น อาจเกิดจากกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ช่วยชะลอกลไกการสุกของผลกล้วยได้จริง ทำให้ชะลอการสูญเสียน้ำหนักของผลกล้วยได้ตามที่แสดงในผลการทดลอง

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีผิวกล้วยโดยใช้เครื่องวัดสี ทำการบรรจุกล้วยตามเงื่อนไขที่กำหนดแล้วเปิดกล่องเพื่อวัดค่าสี $L^*a^*b^*$ ของกล้วยหอม ทุก 3 วันเป็นระยะเวลา 15 วัน จากนั้นนำค่า $L^*a^*b^*$ มาคำนวณเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสี (ΔE) โดยผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.28 และการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยหอม บันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลดังแสดงในภาพที่ 4.29



ภาพที่ 4.28 ค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสีของกล้วยหอมที่คำนวณจากค่าสี $L^*a^*b^*$

จากภาพที่ 4.28 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสีของกล้วยหอมที่บรรจุอยู่ในกล่อง จากผลการทดลองพบว่า เมื่อระยะเวลาการบรรจุกล้วยในกล่องกระดาษลูกฟูกเพิ่มมากขึ้น กล้วยหอมจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าสี เพิ่มขึ้นในทุก ๆ ชุดการทดลอง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองพบว่า การบรรจุกล้วยพร้อมกับกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ขนาด (ชุดทดลอง Q และชุดทดลอง R) มีแนวโน้มที่จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสีน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับบรรจุกล้วยในกล่องกระดาษลูกฟูกธรรมดา (ชุดทดลอง P) และการบรรจุกล้วยพร้อมสารดูดซับเอทิลีนทางการค้า (ชุดทดลอง S) แสดงว่าการติดแผ่นดูดซับเอทิลีนที่ฝากล่องด้านในช่วยให้กล้วยหอมมีการเปลี่ยนแปลงสีที่ช้าลง (เปลือกกล้วยเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองได้ช้าลง) เมื่อเปรียบเทียบกับบรรจุในรูปแบบเดิม อธิบายได้ว่า ชุดทดลองบรรจุกล้วยพร้อมกับกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ มีผงถ่านกัมมันต์ที่สามารถดูดซับได้ทั้งก๊าซเอทิลีนได้ และช่วยชะลอการสุกของกล้วยได้นานถึง 12 วัน จากกล้วยปกติที่จะสุกภายใน 3 วัน



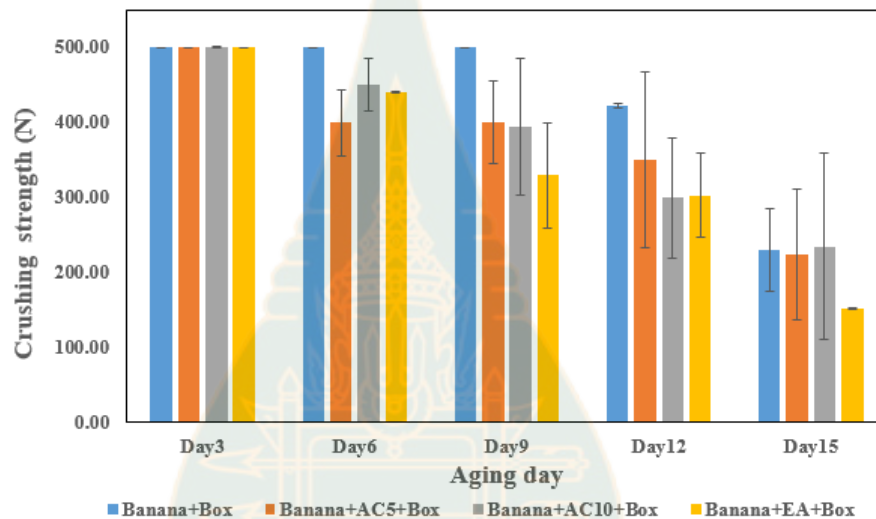
ภาพที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลงสีของกล้วย

