

การเปรียบเทียบการผลิตเยื่อโซดา เยื่อคราฟต์ และเยื่อคราฟต์ดัดแปรจากลำต้น(เทียม)กล้วย

นางสาวปาณิสรา พิริยะวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPARISON OF SODA, KRAFT AND MODIFIED KRAFT PULPING
FROM BANANA PSEUDOSTEM

Miss Panisa Phiriyawat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Pulp and Paper Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบการผลิตเยื่อไชดา เยื่อคราฟต์ และเยื่อคราฟต์ดัดแปรจากลำต้น(เทียม)กล้วย
โดย	นางสาวปาณิสรา พิริยะวรรณ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. อรัญ หาญสีบสาย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรัญ หาญสีบสาย)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีนันท ประสงค์สุข)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.เลอพงศ์ จารุพันธ์)

ปาณิศา พิริยะวรรณ : การเปรียบเทียบการผลิตเยื่อไชดา เยื่อคราฟต์ และเยื่อคราฟต์ดัดแปรจากลำต้น(เทียม)กล้วย. (COMPARISON OF SODA, KRAFT AND MODIFIED KRAFT PULPING FROM BANANA PSEUDOSTEM)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร. อรัญ หาญสีบสาย, 128 หน้า.

งานวิจัยนี้เปรียบเทียบการผลิตเยื่อไชดา คราฟต์ และคราฟต์ดัดแปรจากลำต้นกล้วย เริ่มจากการผลิตเยื่อแบบไชดาโดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับร้อยละ 10 15 และ 20 ของน้ำหนักแห้ง พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลผลิตเยื่อและค่าปทานัมเบอร์ลดลง แต่ความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 15 ของน้ำหนักแห้ง สำหรับการผลิตเยื่อแบบคราฟต์โดยใช้ค่าซัลฟิเต้เท่ากับร้อยละ 20 25 และ 30 พบว่าเมื่อค่าซัลฟิเต้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลผลิตเยื่อลดลงแต่ความขาวสว่างเพิ่มขึ้น ค่าซัลฟิเต้ที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 25 การผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนเท่ากับร้อยละ 0.1 และ 0.2 ของน้ำหนักแห้ง พบว่าการใช้แอนทราควิโนนส่งผลให้ผลผลิตเยื่อและความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น แต่ค่าปทานัมเบอร์ และความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง ปริมาณแอนทราควิโนนที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 0.2 สำหรับการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปรโดยใช้เมทานอลร้อยละ 20 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด พบว่าให้ผลไปในทิศทางเดียวกับการใช้แอนทราควิโนน ยกเว้นการใช้เมทานอลส่งผลให้ความยาวของเส้นใยลดลง และจากการเปรียบเทียบผลของชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ พบว่าการผลิตเยื่อด้วยวิธีคราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนหรือเมทานอลให้ผลผลิตเยื่อสูงกว่าการผลิตเยื่อแบบคราฟต์และไชดา การผลิตเยื่อด้วยวิธีคราฟต์ให้ค่าค่าปทานัมเบอร์สูงสุด ซึ่งค่าค่าปทานัมเบอร์นี้ลดลงเมื่อมีการใช้แอนทราควิโนน และ/หรือ เมทานอล การผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปรโดยใช้เมทานอลและแอนทราควิโนนให้ปริมาณลิกนินในเยื่อน้อยสุด โดยให้ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสูงกว่าการผลิตเยื่อแบบคราฟต์และแบบไชดา การผลิตเยื่อคราฟต์แบบดัดแปรให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงต่ำกว่าการผลิตเยื่อแบบคราฟต์และไชดา แต่ให้ความต้านทานแรงฉีกสูงกว่าการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ โดยค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับการผลิตเยื่อแบบไชดา

สาขาวิชา เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

5272419823 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY

KEYWORDS : BANANA PSEUDOSTEM / SODA PULPING / KRAFT PULPING /
MODIFIED KRAFT PULPING / ANTHRAQUINONE / METHANOL

PANISA PHIRIYAWAT : COMPARISON OF SODA, KRAFT AND
MODIFIED KRAFT PULPING FROM BANANA PSEUDOSTEM.

ADVISOR : ASSOC.PROF. ARAN HANSUEBSAI, Ph.D., 128 pp.

This research compared soda, kraft and modified kraft pulping of banana pseudostem. Soda pulping was done using sodium hydroxide (NaOH) dosages of 10, 15 and 20% based on oven dried (O.D.) chip weight. Increasing NaOH decreased pulp yield and kappa number but increase tear resistance. The optimal dosage of NaOH was 15%. Kraft pulping was done using sulfidities equal to 20, 25 and 30%. Higher sulfidity led to lower pulp yield but higher brightness. The optimal sulfidity was 25%. Modified kraft pulping was done using anthraquinone (AQ) dosages of 0.1 and 0.2 based on O.D. chip weight. Using AQ increased pulp yield and tear resistance but decreased kappa number and tensile strength. The optimal dosage of AQ was 0.2%. Modified kraft pulping using 20% of methanol based on total liquid volume was executed. Using methanol provided the results similar to using AQ except lower fiber length. When all pulping methods were compared, it was found that modified kraft pulping with AQ or methanol gave higher pulp yield than kraft and soda pulping. Highest kappa number obtained by kraft pulping; however, kappa number was lower when AQ and/or methanol was used with kraft pulping. Modified kraft pulping with methanol and AQ offered pulp with lowest lignin content but higher alpha cellulose and hemicellulose than kraft and soda pulping. Tensile strength obtained from modified pulping was lower than from kraft and soda pulping. However, tear resistance obtained from modified kraft pulping was higher than from kraft pulping but close to soda pulping.

Field of Study : Pulp and Paper

Student's Signature

Academic Year : 2011.....

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรัญ หาญสืบสาย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ สนับสนุนและให้กำลังใจ ชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์สมพร ชัยอารีย์กิจ ผู้ทำหน้าที่เสมือนเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาอีกหนึ่งท่าน ที่กรุณาเสียสละเวลาชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ สนับสนุน ให้กำลังใจและชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนดูแลผู้วิจัยตั้งแต่แรกเข้าจนจบการศึกษาเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข และอาจารย์ ดร.เลอพงส์ จารุพันธ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาให้คำแนะนำและทำการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือต่างๆ ในระหว่างการทำวิจัย

ขอขอบคุณพี่สมชาย ภวชิณวร เพื่อนๆ และพี่ๆ สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจในการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	1
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย.....	3
1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.8 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	6
2.2 เส้นใย.....	6
2.2.1 องค์ประกอบของเส้นใย.....	6
2.2.1.1 ชั้นมิดเดิลลามেলা.....	6
2.2.1.2 ชั้นผนังเซลล์.....	7
2.2.1.3 ลูเมน.....	7
2.2.2 เคมีของเส้นใย.....	8
2.2.2.1 เซลลูโลส.....	8
2.2.2.2 เฮมิเซลลูโลส.....	8

	หน้า
2.2.2.3 ลิกนิน.....	9
2.2.2.4 สารแทรก.....	10
2.3 การผลิตเยื่อกระดาษ.....	10
2.3.1 การผลิตเยื่อเชิงกล.....	11
2.3.1.1 การผลิตเยื่อแบบหีบกด.....	11
2.3.1.2 การผลิตเยื่อแบบจวนกด.....	11
2.3.1.3 การผลิตเยื่อแบบเชิงกลและความร้อน.....	11
2.3.2 การผลิตเยื่อเคมี.....	11
2.3.2.1 การผลิตเยื่อแบบซัลไฟต์.....	12
2.3.2.2 การผลิตเยื่อแบบซัลเฟตหรือคราฟต์.....	12
2.3.2.3 การผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปร.....	14
2.4 กรรมวิธีการผลิตกระดาษ.....	18
2.4.1 การผลิตเยื่อ.....	18
2.4.2 การเตรียมน้ำเยื่อ.....	18
2.4.2.1 การกระจายเยื่อ.....	18
2.4.2.2 การปรับความเข้มข้น.....	18
2.4.2.3 การบด/ตีเยื่อ.....	19
2.4.2.4 การกำจัดสิ่งปลอมปนและอากาศ.....	22
2.5 สัณฐานวิทยาของเส้นใย.....	23
2.6 สมบัติเยื่อและกระดาษ.....	23
2.6.1 สมบัติทางโครงสร้าง.....	24
2.6.1.1 น้ำหนักมาตรฐาน.....	24
2.6.1.2 ความหนา.....	24
2.6.1.3 ความหนาแน่นปรากฏ.....	24
2.6.1.4 ความเรียบหรือความหยาบ.....	25
2.6.2 สมบัติเชิงกลของกระดาษ.....	25
2.6.2.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	25
2.6.2.2 ความแข็งแรงต่อแรงฉีก/ความต้านทานแรงฉีก.....	26

	หน้า
2.6.3 สมบัติเชิงแสงของกระดาษ.....	27
2.6.3.1 ความขาวสว่าง.....	27
2.6.3.2 ความทึบแสง.....	27
2.7 กล้วย.....	28
2.7.1 โครงสร้างของลำต้นใต้ดิน.....	28
2.7.2 ลำต้นเหนือดิน.....	29
2.7.3 ลำก้วย/กาบใบและใบ.....	29
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	31
3.1.1 วัสดุและสารเคมี.....	31
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	31
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.2.1 การทดลองตอนที่ 1: การผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดาจากต้นกล้วย.....	32
3.2.2 การทดลองตอนที่ 2: การผลิตเยื่อวิธีคราฟต์จากต้นกล้วย.....	37
3.2.3 การทดลองตอนที่ 3: การผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ดัดแปร โดยใช้แอนทราควิโนน.....	39
3.2.4 การทดลองตอนที่ 4: การผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ดัดแปร โดยใช้เมทานอล.....	40
3.2.5 การทดลองตอนที่ 5: การผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ดัดแปร โดยใช้แอนทราควิโนนร่วมกับเมทานอล.....	42
3.2.6 การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีต่างๆ.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	45
4.1 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีโซดา.....	45
4.2 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์.....	55

	หน้า
4.3 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอน ทราควิโนน.....	67
4.4 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ดัดแปรโดยใช้เมทานอล	77
4.5 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์โดยใช้แอนทราควิโนน ร่วมกับเมทานอล.....	87
4.6 การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีต่างๆ.....	98
 บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	 110
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	110
5.1.1 ผลจากการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีโซดา.....	110
5.1.2 ผลจากการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์.....	110
5.1.3 ผลจากการผลิตเยื่อด้วยจากต้นกล้วยวิธีคราฟต์ดัดแปรโดยใช้ แอนทราควิโนน.....	110
5.1.4 ผลจากการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ดัดแปรโดยใช้ เมทานอล.....	111
5.1.5 ผลจากการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนท ราควิโนน ร่วมกับเมทานอล.....	111
5.1.6 ผลจากการเปรียบเทียบการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีต่างๆ	111
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	112
 รายการอ้างอิง.....	 114
ภาคผนวก.....	117
ภาคผนวก ก.....	118
ภาคผนวก ข.....	122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	128

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4-1	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยือกกล้วย.....	45
4-2	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยือกกล้วย.....	46
4-3	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยือกกล้วย.....	48
4-4	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยือกกล้วย.....	48
4-5	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยือกกล้วย.....	55
4-6	ผลของค่าซัลฟิติกที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยือกกล้วย.....	56
4-7	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าซัลฟิติกที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยือกกล้วย.....	56
4-8	ผลของค่าซัลฟิติกที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยือกกล้วย....	59
4-9	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าซัลฟิติกที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยือกกล้วย.....	59
4-10	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าซัลฟิติกที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากเยือกกล้วย.....	66
4-11	ผลของปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยือกกล้วย.....	67
4-12	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยือกกล้วย.....	67
4-13	ผลของปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยือกกล้วย.....	69
4-14	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยือกกล้วย.....	70
4-15	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของแอนทราควิโนนที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยือกกล้วย.....	77

ตารางที่	หน้า
4-16	ผลของปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยือกกล้วย..... 78
4-17	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยือกกล้วย..... 78
4-18	ผลของปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสัดส่วนวิทยาของเส้นใยของเยือกกล้วย..... 80
4-19	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสัดส่วนวิทยาของเส้นใยของเยือกกล้วย..... 80
4-20	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของเมทานอลที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยือกกล้วย..... 87
4-21	ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ตัดโดยใช้แอนทราควิโนนร่วมกับเมทานอลในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยือกกล้วย..... 88
4-22	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ตัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนร่วมกับเมทานอลในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยือกกล้วย..... 88
4-23	ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ตัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนร่วมกับเมทานอลในการต้มเยื่อต่อสัดส่วนวิทยาของเส้นใยของเยือกกล้วย..... 90
4-24	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ตัดแปรร่วมกับแอนทราควิโนนและเมทานอลที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อลักษณะเส้นใยของเยื่อ..... 90
4-25	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ตัดแปรร่วมโดยใช้แอนทราควิโนนร่วมกับเมทานอลในการต้มเยื่อต่อสมบัติของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยือกกล้วย..... 97
4-26	ผลของชนิดการผลิตเยื่อต่อสมบัติของเยือกกล้วย..... 98
4-27	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของชนิดการผลิตเยื่อต่อสมบัติของเยือกกล้วย..... 99
4-28	ผลของชนิดการผลิตเยื่อต่อองค์ประกอบเคมีของเยือกกล้วย..... 101
4-29	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของชนิดการผลิตเยื่อต่อองค์ประกอบเคมีของเยือกกล้วย 101
4-30	ผลของชนิดการผลิตเยื่อต่อสัดส่วนวิทยาของเส้นใยของเยือกกล้วย..... 103
4-31	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของชนิดการผลิตเยื่อต่อสัดส่วนวิทยาของเส้นใยของเยือกกล้วย..... 103

ตารางที่		หน้า
4-32	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของชนิดการผลิตเยื่อต่อสมบัติของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	109

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	โครงสร้างของเส้นใย โดยแสดงชั้นมิดเดิลเลเมลลา ชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (p) ชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิ (S_1 , S_2 และ S_3) (ก) และแสดงการพัฒนาจากเซลล์เป็นเส้นใย (ข).....	7
2-2	โครงสร้างของเซลลูโลส.....	8
2-3	โครงสร้างของลิกนิน.....	10
2-4	ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในระยะต่างๆ ระหว่างเกิดปฏิกิริยาการกำจัดลิกนิน (ก) และปริมาณองค์ประกอบเคมีต่างๆ ของเส้นใยที่เหลืออยู่ในระหว่างเกิดปฏิกิริยาการกำจัดลิกนิน (ข) ตามลำดับ.....	13
2-5	แสดงการเกิดปฏิกิริยาการสลายคาร์โบไฮเดรตหรือ peeling reaction	14
2-6	แสดงลักษณะการทำปฏิกิริยาของแอนทราควิโนน.....	16
2-7	แสดงผลของเมทานอลที่มีต่อคัปปานัมเบอร์ (ก) และ ผลของเมทานอลที่มีต่อความหนืดของเยื่อ.....	17
2-8	ลักษณะของเครื่องบดแบบกรวย.....	19
2-9	เครื่องบดเยื่อแบบจานบด (บน) และลักษณะที่จานบดในเครื่องบดเยื่อ (ล่าง)	20
2-10	เครื่องตีเยื่อ.....	21
2-11	เครื่องกำจัดสิ่งปลอมปน (centrifugal cleaner).....	22
2-12	Elmendorf internal resistance test.....	27
2-13	ลำต้นไต้ดินกล้วย	28
3-1	ลักษณะชิ้นต้นกล้วยที่ถูกตัดก่อนนำไปตากแห้ง (ก) และ ชิ้นต้นกล้วยที่ถูกตากแห้งแล้ว (ข)	33
4-1	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	50
4-2	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	51
4-3	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของ..... กระดาษที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	52

ภาพที่	หน้า	
4-4	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	52
4-5	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	54
4-6	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	54
4-7	ผลของค่าซัลฟิไดตีต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบจากเยื่อคราฟต์....	62
4-8	ผลของค่าซัลฟิไดตีต่อความเรียบของแผ่นทดสอบจากเยื่อคราฟต์.....	62
4-9	ผลของค่าซัลฟิไดตีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบจากเยื่อคราฟต์.....	63
4-10	ผลของค่าซัลฟิไดตีต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบจากเยื่อคราฟต์.....	64
4-11	ผลของค่าซัลฟิไดตีต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบจากเยื่อคราฟต์.....	65
4-12	ผลของค่าซัลฟิไดตีต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบจากเยื่อคราฟต์.....	65
4-13	ผลของปริมาณแอนทราควิโนนต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	72
4-14	ผลของปริมาณแอนทราควิโนนต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	73
4-15	ผลของปริมาณแอนทราควิโนนต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	74
4-16	ผลของปริมาณแอนทราควิโนนต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	75
4-17	ผลของปริมาณแอนทราควิโนนต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	75
4-18	ผลของปริมาณแอนทราควิโนนต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	76
4-19	ผลของปริมาณเมทานอลต่อความหนาแน่นปรากฏของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	82

ภาพที่		หน้า
4-20	ผลของปริมาณเมทานอลต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย	83
4-21	ผลของเมทานอลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	84
4-22	ผลของปริมาณเมทานอลต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่..... ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	85
4-23	ผลของปริมาณเมทานอลต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อ..... กล้วย.....	86
4-24	ผลของปริมาณเมทานอลต่อความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	86
4-25	ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ตัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอล ต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	92
4-26	ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ตัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอล ต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	93
4-27	ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ตัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอล ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	94
4-28	ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ตัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอล ต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	95
4-29	ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ตัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอล ต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	96
4-30	ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ตัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอล ต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	97
4-31	ผลของชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบที่ ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	104
4-32	ผลของชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจาก เยื่อกล้วย.....	105
4-33	ผลของชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่น ทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	106
4-34	ผลของชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่น ทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	107

ภาพที่		หน้า
4-35	ผลของชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	108
4-36	ผลของชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย.....	108
5-1	การกระจายตัวของเส้นใยภายในแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วยที่ไม่ผ่านการบด (ก) และเยื่อกล้วยที่ผ่านการบด (ข).....	113
1	บอมบ์ที่ใช้ในการต้มเยื่อ.....	118
2	เครื่องต้มเยื่อ.....	118
3	Fiber quality analyzer : FQA.....	119
4	Canadian Standard Freeness tester (CSF)	119
5	เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid-Köthen.....	120
6	เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	120
7	เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก.....	121
8	เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง (Color Touch PC)	121

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอัตราการใช้เยื่อและกระดาษเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในส่วนของประเทศไทยค่อนข้างมีข้อจำกัดในเรื่องของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อ เนื่องจากมีพื้นที่ป่าที่จำกัด การหาแหล่งเยื่อกระดาษใหม่จึงกลายเป็นสิ่งสำคัญ พืชที่ไม่มีเนื้อไม้ (non woody plant) เช่น ข้าว นุ่น ข้าวโพดกล้วย จัดเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการปลูกสั้น ปลูกได้ในดินแทบทุกสภาพและสามารถหาได้ตลอดทั้งปี จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าองค์ประกอบเคมีของต้นกล้วยมีปริมาณเซลลูโลสค่อนข้างสูง คือร้อยละ 60-70 ในขณะที่มีปริมาณลิกนินค่อนข้างต่ำคือประมาณร้อยละ 12 โดยส่วนของเปลือกนอกมีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าส่วนอื่น [1] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำต้นกล้วยซึ่งเป็นพืชที่ไม่มีเนื้อไม้มาทดลองใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อและกระดาษ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของสารเคมีที่ใช้และเปรียบเทียบการผลิตเยื่อแบบโซดาคราฟต์ รวมทั้งคราฟต์ดัดแปรจากต้นกล้วย จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาวิธีในการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยที่ทำให้ได้เยื่อและกระดาษที่มีคุณสมบัติดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เปรียบเทียบผลของการผลิตเยื่อโซดา คราฟต์ และคราฟต์ดัดแปรจากต้นกล้วยที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้

1.2.2 ศึกษาผลของแอนทราควิโนนและเมทานอลที่ใช้ในการผลิตเยื่อคราฟต์ดัดแปรจากต้นกล้วยที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 6 ตอน ดังนี้

1.3.1 การหาภาวะการผลิตเยื่อที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา (soda pulping) จากต้นกล้วย โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) ที่ปริมาณร้อยละ 10 15 และ 20 ของน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง (liquor-to-wood ratio, L:W) คือ 10 ต่อ 1 ต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำเยื่อที่ได้ไปวัดค่าสภาพระบายน้ำได้หากค่าที่ได้สูงกว่า 150-200 มิลลิลิตร ต้องนำเยื่อไปบดด้วยเครื่องบดเยื่อ

(valley beater) จนได้ค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ แบ่งเยื่อส่วนหนึ่งมาวิเคราะห์สมบัติของเยื่อ เช่น ผลผลิตเยื่อ คัปปานัมเบอร์ ปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ และสัดส่วนวิทยาของเส้นใยของเยื่อด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใย (fiber quality analyzer, FQA) จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัมต่อตารางเมตร แล้วนำแผ่นทดสอบที่ได้ไปวัดสมบัติต่างๆ เช่น ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความต้านทานแรงฉีก ความหนาแน่น ความขาวสว่าง และความทึบแสง เป็นต้น ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้เพื่อหาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมในการต้มเยื่อโซดาจากต้นกล้วย

1.3.2 การหาภาวะการผลิตเยื่อที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเยื่อวิธีคราฟต์ (kraft pulping) โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมซึ่งหาได้จากการทดลองในข้อ 1.3.1 และใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ตามค่าซัลฟิดิตี (sulfidity) เท่ากับร้อยละ 20 25 และ 30 อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง คือ 10 ต่อ 1 ต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำเยื่อที่ได้ไปวัดค่าสภาพระบายได้ หากค่าที่ได้สูงกว่าช่วง 150-200 มิลลิลิตร ต้องนำเยื่อไปบดด้วยเครื่องบดเยื่อจนได้ค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ แบ่งเยื่อที่ได้ส่วนหนึ่งมาวิเคราะห์สมบัติของเยื่อ ดังที่กล่าวมาแล้วในข้อ 1.3.1 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัมต่อตารางเมตร แล้วนำแผ่นทดสอบที่ได้ไปวัดสมบัติต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วในข้อ 1.3.1 ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้เพื่อหาค่าซัลฟิดิตีที่เหมาะสมในการต้มเยื่อคราฟต์จากต้นกล้วย

1.3.3 การผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนน โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 1.3.1 ใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ตามค่าซัลฟิดิตีที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 1.3.2 และใช้แอนทราควิโนนในปริมาณร้อยละต่างๆ กัน คือ 0.1 และ 0.2 ของน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง คือ 10 ต่อ 1 ต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำเยื่อที่ได้ส่วนหนึ่งไปวัดค่าสภาพระบายได้ หากค่าที่ได้สูงกว่าช่วง 150-200 มิลลิลิตร ต้องนำเยื่อไปบดด้วยเครื่องบดเยื่อจนได้ค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ จากนั้นนำเยื่อที่ได้ส่วนหนึ่งมาวิเคราะห์สมบัติของเยื่อ ดังที่กล่าวมาแล้วในข้อ 1.3.1 แล้วนำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัมต่อตารางเมตร นำแผ่นทดสอบที่ได้ไปวัดสมบัติต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วในข้อ 1.3.1 ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้เพื่อหาปริมาณแอนทราควิโนนที่เหมาะสม

1.3.4 การผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปรโดยใช้เมทานอล โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 1.3.1 ใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ตามค่าซัลฟิดิตีที่เหมาะสม

ซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 1.3.2 และใช้ปริมาณเมทานอลร้อยละ 20 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมดที่ใช้ในการต้มเยื่อ อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง คือ 10 ต่อ 1 ต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำเยื่อที่ได้ส่วนหนึ่งไปวัดค่าสภาพระบายได้ หากค่าที่ได้สูงกว่าช่วง 150-200 มิลลิลิตร ต้องนำเยื่อไปบดด้วยเครื่องบดเยื่อจนได้ค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ นำเยื่อที่ได้ส่วนหนึ่งมาวิเคราะห์สมบัติของเยื่อ ดังที่กล่าวมาแล้วในข้อ 1.3.1 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัมต่อตารางเมตร แล้วนำแผ่นทดสอบที่ได้ไปวัดสมบัติต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วในข้อ 1.3.1 ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้

1.3.5 การผลิตเยื่อแบบกราฟต์ดัดแปรโดยใช้เมทานอลและแอนทราควิโนน โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 1.3.1 ใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ตามค่าซัลไฟด์ดีที่ที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 1.3.2 ใช้ปริมาณแอนทราควิโนนที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองในข้อ 1.3.3 และใช้ปริมาณเมทานอลร้อยละ 20 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมดที่ใช้ในการต้มเยื่อ อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง คือ 10 ต่อ 1 ต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำเยื่อที่ได้ไปวัดค่าสภาพระบายได้ หากค่าที่ได้สูงกว่าช่วง 150-200 มิลลิลิตร ต้องนำเยื่อไปบดด้วยเครื่องบดเยื่อจนได้ค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ นำเยื่อที่ได้ส่วนหนึ่งมาวิเคราะห์สมบัติของเยื่อ ดังที่กล่าวมาแล้วในข้อ 1.3.1 จากนั้นนำเยื่อส่วนที่เหลือมาทำการขึ้นแผ่นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัมต่อตารางเมตร แล้วนำแผ่นทดสอบที่ได้ไปวัดสมบัติต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วในข้อ 1.3.1 ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

เปรียบเทียบผลของการผลิตเยื่อโซดา กราฟต์ และกราฟต์ดัดแปรจากต้นกล้วยที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้ รวมถึงผลของสารเคมีที่ใช้ในการผลิตเยื่อดังกล่าว ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ แอนทราควิโนนและเมทานอล ต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

ในทางเกษตรกรรมต้นกล้วยถือเป็นสิ่งที่เหลือหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิต ซึ่งเมื่อเกษตรกรได้ทำการเก็บเกี่ยวผลและใบของกล้วย ต้นกล้วยก็จะถูกตัดเพื่อนำไปเป็นอาหารสัตว์บ้างหรือไม่ก็ถูกปล่อยให้แห้ง ในการทดลองนี้การเตรียมขึ้นไม้จากลำต้นกล้วยนั้นยากที่จะทำให้มีขนาดเป็นมาตรฐานเหมือนกันทุกชิ้น เนื่องจากการใช้แรงงานคนในการเตรียมขึ้นไม้จากลำต้นกล้วย รวมทั้งขนาดและสรีระที่ต่างกันของต้นกล้วยแต่ละต้น ดังนั้นการที่จะนำต้นกล้วยมาผลิตเป็นเยื่อและกระดาษในระดับอุตสาหกรรม อาจต้องมีการออกแบบและผลิตเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการที่

จะตัดขึ้นกล้วยออกมาให้สม่ำเสมอและมีขนาดเป็นมาตรฐานเดียวกัน เพื่อให้ผลผลิตที่ได้มีความแปรผันน้อยลง

1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

การผลิตเยื่อกระดาษ (pulping) คือ กระบวนการที่พยายามแยกเส้นใยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ โดยอาจมีการเอาลิกนินออกหรือไม่เอาออก เพื่อนำเส้นใยที่ได้ไปใช้ในการผลิตกระดาษ การผลิตเยื่อกระดาษแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักคือ การผลิตเยื่อเชิงกล (mechanical pulping) และการผลิตเยื่อเคมี (chemical pulping)

การผลิตเยื่อเคมี (chemical pulping) เป็นวิธีการที่ใช้สารเคมีมาทำปฏิกิริยากับลิกนินเพื่อละลายเอาลิกนินออก ทำให้เส้นใยแยกตัวออกจากกันได้ง่ายขึ้น และเนื่องจากลิกนินถูกกำจัดออกเยื่อที่ได้จึงมีความขาวสว่างกว่า แข็งแรงกว่า และมีโอกาสเกิดความเหลืองได้น้อยกว่าเยื่อที่ผลิตมาจากการผลิตเยื่อเชิงกล เพราะเยื่อเคมีจะเสถียรกับความร้อน แสงและความชื้นมากกว่า