จากภาพที่ 4.28 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสีของกล้วยหอมที่บรรจุอยู่ในกล่อง จากผลการทดลองพบว่า เมื่อระยะเวลาการบรรจุกล้วยในกล่องกระดาษลูกฟูกเพิ่มมากขึ้น กล้วยหอมจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าสี เพิ่มขึ้นในทุก ๆ ชุดการทดลอง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองพบว่า การบรรจุกล้วยพร้อมกับกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ขนาด (ชุดทดลอง Q และชุดทดลอง R) มีแนวโน้มที่จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสีน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการบรรจุกล้วยในกล่องกระดาษลูกฟูกธรรมดา (ชุดทดลอง P) และการบรรจุกล้วยพร้อมสารดูดซับเอทิลีนทางการค้า (ชุดทดลอง S) แสดงว่าการติดแผ่นดูดซับเอทิลีนที่ฝากล่องด้านในช่วยให้กล้วยหอมมีการเปลี่ยนแปลงสีที่ช้าลง (เปลือกกล้วยเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองได้ช้าลง) เมื่อเปรียบเทียบกับการบรรจุในรูปแบบเดิม อธิบายได้ว่า ชุดทดลองบรรจุกล้วยพร้อมกับกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ มีผงถ่านกัมมันต์ที่สามารถดูดซับได้ทั้ง ก๊าซเอทิลีนได้ และช่วยชะลอการสุกของกล้วยได้นานถึง 12 วัน จากกล้วยปกติที่จะสุกภายใน 3 วัน

จากภาพที่ 4.29 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสีของกล้วยหอม บันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัล ทุก 3 วันเป็นระยะเวลา 15 วัน จากภาพถ่ายแสดงให้เห็นว่า เปลือกกล้วยจะเปลี่ยนแปลงสีจากสีเขียวเป็นสีเหลืองและกลายเป็นสีดำภายในวันที่ 15 ในทุก ๆ ชุดการทดลอง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองพบว่า การบรรจุกล้วยพร้อมกับกระดาษเคลือบผงถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ขนาด (ชุดทดลอง Q และชุดทดลอง R) มีแนวโน้มที่จะมี ค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสีน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการบรรจุกล้วยในกล่องกระดาษลูกฟูกธรรมดา (ชุดทดลอง P) และการบรรจุกล้วยพร้อมสารดูดซับเอทิลีนทางการค้า (ชุดทดลอง S) แสดงว่าการติดแผ่น

ดูดซับเอทิลีนจากพวงถ่านกัมมันต์ที่ฝากกล่องด้านใน ช่วยให้กล้วยหอมมีการเปลี่ยนแปลงของสีที่ช้าลง (เปลือกกล้วยเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองได้ช้าลง) เมื่อเปรียบเทียบกับ การบรรจุในรูปแบบเดิม อาจอธิบายได้ว่า พวงถ่านกัมมันต์ในกระดาษ สามารถดูดซับได้ทั้งก๊าซเอทิลีนได้ และช่วยชะลอการสุก และชะลอการเปลี่ยนสีของเปลือกกล้วยได้

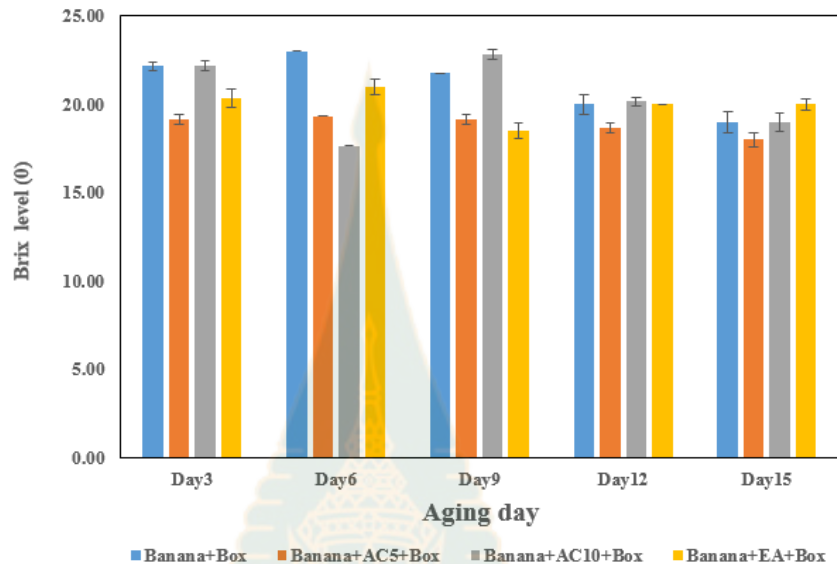
ศึกษาความแน่นเนื้อของกล้วย จากการศึกษาค่าความแน่นเนื้อของกล้วย ด้วยการทดสอบ Crush Strength และแสดงผลการทดลองในภาพที่ 4.30