การผลิตเยื่อแบบซัลเฟตหรือคราฟต์ (sulfate pulping or kraft pulping) เป็นกระบวนการที่เป็นต่างและดัดแปลงมาจากวิธีโซดา (soda process) ที่มีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว โดยในการผลิตเยื่อแบบคราฟต์จะมีการใช้โซเดียมซัลไฟด์ (sodium sulfide, Na_2S) เพิ่มเข้ามาเป็นสารเคมีที่ใช้ในการผลิตเยื่อด้วย โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน ส่วนโซเดียมซัลไฟด์จะทำหน้าที่ตัดโมเลกุลของลิกนินให้สั้นลงและเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเกลือของโซเดียมซึ่งสามารถละลายออกมากับน้ำดำ (black liquor)

กระบวนการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปร (modified kraft pulping) เป็นกระบวนการผลิตเยื่อแบบคราฟต์โดยที่มีการนำเอาสารเคมีชนิดอื่นเพิ่มลงไปด้วย ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการผลิตเยื่อให้ดีขึ้นหรือลดต้นทุนการผลิตเยื่อ ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้เติม เช่น แอนทราควิโนน เมทานอล เป็นต้น

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อโซดา คราฟต์ และคราฟต์ดัดแปรจากต้นกล้วยและผลของแอนทราควิโนนและเมทานอลที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้

1.8 วิธีดำเนินการวิจัย

1.8.1 ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

1.8.2 ศึกษาวิธีการและเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

1.8.3 ผลิตเยื่อแบบโซดาจากต้นกล้วย

1.8.4 ผลิตเยื่อแบบคราฟต์จากต้นกล้วย

1.8.5 ผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปรจากต้นกล้วยโดยใช้แอนทราควิโนน และ/หรือ เมทานอล

1.8.6 ทดสอบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้

1.8.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.8.8 เรียบเรียงเนื้อหา เขียนวิทยานิพนธ์และส่งผลงานเผยแพร่

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

กระดาษเริ่มต้นผลิตขึ้นจากพืชไม่มีเนื้อไม้ (non woody plant) เช่น ฝ้าย ลิ้นจี่ และหญ้า เป็นต้น จนกระทั่งศตวรรษที่ 19 ได้หันมาให้ความสำคัญกับการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตเยื่อจากพืชที่มีเนื้อไม้ (woody plant) ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งของเส้นใยที่ค่อนข้างมีคุณภาพ จึงเป็นเหตุผลให้พืชจำพวกนี้กลายมาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเยื่อและกระดาษในปัจจุบัน แต่เนื่องจากปัญหาการมีแหล่งไม้จำกัดในหลายประเทศและความต้องการกระดาษที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทำให้เริ่มมีการศึกษาและค้นคว้าหาแหล่งของเส้นใยใหม่มาใช้ทดแทนไม้ พืชไม่มีเนื้อไม้ที่มักเป็นของเหลือใช้ภายหลังการเก็บเกี่ยวผลิตผลทางการเกษตรจึงกลับมามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษอีกครั้ง [2] โดยกว่าร้อยละ 10 ของการผลิตกระดาษทั่วโลกมาจากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ ซึ่งจุดเด่นของพืชเหล่านี้คือ สามารถเก็บเกี่ยวหลังจากทำการปลูก 1 หรือ 2 ปี ในขณะที่พืชจำพวกไม้ใช้เวลา 10 ถึง 20 ปี และเนื่องจากมีปริมาณลิกนินค่อนข้างน้อยจึงสามารถประหยัดเวลาและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการผลิตเยื่อได้มากกว่า [3]

2.2 เส้นใย (fiber)

เส้นใยมีลักษณะเหมือนหลอดกลวง ยาว หัวท้ายปิด ผนังด้านข้างมีรูเล็กๆ อยู่เป็นแนว เส้นใยแต่ละเส้นจะเกาะอยู่รวมกัน ในการนำเส้นใยมาทำเป็นกระดาษจะต้องมีการแยกเส้นใยออกจากกันเสียก่อนโดยอาจด้วยวิธีทางเชิงกลหรือทางเคมีก็ได้

2.2.1 องค์ประกอบของเส้นใย (fiber structure)

องค์ประกอบของเส้นใยแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้นหลักๆ คือ ชั้นมิดเดิลลามেলা (middle lamella) ชั้นผนังเซลล์ (cell wall) และ ลูเมน (lumen) โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

2.2.1.1 ชั้นมิดเดิลลามেলা (middle lamella)

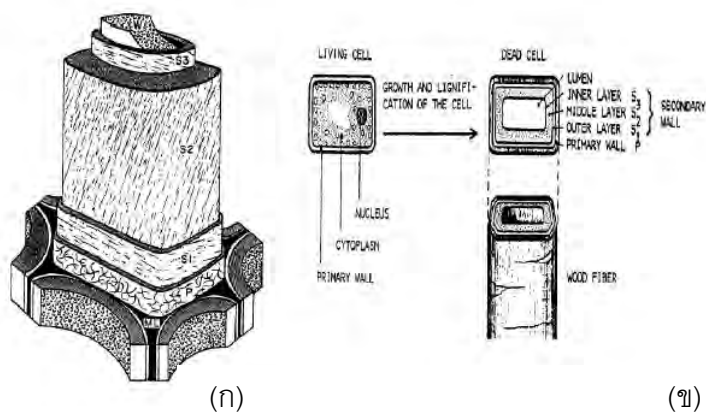
เป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นใย ซึ่งมีลิกนิน (lignin) อยู่เป็นจำนวนมาก โดยลิกนินทำหน้าที่เหมือนกาวเชื่อมเส้นใยหลายๆ เส้นไว้ด้วยกัน

2.2.1.2 ชั้นผนังเซลล์ (cell wall)

ผนังเซลล์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชั้น คือ ชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall) และชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell wall)

1) ชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall, P) เป็นชั้นที่มีผนังบางและภายในมีการเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อย (Fibril/Macrofibril/ Microfibril) ในรูปแบบที่ไม่แน่นอน

2) ผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell wall, S) เป็นชั้นที่มีผนังหนาที่สุด ประกอบด้วย การเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อย 3 ชั้น คือ S_1 , S_2 และ S_3 ซึ่งชั้นที่หนาที่สุดคือชั้น S_2 เพราะมีเนื้อที่ถึงร้อยละ 80-90 ของเส้นใย ดังแสดงในภาพที่ 2-1 นอกจากนี้แต่ละชั้นจะแตกต่างกันในเรื่องของความหนาแล้ว การเรียงตัวกันของเส้นใยขนาดย่อยก็แตกต่างกันไปด้วยโดย S_2 จะเรียงตัวกันในแนวเดียว แต่ S_1 และ S_3 จะมีการเรียงตัวเป็นรูป S และ Z



ภาพที่ 2-1 โครงสร้างของเส้นใย โดยแสดงชั้นมิดเดิลลาเมลลา ชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (P) ชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิ (S_1 , S_2 และ S_3) (ก) และแสดงการพัฒนาจากเซลล์เป็นเส้นใย (ข) [4]

2.2.1.3 ลูเมน (lumen)

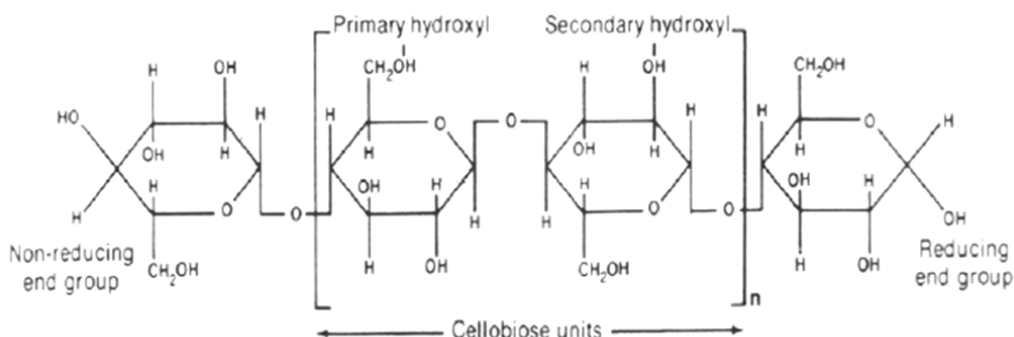
ลูเมน คือ บริเวณช่องว่างตรงกลางของเส้นใย เป็นบริเวณที่สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการต้มเยื่อเข้ามาทำปฏิกิริยากับเส้นใย

2.2.2 เคมีของเส้นใย (fiber chemistry)

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารแทรก ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้คือ

2.2.2.1 เซลลูโลส (cellulose)

สูตรเคมีทั่วไปของเซลลูโลส คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เมื่อ n เป็นจำนวนหน่วยการทำซ้ำของน้ำตาลหรือระดับของพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) ดังภาพที่ 2-2 เซลลูโลสมี DP เฉลี่ยอย่างน้อย 9,000 -10,000 หน่วยและอาจสูงถึง 15,000 หน่วย เซลลูโลสจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่เรียงตัวแบบสัณฐาน (crystalline region) เป็นบริเวณที่โมเลกุลของเซลลูโลสมีการจับตัว สร้างพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) อย่างเป็นระเบียบ ทำให้พันธะที่ได้มีความแข็งแรง มีการต้านทานต่อตัวทำละลายหรือสารเคมีมาก และส่วนที่เรียงตัวแบบอสัณฐาน (amorphous region) จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับส่วนที่เรียงตัวแบบสัณฐาน ทำให้บริเวณนี้ถูกทำลายโดยกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis reaction) ได้ง่ายกว่า



ภาพที่ 2-2 โครงสร้างของเซลลูโลส [4]

2.2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลส เป็นพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) ที่เกิดจากน้ำตาล 5 ชนิด ได้แก่ กลูโคส (glucose) แมนโนส (mannose) กาแลคโตส (galactose) ไชโลส (xylose) และอาราบินอส (arabinose) หลายๆ ชนิดมาต่อกัน มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและมีเส้นกิ่ง (side chain) ทำให้ถูกทำปฏิกิริยา ละลาย และทำลายโดยกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis reaction) ได้ง่าย เพราะไม่มีส่วนที่เรียงตัวแบบสัณฐานอย่างเซลลูโลส ในกระบวนการผลิตเยื่อซึ่ง

เป็นการเตรียมเส้นใยสำหรับนำมาใช้ผลิตกระดาษนั้น บางส่วนของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจะหายไป ทำให้ผลผลิตเยื่อ (yield) ที่ได้ลดลง

โดยทั่วไปแล้วส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรตของเส้นใย คือ เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส มักถูกเรียกรวมกันว่าโฮโลเซลลูโลส (holocellulose) ซึ่งโฮโลเซลลูโลสประกอบด้วย 3 ส่วน ตามการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย ดังนี้

1) แอลฟาเซลลูโลส (α -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่มีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เนื่องจากเป็นส่วนที่เรียกว่าเซลลูโลสที่แท้จริง ซึ่งไม่สามารถละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้องได้ ในการผลิตเยื่อไม่สามารถแยกแอลฟาเซลลูโลสออกมาได้อย่างบริสุทธิ์ และมักจะมีน้ำตาลแมนแนน (mannan) และกลูโคแมนแนน (glucomannan) ปนด้วยเสมอ เนื่องจากน้ำตาลทั้งสองชนิดนี้ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 เช่นกัน แอลฟาเซลลูโลสมีโมเลกุลของกลูโคสหรือ DP ตั้งแต่ 200 หน่วยขึ้นไป

2) เบต้าเซลลูโลส (β -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้อง และจะตกตะกอนในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด เบต้าเซลลูโลสจึงแยกได้จากส่วนที่ตกตะกอนในต่าง ค่า DP ของเบต้าเซลลูโลสจะอยู่ระหว่าง 100-200 หน่วย

3) แกมมาเซลลูโลส (γ -cellulose) เป็นเซลลูโลสซึ่งละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้อง และละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรด แต่จะตกตะกอนได้โดยใช้แอลกอฮอล์ ดังนั้นแกมมาเซลลูโลสจึงแยกได้จากส่วนที่เป็นของเหลวในสารละลายต่าง ค่า DP ของแกมมาเซลลูโลสจะต่ำกว่า 10 หน่วย

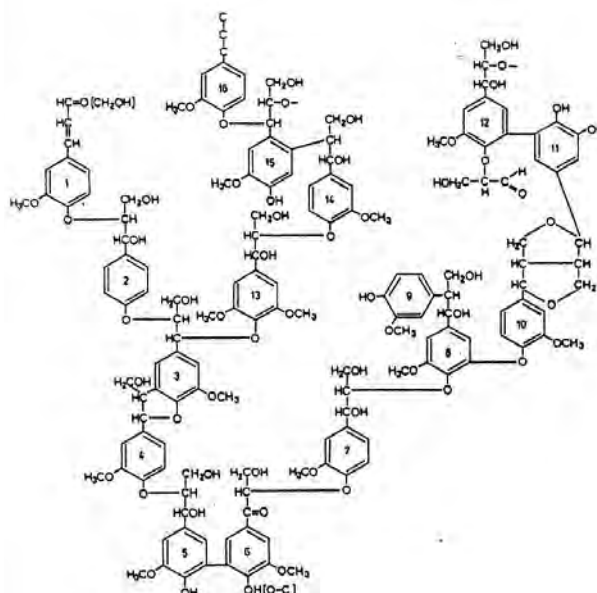
2.2.2.3 ลิกนิน (lignin)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ที่มีการเรียงตัวแบบอสัณฐานและมีลักษณะโครงสร้างที่ซับซ้อน ดังแสดงในภาพที่ 2-3 ลิกนินเกิดจากฟีนิลโพรเพน (phenyl propane) หลายๆ หน่วยมาต่อกันเป็นโครงสร้าง 3 มิติ มีอยู่มากที่บริเวณมิดเดิลแลมเลลาและกระจายตัวอยู่ในเส้นใย ลิกนินจะถูกกำจัดออกในขั้นตอนการทำเยื่อเพราะต้องการเส้นใยเดี่ยวๆ และจะถูกกำจัดออกอีกครั้งในขั้นตอนการฟอกเยื่อ (bleaching) เพราะปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่จะมีผลต่อความเหลืองของกระดาษ (yellowness) เนื่องจากลิกนินมีองค์ประกอบทางเคมีที่เรียกว่า

โครโมฟอร์ (chromophore) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาเคมีกับแสง รวมถึงความชื้น ทำให้เปลี่ยนสี กลายเป็นสีเหลืองขึ้นมา

2.2.2.4 สารแทรก (extractive)

สารแทรกเป็นสารเคมีในไม้หรือเส้นใยที่สามารถสกัดได้โดยใช้ตัวทำละลาย ในบางกรณีสารแทรกสามารถแยกตามตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด เช่น การละลายน้ำหรือละลายในเอทานอล สารแทรกเป็นกลุ่มของสารเคมีของผนังเซลล์ โดยสารแทรกส่วนใหญ่เป็นสารจำพวก เรซิน กรดไขมัน ไซ และแอลกอฮอล์ ซึ่งสามารถละลายได้ในน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีสภาพเป็นกรด องค์ประกอบของสารแทรกจะแตกต่างกันตามแต่ชนิดของไม้ ส่วนปริมาณรวมของสารแทรกในแต่ละชนิดของไม้จะขึ้นอยู่กับสภาพการเจริญเติบโต



ภาพที่ 2-3 โครงสร้างของลิกนิน [4]

2.3 การผลิตเยื่อกระดาษ (pulping)

การผลิตเยื่อกระดาษ คือ การผลิตเส้นใยเพื่อนำไปใช้ในการผลิตกระดาษ การผลิตเยื่อกระดาษเป็นกระบวนการที่พยายามแยกเส้นใยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ โดยอาจมีการกำจัดลิกนินออกหรือไม่กำจัดออกก็ได้ การผลิตเยื่อกระดาษแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักคือ การผลิตเยื่อเชิงกลและการผลิตเยื่อเคมี

2.3.1 การผลิตเยื่อเชิงกล (mechanical pulping)

การผลิตเยื่อเชิงกลเป็นการใช้แรงกลทำให้ลิกนินอ่อนตัวลง ขณะเดียวกันเส้นใยก็จะเกิดความล้าเนื่องจากถูกแรงสั่นสะเทือนจนโครงสร้างของเส้นใยหลวมและเส้นใยแยกออกมา แต่เนื่องจากลิกนินไม่ได้ถูกเอาออกจึงมีผลต่อความเหลืองและความเปราะของกระดาษ การผลิตเยื่อเชิงกลสามารถแบ่งย่อยได้อีก ดังต่อไปนี้

2.3.1.1 การผลิตเยื่อแบบหินบด (stone groundwood pulping, SGW pulping)

วิธีการคือ ใช้ตัวหินบด (grinding stone) ที่มีผิวหยาบและหมุนด้วยความเร็วสูงในการแยกเส้นใยออกจากเนื้อไม้โดยอาศัยแรงเสียดทานระหว่างท่อนไม้กับตัวหินบด เส้นใยที่ผลิตได้ด้วยวิธีนี้จะมีขนาดสั้นและไม่สมบูรณ์

2.3.1.2 การผลิตเยื่อแบบจานบด (refiner mechanical pulping, RMP)

เป็นการใช้แรงเสียดทานรวมถึงความร้อนที่เกิดขึ้นตรงจานบด (refiner plate) ในเครื่องบดเยื่อ (refiner) แยกเส้นใยออกจากชิ้นไม้ เส้นใยที่ได้จากการผลิตเยื่อแบบ RMP มีความสมบูรณ์และมีความยาวมากกว่าแบบ SGW

2.3.1.3 การผลิตเยื่อแบบเชิงกลและความร้อน (thermomechanical pulping, TMP)

เป็นการผลิตเยื่อที่พัฒนามาจาก RMP โดยในระหว่างการบดเยื่อมีการใช้ไอน้ำทำให้ชิ้นไม้อ่อนนุ่มก่อนที่จะทำการบด ส่งผลให้เส้นใยไม่เสียหายมากนัก เส้นใยที่ได้จากการผลิตเยื่อแบบนี้จะมีความยาวของเส้นใยและความสมบูรณ์ของเส้นใยมากกว่าแบบ RMP

จุดเด่นของการผลิตเยื่อเชิงกล คือ ปริมาณผลผลิตที่ได้ค่อนข้างสูง เส้นใยที่ได้ค่อนข้างสั้น เมื่อนำมาผลิตเป็นกระดาษจะได้กระดาษที่มีความเรียบมากและความทึบแสงสูง จึงเหมาะแก่การผลิตเป็นกระดาษสำหรับงานพิมพ์

2.3.2 การผลิตเยื่อเคมี (chemical pulping)

การผลิตเยื่อเคมีเป็นวิธีการที่ใช้สารเคมีมาทำปฏิกิริยากับลิกนิน เพื่อละลายลิกนินออกทำให้เส้นใยแยกตัวออกจากกันได้ง่ายขึ้น เยื่อที่ได้มีความขาวสว่างและความแข็งแรงมากกว่า แต่

มีโอกาสเกิดความเหลืองได้น้อยกว่าเยื่อเชิงกล เพราะเยื่อที่ได้จะเสถียรกับความร้อน แสง และความชื้นมากกว่า

การผลิตเยื่อเคมีสามารถแบ่งย่อยตามสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ การผลิตเยื่อแบบซัลไฟต์ (sulfite pulping) และการผลิตเยื่อแบบซัลเฟตหรือคราฟต์ (sulfate pulping or kraft pulping)

2.3.2.1 การผลิตเยื่อแบบซัลไฟต์ (sulfite pulping)

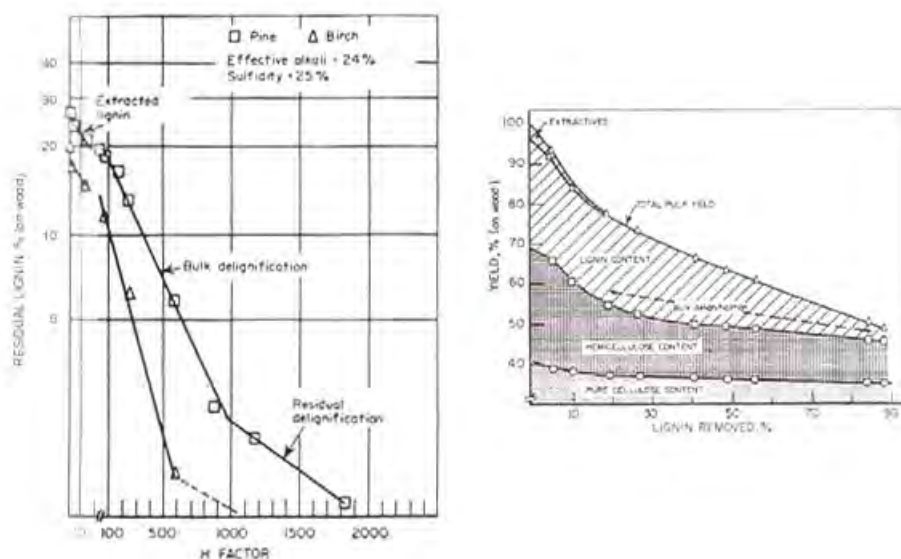
เป็นกระบวนการที่เป็นกรด โดยสารเคมีที่เข้าทำปฏิกิริยากับลิกนิน คือ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) โดยในกรณีของ acid sulfite pulping สารเคมีที่ใช้คือ กรดซัลฟูรัส (sulfurous acid, H_2SO_3) และไบซัลไฟต์ไอออน (bisulfite ion, MHSO_3) เมื่อ M คือ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) หรือโซเดียม (Na) มาผลิตเป็น SO_2 ส่วนในกรณีของ bisulfite pulping จะใช้ไบซัลไฟต์ไอออนเพียงอย่างเดียว ซึ่งทำให้มีความเป็นด่าง (pH) มากกว่าใน acid sulfite pulping

ข้อดีของกระบวนการผลิตเยื่อแบบซัลไฟต์ คือ เยื่อที่ได้จะขาวกว่า ผลผลิตเยื่อมากกว่า เยื่อที่ผลิตได้สามารถนำไปดเยื่อ (refining) ต่อได้ง่ายกว่า อย่างไรก็ตามเยื่อที่ผลิตโดยวิธีนี้มีเพียง 20% ของเยื่อที่ผลิตโดยกระบวนการทางเคมี เนื่องจากการนำสารเคมีที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ (chemical recovery) ทำได้ยากเมื่อเทียบกับการผลิตเยื่อแบบซัลเฟตหรือคราฟต์

2.3.2.2 การผลิตเยื่อแบบซัลเฟตหรือคราฟต์ (sulfate pulping or kraft pulping)

เป็นกระบวนการที่แตกต่าง ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีโซดา (soda process) ที่มีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว โดยในการผลิตเยื่อแบบคราฟต์จะมีการใช้โซเดียมซัลไฟด์ (sodium sulfide, Na_2S) เพิ่มเข้ามา โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน ส่วนโซเดียมซัลไฟด์จะทำหน้าที่แตกโมเมกุลของลิกนินให้สั้นลงและเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเกลือโซเดียม ซึ่งจะละลายออกมากับน้ำดำ (black liquor) ดังสมการเคมีนี้

ข้อดีของกระบวนการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ คือ เยื่อที่ได้มีความแข็งแรงมากกว่า สามารถใช้กับวัตถุดิบหลากหลายชนิด แต่ผลผลิตเยื่อที่ได้จะน้อยกว่าเยื่อที่ผลิตโดยการผลิตเยื่อแบบซัลไฟต์ เนื่องจากในกระบวนการนี้กว่าร้อยละ 80 ของลิกนินจะถูกเอาออก พร้อมกับร้อยละ 50 ของเฮมิเซลลูโลส และร้อยละ 10 ของเซลลูโลส [3] โดยปฏิกิริยาการกำจัดลิกนิน (delignification) ที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิตเยื่อแบบคราฟต์จะถูกแบ่งเป็น 3 ระยะ ดังนี้



ภาพที่ 2-4 ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในระยะต่างๆ ระหว่างปฏิบัติการกำจัดลิกนิน (ก) และ ปริมาณองค์ประกอบเคมีต่างๆ ของเส้นใยที่เหลืออยู่ในระหว่างปฏิบัติการกำจัดลิกนิน (ข) [4]

1) initial delignification หรือ lignin extraction เป็นระยะที่มีการละลายลิกนินออกมาได้ประมาณร้อยละ 20-25 ของลิกนินทั้งหมด และเป็นระยะที่ไฮโดรซัลไฟด์ไอออน (hydrosulfide, SH⁻) ช่วยเพิ่มการแทรกซึมของสารเคมีก่อนที่จะเข้าสู่ช่วง bulk delignification นอกจากนี้ไฮโดรซัลไฟด์ไอออนยังช่วยป้องกันการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรต และป้องกันการกลับมารวมตัวกันของลิกนิน (lignin condensation) ซึ่งในระยะนี้ลิกนินจะยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แต่จะเกิดการแตกย่อยเป็นชิ้นเล็กๆ

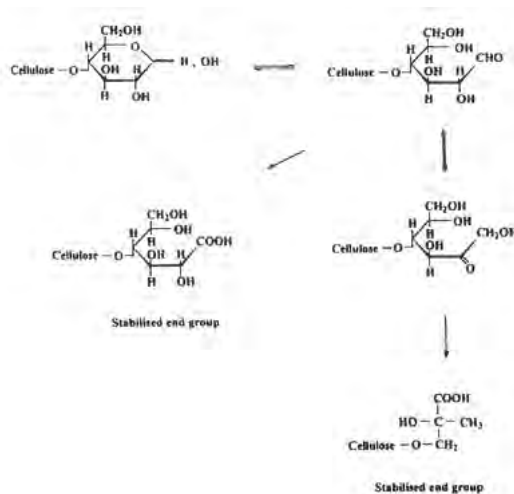
2) bulk delignification ในระยะนี้อัตราการละลายลิกนินออกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและในปริมาณมาก โดยลิกนินจะละลายออกมาประมาณร้อยละ 90 ของลิกนินทั้งหมด การละลายจะเริ่มละลายลิกนินในชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิไปยังลิกนินในชั้นมิดเดิลลามেলা การละลายลิกนินออกในระยะนี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) ไฮโดรซัลไฟด์ไอออน (SH⁻) อุณหภูมิ และความหนาของชิ้นไม้ โดยอัตราการละลายลิกนินออกจะสูงเมื่อมีความเข้มข้นของไอออนทั้งสองสูง แต่ถ้าชิ้นไม้มีความหนามากจะส่งผลให้ลิกนินละลายออกจากชิ้นไม้ได้ยากด้วย ในระยะนี้ลิกนินจะไม่ถูกกำจัดออกไปหมด โดยจะต้องเหลือไว้ประมาณร้อยละ 3-5 เพื่อรักษาความเป็นด่างไว้ เนื่องจากลิกนินจะละลายได้ดีที่ค่าความเป็นกรด-เบสสูง

3) residual delignification เป็นระยะที่เกิดขึ้นหลังระยะ bulk delignification ซึ่งในระยะนี้อัตราการละลายลิกนินออกจากชิ้นไม้จะช้าลง การใช้ปริมาณต่างจน

หมดหลังจากการต้มเยื่อ หรือหากความเป็นกรด-เบสในการต้มลดลงมากเกินไปจะก่อให้เกิดการกลับมารวมตัวกันของลิกนิน (lignin condensation) และการตกตะกอนของลิกนิน (lignin precipitation) ได้ โดยทั่วไปแล้วการต้มเยื่อควรมีปริมาณต่างเกลือในน้ำยาต้มเยื่อหลังจากการต้มเยื่อประมาณ 5-15 กรัมต่อลิตร

2.3.2.3 การผลิตเยื่อแบบดัดแปร (modified pulping)