ภาพที่ 4.30 ความแน่นเนื้อของกล้วยหอม

จากภาพที่ 4.30 แสดงผลการทดสอบความแน่นเนื้อของกล้วย ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อระยะเวลาการบรรจุกล้วยในกล่องกระดาษลูกฟูกเพิ่มมากขึ้น กล้วยหอมจะมีค่าความแน่นเนื้อลดลงในทุก ๆ ชุดการทดลอง เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในผลกล้วย และส่งผลต่อความแน่นเนื้อของกล้วย และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองพบว่า กล้วยหอมที่บรรจุธรรมดา (ชุดทดลอง P) สามารถคงความแน่นเนื้อในผลกล้วยได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการบรรจุรูปแบบอื่น ตามด้วยการบรรจุกล้วยหอมในกล่องที่ติดกระดาษดูดซับเอทิลีน และการบรรจุกล้วยในกล่องที่มีสารดูดซับเอทิลีนแบบซองตามลำดับ (ชุดทดลอง Q, ชุดทดลอง R และ ชุดทดลอง S)

ศึกษาปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของกล้วย จากการศึกษากปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของกล้วย ใช้เครื่อง Hand Refractometer โดยทำการวัดค่าจากผลกล้วยที่สูงแล้ว โดยรายงานผลเป็นค่าองศาบริกซ์ ซึ่งค่าดังกล่าวจะเชื่อมโยงไปสู่ระดับความหวานของกล้วย ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.31



ภาพที่ 4.31 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของกล้วย

จากภาพที่ 4.31 แสดงผลการทดสอบปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของกล้วย ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ทุกชุดการทดลองทำให้กล้วยสุกได้ตามปกติ และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของกล้วย (หรือค่าความหวาน) มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 20.0–20.5 องศาบริกซ์ แสดงให้เห็นว่าการใช้กระดาษดูดซับเอทิลีนจากฟงถ่านกัมมันต์ไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้หรือค่าความหวานของกล้วย

สรุป การบรรจุกล้วยในกล่องพร้อมกระดาษเคลือบฟงถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ขนาดมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยที่สุด ตามด้วยการบรรจุกล้วยพร้อมสารดูดซับเอทิลีนทางการค้าและการบรรจุกล้วยในกล่องลูกฟูกธรรมดาตามลำดับ การบรรจุกล้วยพร้อมกับกระดาษเคลือบฟงถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ขนาดมีแนวโน้มที่จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงของค่าสีน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การบรรจุกล้วยในกล่องกระดาษลูกฟูกธรรมดา และการบรรจุกล้วยพร้อมสารดูดซับเอทิลีนทางการค้า จึงช่วยชะลอการสุกของกล้วยได้นานถึง 12 วัน จากกล้วยปกติที่จะสุกภายใน 3 วัน กล้วยหอมที่บรรจุในกล่องลูกฟูกธรรมดา สามารถคงความแน่นเนื้อในผลกล้วยได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการบรรจุรูปแบบอื่น การใช้กระดาษดูดซับเอทิลีนจากฟงถ่านกัมมันต์ ไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้หรือค่าความหวานของกล้วยสุก