การสูญเสียคาร์โบไฮเดรตที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยากำจัดลิกนินมีผลทำให้ผลผลิตเยื่อน้อยลง ซึ่งการสูญเสียคาร์โบไฮเดรตนั้นเกิดขึ้นจากการที่หน่วยสุดท้ายในสายพอลิเมอร์ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายในภาวะที่เป็นด่าง (alkaline degradation) หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาฟิลลิ่ง (peeling reaction) โดยด่างเข้าไปเปลี่ยนน้ำตาลหมู่สุดท้ายของสายพอลิเมอร์ให้เป็นกรดอินทรีย์ต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2-5 ดังนั้นการผลิตเยื่อควรมีการดัดแปรโดยใช้สารเคมีต่างๆ เพื่อทำให้ผลผลิตเยื่อเพิ่มขึ้น ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้



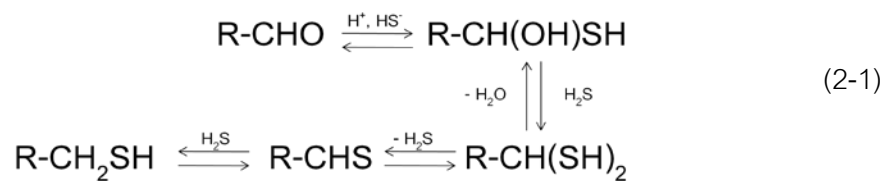
ภาพที่ 2-5 แสดงการเกิดปฏิกิริยาการสลายคาร์โบไฮเดรตหรือ peeling reaction [6]

2.3.2.3.1 สารเคมี

การนำเอาสารเคมี เช่น พอลิซิลไฟด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอนทราควิโนน และเมทานอล เป็นต้น มาใช้ในการผลิตเยื่อเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากกว่า เพราะนอกจากจะทำให้ปริมาณลิกนินเหลือน้อยแล้วยังสามารถรักษาคาร์โบไฮเดรตไว้ด้วย

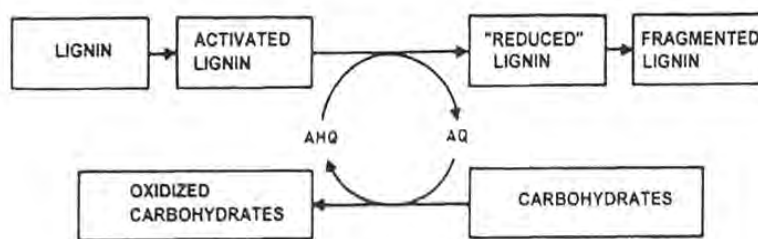
1) พอลิซัลไฟด์ (polysulfide) การเพิ่มสารประกอบซัลเฟอร์เข้าไปในการผลิตเยื่อเพื่อรักษาคาร์โบไฮเดรต พอลิซัลไฟด์จะเข้าไปรักษาความเสถียรให้กับคาร์โบไฮเดรตที่อุณหภูมิต่ำ (100-120 องศาเซลเซียส) โดยจะเข้าไปทำการออกซิไดซ์บริเวณหมู่สุดท้ายของพอลิแซ็กคาไรด์ให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูป alkaline stable aldonic acid ซึ่งจะปลดการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรตในสารต้มเยื่อ [5]

2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide) การปรับสภาพชิ้นไม้ด้วยไฮโดรซัลไฟด์ (H_2S) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความเป็นกรด-เบส 7 ซึ่งในระหว่างการปรับสภาพ หมู่อัลดีไฮด์สุดท้ายจะถูกรีดิวซ์ให้เป็นไธโออัลดิทอล (thioalditol) ดังสมการต่อไปนี้



การเกิดปฏิกิริยาดังที่กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถป้องกันการเกิดปฏิกิริยาฟูลลิงได้ ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มผลผลิตของเยื่อได้ถึงร้อยละ 8 ต่อน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง แต่การปรับสภาพก็ต้องการความดันที่ค่อนข้างจะมาก (มากกว่า 1000 kPa) และต้องใช้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในปริมาณที่มากด้วยเช่นกัน

3) แอนทราควิโนน (anthraquinone, AQ) มีสูตรเคมี คือ $C_{14}H_{10}O_2$ ถูกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในการต้มเยื่อแบบต่าง โดยแอนทราควิโนนจะเข้าสู่วัฏจักรรีดอกซ์ ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนเดี่ยวๆ ซึ่งแอนทราควิโนนจะไปออกซิไดซ์และป้องกันการที่เซลลูโลสถูกทำลายในภาวะที่เป็นด่าง (alkaline degradation) หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาฟูลลิง (peeling reaction) จากนั้นแอนทราควิโนนก็จะถูกรีดิวซ์ให้เป็นแอนทราไฮโดรควิโนน (AHQ) เพื่อที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับลิกนิน ทำให้ลิกนินสลายตัวและละลายออกมากับน้ำยาต้มเยื่อ ทำให้ล้างออกจากเยื่อได้ง่าย ดังแสดงในภาพที่ 2-6 โดยกระบวนการทำงานของแอนทราควิโนนนี้ทำให้สามารถเพิ่มผลผลิตเยื่อและในขณะเดียวกันก็ทำให้ค่าคัปปานัมเบอร์ (kappa number) ซึ่งบอกถึงปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อลดลงด้วย [5,7]



ภาพที่ 2-6 แสดงลักษณะการทำปฏิกิริยาของแอนทราควิโนน [5]

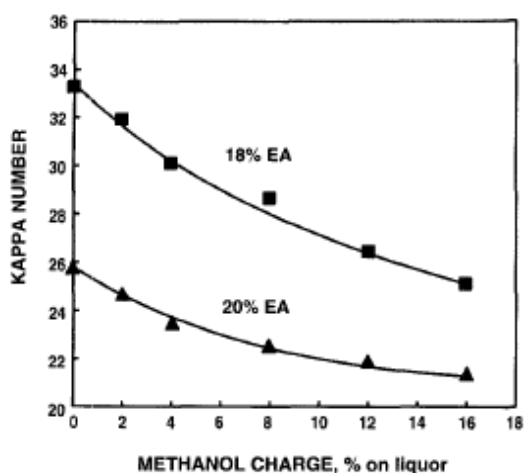
4) เมทานอล (methanol) เมทานอลมีสูตรเคมี คือ CH_3OH เป็นแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นน้อยที่สุด มีคุณสมบัติ คือ ใส ไม่มีสี ระเหยง่าย มีกลิ่นเฉพาะ ติดไฟได้ เมทานอลถูกผลิตขึ้นตามธรรมชาติในกระบวนการเมทาบอลิซึมแบบไร้ออกซิเจน (anaerobic metabolism) ในแบคทีเรียหลายชนิดที่อยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม ทำให้มีไอของเมทานอลจำนวนน้อยอยู่ในบรรยากาศเมื่อเมทานอลถูกออกซิไดซ์โดยมีแสงอาทิตย์เป็นตัวช่วยทำให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เมทานอลนิยมนำมาใช้ในการผลิตเอือแบบเคมีเนื่องจากเมทานอลช่วยให้การแทรกซึมของสารเคมีที่ใช้ในการต้มเอือดีขึ้น โดยจะเข้าไปแตกพันธะระหว่างลิกนินที่เชื่อมกันอยู่และเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารเคมีที่ใช้ในการต้มเอือให้สามารถป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกัน (condensation reaction) ของลิกนิน นอกจากนี้การใช้เมทานอลในการต้มเอือยังให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษใกล้เคียงกับการผลิตเอือแบบคราฟต์ [8-9]

2.3.2.3.2 การศึกษาผลจากการผลิตเอือแบบดัดแปร

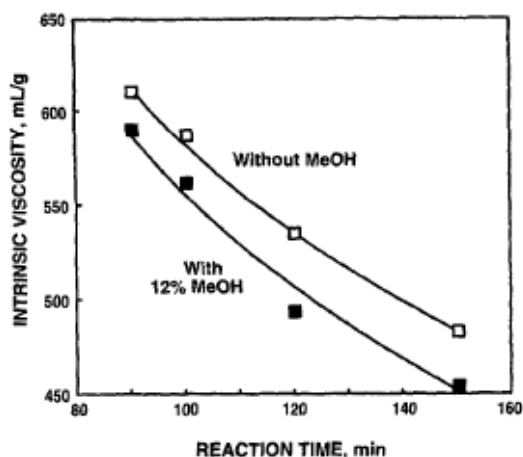
มีหลายงานวิจัยที่ทำการศึกษาค้นคว้าผลผลิตจากการเติมสารเติมแต่งเข้าไปในการผลิตเอือแบบต่าง เพื่อที่จะเพิ่มผลผลิตของเอือและคุณสมบัติต่างๆ ให้กับเอือ ดังเช่นงานวิจัยต่อไปนี้

การเปรียบเทียบการผลิตเอือจากต้นฝ้ายด้วยวิธีโซดาและโซดา ร่วมกับแอนทราควิโนน โดย Akgül และ Tozluoglu [10] จากการทดลองพบว่า การเพิ่มแอนทราควิโนนเข้าไปในการผลิตเอือช่วยให้ผลผลิตเอือและความหนืดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้จากการสันนิษฐานอาจเนื่องมาจากการที่สามารถรักษาเอมิเซลลูโลสได้มากขึ้น ขณะเดียวกันแอนทราควิโนนก็ทำให้ความแข็งแรงเชิงกลเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังช่วยลดคัปปานัมเบอร์ให้กับเอือ จึงส่งผลให้เอือที่ได้มีความขาวสว่างมากกว่าการผลิตแบบโซดา โดยอาจมีผลมาจากการที่แอนทราควิโนนทำให้ปริมาณลิกนินที่เหลือในเอือน้อยกว่า

การเปรียบเทียบระหว่างการผลิตเยื่อแบบกราฟต์กับกราฟต์ดัดแปรร่วมกับเมทานอลจากพืชเยื่อใยยาวของแถบสแกนดิเนเวีย คือ *Pinus silvertris* และ *Picea abies* โดย Norman และ คณะ [11] จากการทดลองพบว่าการเพิ่มเมทานอลเข้าไปในการผลิตเยื่อส่งผลให้ปริมาณลิกนินในเยื่อลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2-7 (ก) นอกจากนี้เมทานอลยังส่งผลต่อการสลายคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาฟิชลิ่ง และการสลายพันธะไกลโคซิดิกเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ระหว่างการเกิดปฏิกิริยากำจัดลิกนินในการต้มเยื่อ ผลของการเพิ่มเมทานอลเข้าไปในการต้มเยื่อนอกจากจะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินแล้ว ยังทำให้การสลายคาร์โบไฮเดรตเกิดมากขึ้นด้วยดังจะเห็นได้จากการลดลงของความหนืดของเยื่อที่ได้จากการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ร่วมกับเมทานอล ที่แสดงใน ภาพที่ 2-7 (ข) ทั้งนี้ตัวเมทานอลเองอาจจะมีผลโดยตรงต่อการทำลายคาร์โบไฮเดรตในภาวะที่เป็นด่าง (alkaline degradation) หรือการกำจัดลิกนินออกได้มากขึ้นอาจส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นในทางอ้อม



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2-7 แสดงผลของเมทานอลที่มีต่อคัปปานัมเบอร์ (ก),

ผลของเมทานอลที่มีต่อความหนืดของเยื่อ (ข) [11]

2.4 กรรมวิธีการผลิตกระดาษ (paper making process)

ประกอบไปด้วย ขั้นตอนต่างๆดังต่อไปนี้

- การผลิตเยื่อ
- การเตรียมน้ำเยื่อ
- การขึ้นแผ่น
- การรีดน้ำและการทำแห้ง
- การเข้าม้วน
- ขั้นตอนหลังการผลิตอื่นๆ เช่น การเคลือบผิว การตัดผิว

2.4.1 การผลิตเยื่อ (pulping)

การผลิตเยื่อกระดาษ คือ การผลิตเส้นใยเพื่อนำไปใช้ในการผลิตกระดาษ ดังมีรายละเอียดตามที่กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้

2.4.2 การเตรียมน้ำเยื่อ (stock preparation)

ขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อประกอบด้วย การกระจายเยื่อ การปรับความเข้มข้น (consistency) การตีเยื่อ (beating)/การบดเยื่อ (refining) การผสมเยื่อกับสารเคมี การกำจัดสิ่งปลอมปน (contaminants) และอากาศ โดยขั้นตอนเหล่านี้สามารถเปลี่ยนลำดับกันได้

2.4.2.1 การกระจายเยื่อ (pulping or defibering)

การกระจายเยื่อเป็นการตีกระจายเยื่อหรือเส้นใยให้ออกจากกัน ซึ่งจะท่าเมื่อมีการนำเอาเยื่อแห้งมาใช้ โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการกระจายเยื่อคือ pulper (บางที่เรียกว่า hydropulper) ซึ่งมีลักษณะเป็นถังขนาดใหญ่ ภายในมีใบพัดหรือจานหมุนขนาดใหญ่เพื่อช่วยในการกระจายเยื่อและแยกเส้นใยออกจากกัน

2.4.2.2 การปรับความเข้มข้น (consistency)

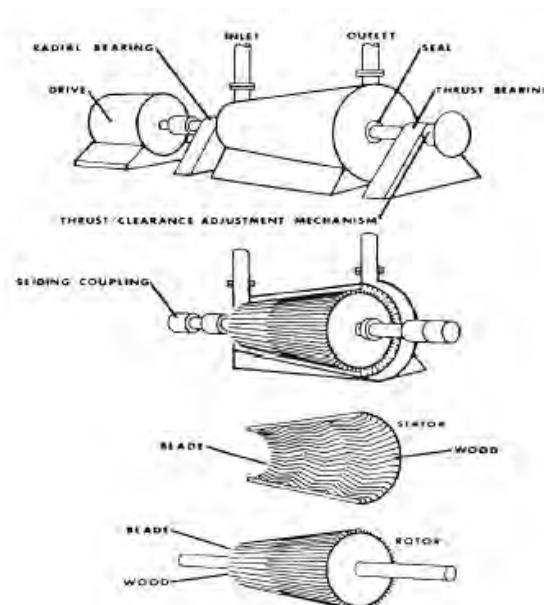
การคำนวณหาความเข้มข้นสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ความเข้มข้น (consistency)} = \frac{\text{น้ำหนักเส้นใย}}{\text{น้ำหนักเส้นใย} + \text{น้ำหนักของน้ำ}} \times 100\% \quad (2-2)$$

โดยปกติแล้ว ความเข้มข้นของน้ำเยื่อที่ถึงเก็บเยื่อ (stock chest) ประมาณเท่ากับร้อยละ 3-4 และที่หน่วยกระจายเยื่อ (headbox) ของเครื่องทำกระดาษ ประมาณเท่ากับร้อยละ 0.5-1.0 ความเข้มข้นของน้ำเยื่อควรมีการควบคุมให้เหมาะสม เนื่องจากมีผลต่อคุณภาพของการบดเยื่อ การกำจัดสิ่งปลอมปนและการขึ้นแผ่น

2.4.2.3 การบด/ตีเยื่อ (refining/beating)

เป็นการใช้แรงกลเพื่อปรับสภาพผนังของเส้นใย (cell wall) ให้เหมาะสมกับการผลิตกระดาษ โดยจะทำให้ผนังของเส้นใยฉีกขาด เส้นใยดูดซึมน้ำได้มากขึ้น และเนื่องจากผนังของเส้นใยมีการแยกตัว จึงส่งผลให้เส้นใยบวมตัว (swell) มีความยืดหยุ่น (flexibility) และสามารถแนบตัวกับเส้นใยรอบข้าง (comformability) ได้ดีขึ้น ซึ่งทั้งหมดเป็นการเพิ่มพื้นที่ระหว่างเส้นใยส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่จะทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยน้อยลง



ภาพที่ 2-8 ลักษณะของเครื่องบดแบบกรวย [4]

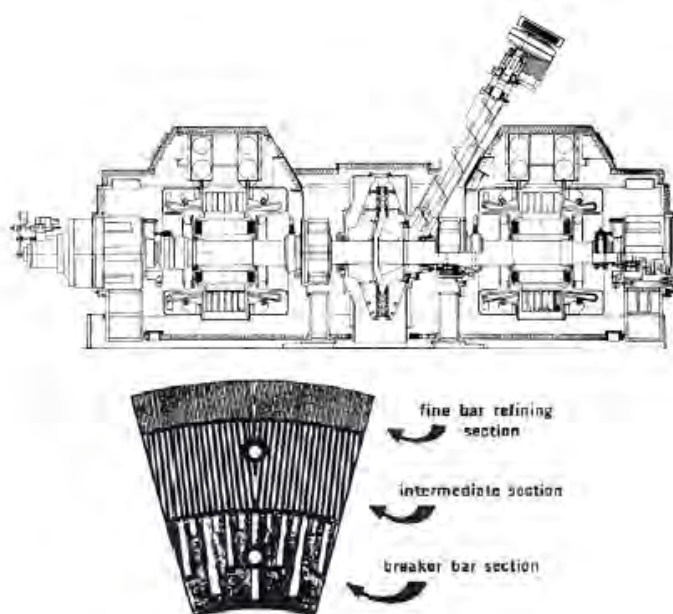
1) เครื่องบด/ตีเยื่อ (refiner)

ในการบดเยื่อน้ำเยื่อจะไหลวนอยู่ในเครื่องบดเยื่อ เส้นใยจึงอยู่ในทิศทางขนานกับซี่บด ลักษณะของเครื่องบดเยื่อมีดังนี้

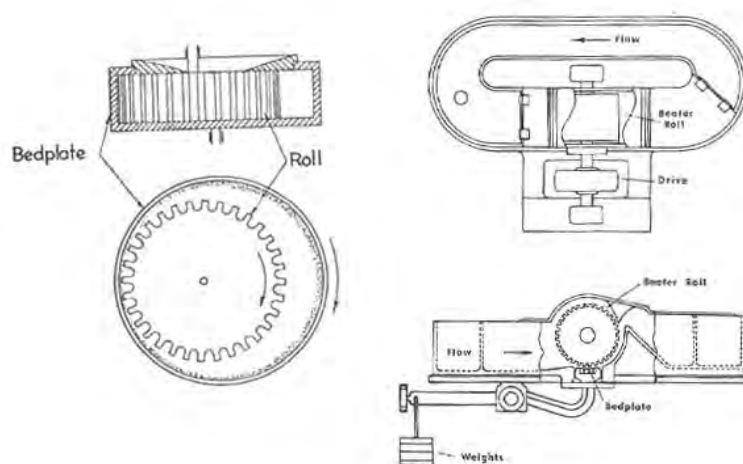
1.1) เครื่องบดเยื่อแบบกรวย (conical refiner) ลักษณะของเครื่องประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ โรเตอร์ (rotor) ซึ่งเป็นส่วนแกนที่หมุนในขณะที่ทำการบดเยื่อ และ สเตเตอร์ (stator) ซึ่งเป็นส่วนเปลือกหุ้มที่อยู่รอบๆ โดยทั้ง 2 ส่วนจะประกอบไปด้วยซี่ฟันบดที่ทำจากโลหะจำนวนมาก ดังแสดงในภาพที่ 2-8

1.2) เครื่องบดเยื่อแบบจานบด (disc refiner) มีการนำมาใช้ภายหลังเครื่องบดเยื่อแบบกรวย ลักษณะของเครื่องโดยทั่วไปเป็นแผ่นจานบดสองจานประกบกัน ซี่บดจะมีขนาดใหญ่ (บริเวณใกล้จุดศูนย์กลางของจานบด) ไปถึงขนาดเล็ก (บริเวณไกลจุดศูนย์กลางของจานบด) ดังแสดงในภาพที่ 2-9

1.3) เครื่องตีเยื่อ (beater หรือ hollander beater) ประกอบด้วยลูกกลิ้งที่มีผิวเป็นซี่ และแท่นนอน (bedplate) ดังแสดงในภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-9 เครื่องบดเยื่อแบบจานบด (บน) และลักษณะซี่จานบดในเครื่องบดเยื่อ (ล่าง) [4]



ภาพที่ 2-10 เครื่องตีเยื่อ [4]

การตี/บดเยื่อยังทำให้เส้นใยสั้นลงและเกิด fine มากขึ้น ส่งผลให้สมบัติการระบายได้ของเยื่อ (drainage/freeness) ลดลงไปด้วย เนื่องจากพื้นที่ผิวของเส้นใยและจากปริมาณ fine ที่มากขึ้นทำให้การระบายน้ำช้าลง

2) กลไกการบดเยื่อ/ตีเยื่อ (refining/beating mechanism)

สิ่งที่เกิดขึ้นในระหว่างบดเยื่อมี 2 ลักษณะ ดังนี้คือ

2.1) การเสียดสีกันของเส้นใย (fiber brushing)

เกิดจากการที่เส้นใยเกิดการเสียดสีหรือชนกัน จะเกิดขึ้นเมื่อบดเยื่อ/ตีเยื่อที่ความเข้มข้นสูงๆ โดยมีระยะห่างระหว่างซี่บดค่อนข้างมากพอสมควร เมื่อความเข้มข้นเยื่อสูง ปริมาณเส้นใยจะมาก ทำให้เส้นใยเกิดปฏิสัมพันธ์ (interaction) กันมากขึ้น จนเส้นใยเกิดการแตกแขนงขึ้น (fibrillation) เป็นผลให้พื้นที่ผิวของเส้นใยเพิ่มมากขึ้น พันธะระหว่างเส้นใย (fiber-fiber bonding) จึงมากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม ในกรณีนี้ความยาวของเส้นใยจะไม่มีเปลี่ยนแปลงไปมากนัก ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะต้องการให้การสร้างพันธะของเส้นใยสูงขึ้น

2.2) การตัดเส้นใย (fiber cutting)

เกิดขึ้นเมื่อบดเยื่อที่ความเข้มข้นต่ำๆ และระยะห่างระหว่างซี่บดชิดกันมากๆ ทำให้เส้นใยถูกตัดให้สั้นลงได้ง่าย เส้นใยจึงมีความยาวลดลง ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะการที่เส้นใยสั้นจะทำให้พื้นที่ในการสร้างพันธะของเส้นใยแต่ละเส้นน้อยลง

2.4.3.4 การกำจัดสิ่งปลอมปนและอากาศ

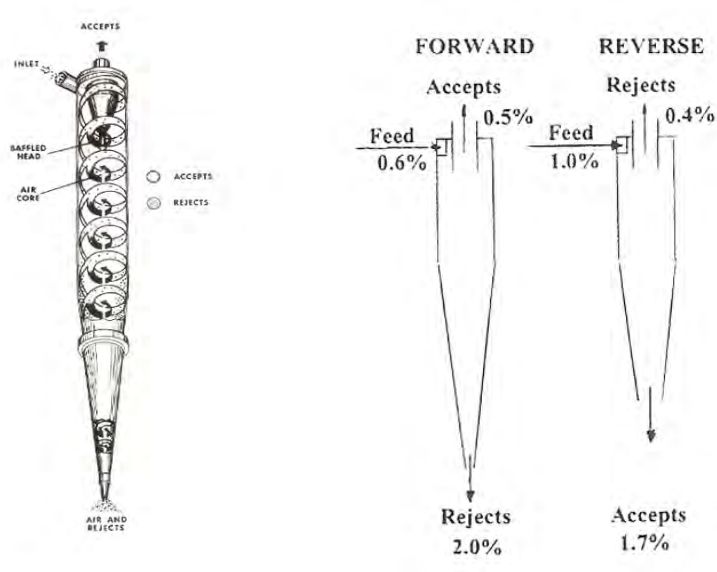
การกำจัดสิ่งแปลกปลอมและอากาศ แบ่งออกเป็นวิธีย่อยๆ ได้ดังต่อไปนี้

1) การกำจัดสิ่งแปลกปลอมโดยใช้เครื่องทำความสะอาดแบบหนีศูนย์กลาง (centrifugal cleaner) ดังแสดงในภาพที่ 2-11 ซึ่งแบ่งเป็น

- forward cleaner เป็นการกำจัดสิ่งปลอมปนที่มีความหนาแน่นมากกว่าเส้นใย เช่น ทราย ตะกรัน เป็นต้น

- reverse cleaner เป็นการกำจัดสิ่งปลอมปนที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าเส้นใย เช่น พลาสติก เป็นต้น

2) การกำจัดอากาศ โดยจะใช้อุปกรณ์ที่เป็นสูญญากาศช่วยเรียกว่า de-aerator



ภาพที่ 2-11 เครื่องกำจัดสิ่งปลอมปน (centrifugal cleaner) [4]

2.5 สัณฐานวิทยาของเส้นใย

วิธีการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยจะวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์คุณภาพของเส้นใย (fiber quality analyzer : FQA) ตามมาตรฐาน ISO 16065 [12] จากการวัดจะให้ค่าการกระจายตัวด้านความยาวของเส้นใย (fiber length) ความกว้างของเส้นใย (fiber width) ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (fines) ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (curl index) และดัชนีความหักงอของเส้นใย (kink index) เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์เส้นใยสามารถวัดเส้นใยที่มีความยาวตั้งแต่ 0.07 มิลลิเมตรขึ้นไป ดังนั้นในการทดลองนี้จะรายงานผลความยาวของเส้นใยเฉลี่ยที่ได้เป็นแบบ LWW (mean length-weight weighted) ซึ่งเส้นใยที่มีขนาดยาวจะค่อนข้างส่งผลต่อค่านี้ โดยคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$L_{\text{WW}} = \frac{\sum n_i L_i^3}{\sum n_i L_i^2} \quad (2-3)$$

เมื่อ i = กลุ่มความยาวเส้นใยในแต่ละช่วง 1, 2, 3, ..., N (bins)

n = จำนวนเส้นใยในช่วงความยาวแต่ละ i

L = ความยาวเส้นใย (contour length)

ดังนั้นค่าที่ได้จึงเป็นค่าความยาวเฉลี่ยของเส้นใยโดยเฉพาะ ส่วนค่าความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยเป็นลักษณะที่สำคัญของเส้นใย ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษได้

2.6 สมบัติเยื่อและกระดาษ (properties of paper)

สมบัติของกระดาษสามารถแบ่งย่อยได้ดังต่อไปนี้ สมบัติทางโครงสร้าง (structural properties of paper) สมบัติเชิงกลของกระดาษ (mechanical properties of paper) และ สมบัติเชิงแสงของกระดาษ (optical properties of paper)

2.6.1 สมบัติทางโครงสร้าง (structural properties of paper)

ลักษณะทางโครงสร้างที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

2.6.1.1 น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight or grammage)

น้ำหนักมาตรฐาน คือ น้ำหนักของกระดาษต่อหน่วยพื้นที่ การหาน้ำหนักมาตรฐานจะต้องมีการปรับสภาวะของกระดาษก่อน โดยการนำกระดาษมาเก็บไว้ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นตามมาตรฐาน TAPPI T410 [13] (อุณหภูมิเท่ากับ $27\pm 1^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ $65\pm 2\%\text{RH}$ สำหรับประเทศเขตร้อน) เนื่องจากอุณหภูมิและความชื้นมีผลทำให้น้ำหนักของกระดาษเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นผลจากการดูดหรือคายความชื้นของกระดาษตามสภาวะโดยรอบ

2.6.1.2 ความหนา (thickness)

ความหนา คือ ระยะห่างในแนวตั้งฉากระหว่างผิวหน้าทั้งสองด้านของกระดาษภายใต้สภาวะที่กำหนด ความหนามีความสำคัญต่อการนำกระดาษไปใช้งานและการแปรรูปของกระดาษ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนา คือ น้ำหนักมาตรฐาน ระดับการบีบอัดช่วงขึ้นแผ่น (pressing)/การขัดผิวหน้ากระดาษ (calendering) การตี/บดเยื่อ สารเคมีที่เติมในกระดาษ ชนิดของเส้นใยที่ใช้ และความชื้น

เครื่องมือที่ใช้วัดความหนา คือ ไมโครมิเตอร์ (micrometer) ค่าที่ได้จากการวัดจะเป็น apparent thickness ซึ่งไม่ได้คำนึงถึงความหยาบของผิวกระดาษ ดังนั้นค่าที่ได้มักจะสูงกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย

2.6.1.3 ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density)

ความหนาแน่น คือ อัตราส่วนของมวลต่อปริมาตร หรือ อัตราส่วนของน้ำหนักมาตรฐานต่อความหนา โดยทั่วไปความหนาแน่นของกระดาษจะขึ้นอยู่กับลักษณะของเส้นใย คือ เส้นใยที่มีผนังหนาจะให้กระดาษที่มีความหนาแน่นต่ำ กระดาษจะฟ้ามและหนา ความหนาแน่นของกระดาษมักจะสัมพันธ์กับสมบัติกระดาษด้านอื่นๆ เช่น ความพรุน (porosity) ความทึบแสง (opacity) ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) และ ความสามารถในการดูดซึมของเหลว

2.6.1.4 ความเรียบหรือความหยาบ (smoothness/roughness)

ความหยาบสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระดับ ดังนี้

1) Macro roughness เป็นความหยาบที่อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1 มิลลิเมตร ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของเส้นใยภายในแผ่นกระดาษ มักจะส่งผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันของกระดาษ (uniformity) ความมันวาว (paper gloss) คุณสมบัติทางการพิมพ์ (printing properties) และคุณสมบัติในการเคลือบ (coating properties)

2) Micro roughness เป็นความหยาบที่อยู่ในช่วง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร มีสาเหตุมาจากรูปร่างและตำแหน่งของเส้นใยและเส้นใยขนาดเล็กที่อยู่ภายในระบบ มักจะส่งผลต่อความไม่สม่ำเสมอของกระดาษและความมันวาว

3) Optical roughness เป็นความหยาบที่น้อยกว่า 1 ไมโครเมตร มักเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางพื้นผิวของเส้นใย และอนุภาคของสีย้อม (pigment)

ความไม่สม่ำเสมอบนผิวหน้ากระดาษอาจเกิดขึ้นได้จาก ช่องว่างระหว่างเส้นใยบนผิวหน้าของกระดาษ ช่องว่างระหว่างเส้นใยและสารเติมแต่งบนผิวหน้าของกระดาษ รอยตะแกรง รอยสักหลาด สิ่งแปลกปลอม และความเสียหายในกระดาษ ส่วนใหญ่จะทำการทดสอบโดยการวัดความเรียบตามมาตรฐาน TAPPI T 479 [14]

2.6.2 สมบัติเชิงกลของกระดาษ (mechanical properties of paper)

สมบัติเชิงกลของกระดาษที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

2.6.2.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength)

ความแข็งแรงต่อแรงดึง คือ แรงสูงสุดที่กระดาษจะทนได้ก่อนที่กระดาษจะขาดออกจากกันเมื่อถูกดึง หน่วยที่ใช้คือ กิโลนิวตันต่อเมตร (kN/m) ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างเส้นใยเป็นหลัก แต่ก็ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ผลการทดสอบที่ได้ยังขึ้นอยู่กับภาวะในการทดสอบด้วย โดยเมื่อเพิ่มแรงที่ใช้ในการกระทำ ค่าแรงดึงจะเพิ่มขึ้น และถ้าความชื้นของกระดาษเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงจะลดลง ขณะที่การยืดตัวของกระดาษจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความแข็งแรงต่อแรงดึงยังขึ้นอยู่กับทิศทางของ

กระดาษด้วย [9] โดยจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 494 om-01 [15] ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{tensile strength} = \frac{\text{average breaking force (kN)}}{\text{specimen width (m)}} \quad (2-4)$$

เมื่อต้องการเปรียบเทียบสมบัติของกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานต่างกัน จำเป็นจะต้องใช้ในรูปแบบค่าดัชนี ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) คือ ความแข็งแรงต่อแรงดึงต่อน้ำหนักของกระดาษ มีหน่วยเป็นนิวตันเมตรต่อกรัม (Nm/g) สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังต่อไปนี้

$$TI = 1000T/R \quad (2-5)$$

เมื่อ TI คือ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (Nm/g)

R คือ น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ (g/m^2)

T คือ ความแข็งแรงต่อแรงดึง (kN/m)

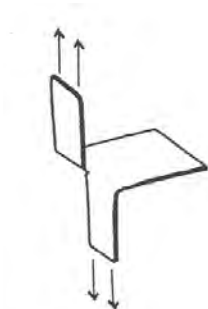
ความแข็งแรงต่อแรงดึงเป็นสมบัติที่บ่งชี้ถึงความทนทาน (durability) และความสามารถในการทนแรงดึงของกระดาษ ซึ่งสำคัญมากสำหรับการใช้งานบางประเภท เช่น กระดาษห่อ กระดาษทำเทปกาว กระดาษทำเทปพันสายไฟ กระดาษห่อลูกอม และกระดาษพิมพ์ (แบบม้วน)

2.6.2.2 ความแข็งแรงต่อแรงฉีก/ความต้านทานแรงฉีก (tearing strength/tear resistance)

ความต้านทานแรงฉีก คือ แรงเฉลี่ยที่ใช้ในการฉีกกระดาษต่อจากแนวตัดเริ่มต้น ความต้านทานแรงฉีกจะขึ้นอยู่กับความเร็วตัวของเส้นใยในแผ่นซึ่งทดสอบด้วย สำหรับวิธีการที่นิยมใช้ที่สุด คือ Elmendorf internal resistance test ดังแสดงในภาพที่ 2-12

โดยจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98 [16] ซึ่งเป็นการวัดแรงกลที่ใช้ในการฉีกกระดาษต่อจากรอยตัดที่เริ่มไว้ โดยมีการกำหนดระยะของการฉีก (ความกว้างของตัวอย่างกระดาษ) เครื่องมือที่ใช้ทดสอบคือ Elmendorf tear tester ดังแสดงใน ภาพที่ 7 ในภาคผนวก ก ซึ่งใช้ลูกตุ้มเป็นแหล่งกำเนิดแรงฉีกขาด โดยลูกตุ้มจะเคลื่อนตัวจากตำแหน่งในระนาบตั้งฉากไประนาบเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ ซึ่งแรงที่ทำให้ในการฉีกชิ้นทดสอบต่อจากแนวตัด

เบื้องต้นจะวัดผลจากการสูญเสียพลังงานของลูกตุ้ม โดยหน่วยที่วัดได้มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) หรือ มิลลินิวตัน (mN) [4, 17] ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษขึ้นอยู่กับ ความยาวของเส้นใย ความแข็งแรงของเส้นใย ปริมาณพันธะระหว่างเส้นใย และทิศทางของเส้นใยที่เรียงตัวกันในแผ่นกระดาษ



ภาพที่ 2-12 Elmendorf internal resistance test [4]

2.6.3 สมบัติเชิงแสงของกระดาษ (optical properties of paper)

สมบัติเชิงแสงที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

2.6.3.1 ความขาวสว่าง (brightness)

ความขาวสว่าง คือ การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร (nm) เท่านั้น ซึ่งแสดงเป็นอัตราร้อยละของความขาวสว่างของสีขาวมาตรฐาน โดยจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 525 om-02 [18] มักนำไปใช้ทดสอบประสิทธิภาพของการฟอกเยื่อ ในการที่จะกำจัดความเหลืองที่เกิดจากลิกนินและความไม่บริสุทธิ์อื่นๆ

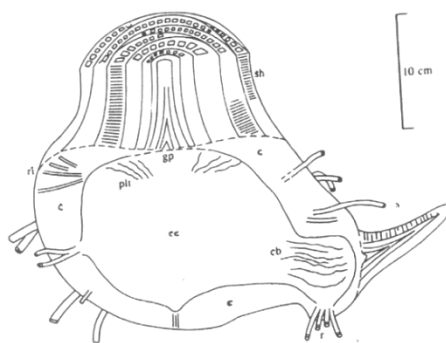
2.6.3.2 ความทึบแสง (opacity)

ความทึบแสงเป็นการวัดความสามารถในการให้แสงทะลุผ่านของแผ่นกระดาษ ถ้าแสงทั้งหมดทะลุผ่านกระดาษโดยไม่สะท้อนหรือถูกดูดกลืน ค่าความทึบแสงจะเป็นศูนย์ แต่ถ้าไม่มีแสงทะลุผ่านกระดาษเลย และแสงทั้งหมดสะท้อนหรือถูกดูดกลืน ค่าความทึบแสงจะเป็นร้อยเปอร์เซ็นต์ ซึ่งแผ่นกระดาษที่มีความทึบแสงมากจะมีการทะลุผ่านของแสงน้อย ความทึบแสงสามารถวัดได้จากปริมาณของแสงที่ทะลุผ่าน โดยมีหน่วยวัดเป็นอัตราส่วนของความเปรียบต่าง (contrast ratio) ซึ่งสามารถวัดโดยเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงสีเขียวที่ช่วงคลื่น

557 นาโนเมตร ระหว่างกระดาษหนึ่งแผ่นที่รองหลังด้วยพื้นสีดำสนิทกับกระดาษที่วางซ้อนกันหนาจนแสงไม่ทะลุผ่าน โดยจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 519 om-02 [19]

2.7 กล้วย

กล้วยเป็นพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ประเภทหนึ่งที่สามารถปลูกลงในดินแทบทุกสภาพและในทุกท้องถิ่นที่สามารถนำเอาทุกส่วนของลำต้นมาใช้ได้ประโยชน์ได้เกือบทั้งหมด กล้วยจัดอยู่ใน family Musaceae ใน order Scitamineae หรือ Zingiberales ซึ่งพืชที่อยู่ใน order นี้ทั้งหมดเป็นพืชที่ต้องการอากาศร้อนชื้นและกึ่งร้อน กล้วยเป็นไม้ยืนต้นที่มีขนาดตั้งแต่ 2-3 นิ้ว จนถึงใหญ่มาก มีลำต้นใต้ดินแบบไรโซม (rhizome) ดังแสดงใน ภาพที่ 2-13 ชอบป่าชื้น ใบประกอบด้วยแผ่นใบ และกาบใบ ซึ่งมีลักษณะแผ่ออกมาก่อรวมตัวกันเป็นลำต้นเทียม (pseudostem) ที่ใจกลางลำต้นเทียมมีช่อดอกฝังอยู่และจะเจริญขึ้นเมื่อถึงระยะเวลาการเจริญพันธุ์ [20]



ภาพที่ 2-13 ลำต้นใต้ดินกล้วย [19]

2.7.1 โครงสร้างของลำต้นใต้ดิน

ระบบลำต้นใต้ดินของกล้วยมีลักษณะคล้ายกับลำต้นใต้ดินของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวอื่นๆ คือ มีการเจริญแผ่ไปด้านข้างของลำต้น และกล้วยเกือบทุกชนิดจะมีการเจริญตามแนวนอนก่อน จึงจะมีการเจริญขึ้นเป็นหน่อหรือลำต้นเหนือดิน ลักษณะภายในของหัวกล้วยหรือเหง้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนสำคัญ คือ แกนกลางและส่วนนอก (central cylinder and cortex) เมื่ออายุกล้วยมากขึ้น เนื้อเยื่อรอบๆ เหง้าจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น อันดับแรกสุด คือ เนื้อเยื่อโดยรอบอีพิดERMมีส (epidermis) จะเปลี่ยนเป็นเนื้อเยื่อที่แข็งและแน่น ประกอบด้วยคิวติน (cutin) อันดับต่อมาการเจริญเติบโตจะทำให้ผิวรอบเหง้าแตกเป็นรอยแผลและแข็งเหมือนกับไม้ก๊อก ซึ่งเกิดจากการสร้างเซลล์ที่หุ้มรอยแผลไว้ อันดับสาม คือ สารที่อยู่ติดกับท่อลำต้น (tracheid) ซึ่งอยู่ติด

กับฐานของกาบใบที่เน่าหลุดไป จะถูกปิดด้วยสารไทโลส (tyloses) ที่มาจากพาราไคนไคมา (parenchyma) การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดเกิดขึ้นตามธรรมชาติเพื่อที่จะป้องกันการเข้าทำลายของเชื้อโรคทางบาดแผล

2.7.2 ลำต้นเหนือดิน

ลำต้นกล้วยที่อยู่เหนือดินจะมีโครงสร้างต่างๆ คล้ายกับเหง้า แต่จะแตกต่างกันที่เนื้อเยื่อส่วนนอกจะลดขนาดความกว้างลง และจะมีท่อน้ำท่ออาหารที่ต่อจากลำต้นไปสู่ก้านใบ การเจริญและพัฒนาของลำต้นกล้วยนั้นจะขึ้นกับลำกล้วยที่ประกอบไปด้วยกาบกล้วยที่คอยพยุงลำต้นให้เหยียดตรงและขยายยาวตลอดลำกล้วย

2.7.3 ลำกล้วย/กาบใบและใบ

ลำกล้วย คือ ส่วนที่ยึดตัวของหน่อ ประกอบด้วยกาบใบที่ประกบกันแน่น ในระหว่างการเจริญเติบโตกาบใบนี้จะค่อยๆ คลี่ออกทีละกาบ การเจริญแรกสุดของใบกล้วยจากเหง้า ใบจะมีลักษณะม้วนเป็นวงกลม ต่อมาเมื่อไผ่จากใจกลางลำกล้วยจึงจะคลี่ออกเป็นแผ่นใบ กาบใบจะยึดกันแน่นโดยเฉพาะขอบกาบจะเรียบบางเพื่อยึดกับกาบใบอื่นๆ ต่อมาภายหลังกาบใบด้านนอกสุดจะคลี่ออก ซึ่งเป็นเพราะเกิดแรงดันจากการเจริญของกาบใบและใบใหม่ภายในใจกลางลำกล้วย

รูปหน้าตัดของกาบกล้วยครึ่งหนึ่งจะประกอบด้วยช่องอากาศ ช่องอากาศเหล่านี้เกิดจากการแบ่งเซลล์ตั้งแต่การพัฒนาและการเจริญของกล้วยในครั้งแรก ผังของช่องอากาศนี้จะประกอบด้วย parenchyma septa และ aerenchyma ภายในคือ ท่อน้ำและท่ออาหาร ผิวด้านนอกและผิวด้านในของกาบกล้วยจะมีลักษณะเป็นเงาใส ซึ่งเป็นเนื้อเยื่อที่แข็งและหนา ได้แก่ เนื้อเยื่อผิว (epidermis) ซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส (cellulose) อย่างมากมาย ถัดเข้าไปจะเป็นเนื้อเยื่อชั้นใน (hypodermis) ที่ประกอบด้วยสารพอลิกลินิน [21]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เมทินี ปิงสว่างและติณห์ ทองประดับ [22] ศึกษาการผลิตเยื่อจากกล้วย โดยนำเอากล้วยในส่วนของลำต้นและใบมาทำการผลิตเป็นกระดาษโดยวิธีการผลิตเยื่อแบบไซดาพบว่า กระดาษที่ผลิตจากลำต้นกล้วยมีความแข็งแรงมากกว่ากระดาษจากใบกล้วย การต้มเยื่อในส่วนของลำต้นกล้วยสามารถต้มได้สุกกว่าในส่วนของใบกล้วย ความขาวสว่างของเยื่อที่ได้จากลำต้นกล้วยสูงกว่าจากใบกล้วย จึงเห็นได้ว่าลำต้นและใบกล้วยสามารถนำมาผลิตเป็นกระดาษได้

แต่ควรทำการบดเยื่อก่อน เนื่องจากเส้นใยที่ได้มีความยาวมากและอาจส่งผลกระทบต่อการขึ้นเป็นแผ่นกระดาษ

Cordeiro และคณะ [1] ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของต้นกล้วยและการต้มเยื่อจากต้นกล้วย พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของต้นกล้วยมีปริมาณเซลลูโลสค่อนข้างสูง คือร้อยละ 60-70 ในขณะที่มีปริมาณลิกนินค่อนข้างต่ำคือประมาณร้อยละ 12 แต่มีปริมาณของเถ้าและสารแทรกค่อนข้างสูงด้วยเช่นกัน โดยส่วนของเปลือกนอกมีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าส่วนอื่น ในส่วนการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยนั้น ทำการต้มเยื่อด้วยวิธีไฮโดรคราฟต์ และไฮดราร่วมกับแอนทราควิโนน ผลที่ได้คือ ถ้าใช้เวลาในการต้มน้อยจะทำให้ได้เยื่อที่คุณภาพดีกว่า เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงกว่าร้อยละ 25 จะทำให้ผลผลิตเยื่อลดลง ผลของการใช้แอนทราควิโนนร่วมกับการต้มเยื่อด้วยวิธีไฮดรานั้นพบว่า การใช้แอนทราควิโนนมีผลให้ช่วยเพิ่มผลผลิตของเยื่อและมีการลดลงของค่าคัปปานัมเบอร์ (kappa number) ซึ่งบอกถึงปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ

Akgül และ Tozluoglu [10] ศึกษาเปรียบเทียบการผลิตเยื่อจากต้นฝ้ายด้วยวิธีการผลิตเยื่อแบบไฮโดรและการผลิตเยื่อแบบไฮดราร่วมกับการใช้แอนทราควิโนน จากผลการทดลองพบว่าการเติมแอนทราควิโนนทำให้เยื่อที่ได้มีผลผลิตของเยื่อและความหนืดเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อลดลง ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ความต้านทานแรงฉีก และความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (bursting strength) เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแอนทราควิโนนช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของกระดาษให้กับเยื่อและกระดาษ ส่วนด้านสมบัติเชิงแสงก็ให้ผลไปในทางเดียวกัน โดยปริมาณแอนทราควิโนนที่ร้อยละ 0.15 ของน้ำหนักเยื่อแห้งจะให้เยื่อที่มีความขาวสว่างสูงสุด

Minja และคณะ [23] ศึกษาเกี่ยวกับการต้มเยื่อแบบคราฟต์จากชิ้นไม้สนของนอร์เวย์ โดยเปรียบเทียบผลระหว่างการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลในการต้มเยื่อแบบคราฟต์ จากผลการทดลองพบว่าการใส่แอนทราควิโนนช่วยเพิ่มผลผลิตเยื่อ โดยไม่ว่าจะใช้แอนทราควิโนนเพียงอย่างเดียวหรือใช้ร่วมกับเมทานอลก็ตาม ส่วนเมทานอลมีผลทำให้ปฏิกิริยาการสลายลิกนินเร็วขึ้นส่งผลให้ค่าปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อลดลง และเมื่อใช้เมทานอลร่วมกับแอนทราควิโนนจะทำให้เยื่อมีความหนืดดีขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1.1 ตันกลั้วยน้ำว่า

3.1.1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดห้องปฏิบัติการ ความบริสุทธิ์ 99%; Merck KGaA, Germany

3.1.1.3 โซเดียมซัลไฟด์ (Na₂S) เกรดห้องปฏิบัติการ ความบริสุทธิ์ 30%; Panreac, E.U.

3.1.1.4 เมทานอล (CH₃OH) เกรดอุตสาหกรรม ความบริสุทธิ์ 99.95%; Unicorn star, Thailand

3.1.1.5 แอนทราควิโนน (C₁₄H₈O₂) เกรดห้องปฏิบัติการ ความบริสุทธิ์ 97%; Sigma-Andrich, USA

3.1.1.6 กระดาษกรองเบอร์ 4; Whatman International Ltd., England

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.2.1 เครื่องต้มเยื่อ (autoclave digester); UEC-2017A, Universal Engineering Corporation, India

3.1.2.2 เครื่องตีกระจายเยื่อ (disintegrator); Formax T-100, Adirondack Machine Corporation, USA

3.1.2.3 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (sheet former) แบบ Rapid-Köthen, RK-2A KWT, Paper Testing Instrument (PTI), Austria

3.1.2.4 เครื่องบดเยื่อ (valley beater); รุ่น UEC-2018A, Universal Engineering Corporation, India

3.1.2.5 เครื่องวัดสภาพกระดาษได้ (freeness tester); Universal Engineering Corporation, India

3.1.2.6 เครื่องวัดความหนาของกระดาษ (thickness tester); Frank, Germany

3.1.2.7 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile tester); Strograph E-S, Toyoseiki Seisaku-SHO LTD., Japan

3.1.2.8 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีกขาด (tear tester); Protear, Thwing-Albert Instrument, USA

3.1.2.9 เครื่องชั่ง (balance) 3 ตำแหน่ง (0.005-4,000fg); TB-4002, Denver Instrument, Germany

3.1.2.10 เครื่องวัดความชื้น (moisture determination balance); FD-600, Kett Electric Laboratory, USA

3.1.2.11 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (fiber quality analyzer, FQA); บริษัท OpTest Equipment Inc., Canada

3.1.2.12 ตู้อบ (oven); Venticell, Germany

3.1.2.13 เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter); Denver Instrument, Germany

3.1.2.14 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง (optical property tester); Color Touch PC, Technidyne Corporation, USA

3.1.2.15 ปีกเกอร์ ขนาด 25 50 250 500 มิลลิลิตร

3.1.2.16 กระบอกลดขนาด ขนาด 25 100 และ 1000 มิลลิลิตร

3.1.2.17 ปีเปต ขนาด 5 และ 50 มิลลิลิตร

3.1.2.18 บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร

3.1.2.19 เทอร์โมมิเตอร์

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 การทดลองตอนที่ 1: การผลิตเยื่อด้วยวิธีไฮโดรเจลจากต้นกล้วย

3.2.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำต้นกล้วยมาตัดให้มีขนาดประมาณ 1 นิ้ว x 2 นิ้ว ดังแสดงในภาพที่ 3-1(ก) แล้วนำไปตากแดดเป็นเวลาประมาณ 2 สัปดาห์ ดังแสดงในภาพที่ 3-1 (ข) นำชิ้นกล้วยที่ตากแห้งแล้วมาวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักตามที่ได้คำนวณไว้ ดังแสดงในภาคผนวก ข



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3-1 ลักษณะชิ้นต้นกล้วยที่ถูกตัดก่อนนำไปตากแห้ง (ก) ชิ้นต้นกล้วยที่ถูกตากแห้งแล้ว (ข)

3.2.1.2 การผลิตเชื้อแบบโซดาเพื่อใช้ในการทดลองควบคุม

นำชิ้นกล้วยมาผลิตเชื้อด้วยวิธีโซดาโดยใช้ภาวะในการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละต่าง ๆ ดังนี้ 10 15 และ 20 ของน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง ทดลอง 2 ซ้ำ โดยใช้ภาวะในการต้มเยื่อ คือ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.1.2.1 นำชิ้นกล้วยมาบรรจุลงในบอมบ์ (bomb) ของเครื่องต้มเยื่อดังแสดงในภาพที่ 1 ในภาคผนวก ก ซึ่งใช้เป็นภาชนะในการต้มเยื่อ

3.2.1.2.2 กำหนดปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องใช้และปริมาณน้ำที่ต้องเติมตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำที่คำนวณได้ลงในบอมบ์

3.2.1.2.3 ปิดฝาบอมบี้ให้แน่นและนำบอมบี้เข้าเครื่องต้มเยื่อดังแสดงในรูปที่ 2 ในภาคผนวก ก เปิดสวิตช์ทำความร้อน เปิดน้ำหล่อ เย็น และเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายในของหม้อต้มเยื่อมีค่า 120 องศาเซลเซียส จนกระทั่งครบเวลา 120 นาที เมื่อต้มเยื่อเสร็จแล้ว ให้ปล่อยน้ำดำ (black liquor) ออกจากบอมบี้และเก็บตัวอย่างน้ำดำเพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณต่างที่เหลือ (residual alkali) นำบอมบี้ออกจากเครื่องต้มเยื่อ เปิดน้ำหล่อให้บอมบี้เย็นและปิดฝาบอมบี้เพื่อเอาเยื่อที่ต้มเสร็จออกจากบอมบี้

3.2.1.2.4 ล้างเยื่อด้วยน้ำประปาให้สะอาดเพื่อเอาน้ำดำและสารเคมีออกจากเยื่อนำเยื่อที่ผ่านการล้างแล้วมาปั่นแห้งให้เยื่อหมาด ซึ่งน้ำหนักเยื่อรวมที่ได้ทั้งหมด แล้วแบ่งเยื่อออกมาหาปริมาณความชื้นของเยื่อตามมาตรฐาน TAPPI T 258 om-02 [24] เพื่อนำมาคำนวณหาร้อยละผลผลิตของเยื่อรวมถึงแบ่งเยื่อบางส่วนมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของเยื่อหลังการต้ม

3.2.1.3 การทดสอบสมบัติของเยื่อ

นำเยื่อที่เตรียมได้มาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของเยื่อดังนี้คือ

3.2.1.3.1 คัปปานัมเบอร์ (kappa number) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ ซึ่งหาได้โดยใช้มาตรฐาน TAPPI T 236 om-99 [25] นำเยื่อที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.1.2.4 มาหาค่าคัปปานัมเบอร์ ทดสอบซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละภาวะ โดยมีเกณฑ์ดังนี้คือ ถ้าค่าคัปปานัมเบอร์มีค่าน้อย แสดงว่าเยื่อที่ผลิตได้มีลิกนินเหลืออยู่ในเยื่อน้อย เยื่อที่ได้จะมีความขาวสว่างสูง ในทางตรงกันข้าม ถ้าเยื่อมีค่าคัปปานัมเบอร์สูง แสดงว่ามีลิกนินเหลืออยู่ในเยื่อสูง เยื่อที่ได้จะมีความขาวสว่างต่ำ

3.2.1.3.2 ปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ (residual alkali) คือ การวิเคราะห์หาปริมาณต่างที่เหลือในน้ำดำ (black liquor) ที่ได้หลังจากการต้มเยื่อจากข้อ 3.2.1.2.3 ทดสอบซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละภาวะ โดยใช้มาตรฐานของ SCAN standard N33:94 [26]

3.2.1.3.3 สันฐานวิทยาของเส้นใย นำน้ำเยื่อที่ได้จากข้อ 3.2.1.2.4 มาวัดค่าความยาวของเส้นใย (fiber length) ความกว้างของเส้นใย (fiber width) ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (fines content) ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (curl index) และดัชนีความหักงอของเส้นใย (kink index) ด้วยเครื่องวิเคราะห์คุณภาพของเส้นใย (fiber quality analyzer: FQA) ตามมาตรฐาน ISO 16065 [12] ดังแสดงใน ภาพที่ 3 ในภาคผนวก ก ในการวัดแต่ละครั้งจะวัดเส้นใยเป็นจำนวน 5000 เส้น และทดสอบซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละภาวะ

3.2.1.4 การเตรียมน้ำเยื่อก่อนขึ้นแผ่น

นำเยื่อกล้วยที่ได้จากข้อ 3.2.1.2 มาทำการตีกระจายด้วยเครื่องบดเยื่อ (valley beater) ตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-01 [27] เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปวัดสภาพระบายได้ (freeness) วิธีที่ใช้ในการทดสอบ คือ Canadian Standard Freeness (CSF) ดังแสดงภาพเครื่องมือที่ใช้วัดในภาพที่ 4 ในภาคผนวก ก ตามมาตรฐาน TAPPI T 227 [28] ซึ่งเป็นการวัดปริมาณของน้ำที่ไหลออกจากรูเปิดทางด้านข้าง (side orifice) ของเครื่องทดสอบ เมื่อเยื่อระบายผ่านแผ่นกรอง (screen plate) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.30 และ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส [28]

ในกรณีที่ค่าสภาพการระบายได้สูงกว่าช่วงที่กำหนดก็จะทำการบดจนได้ค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ นำเยื่อที่ผ่านการตีกระจายแล้วมาขึ้นแผ่นทดสอบให้มีน้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัมต่อตารางเมตร โดยใช้เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid-Köthen ตามมาตรฐาน ISO 5269-2 [29] ดังแสดงในภาพที่ 5 ในภาคผนวก ก ก่อนที่จะนำแผ่นทดสอบไปทดสอบสมบัติต่อไป

3.2.1.5 การปรับสภาพแผ่นทดสอบ

ก่อนนำแผ่นทดสอบไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ แผ่นทดสอบควรผ่านการปรับสภาพก่อนในห้องควบคุมสภาวะ เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง เพื่อให้แผ่นทดสอบมีค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ใกล้เคียงกัน (อุณหภูมิประมาณ 27 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ ร้อยละ 65-75)

3.2.1.6 การทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ

นำแผ่นทดสอบที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว มาทดสอบสมบัติทางโครงสร้างของกระดาษ (structural properties of paper) สมบัติเชิงกลของกระดาษ (mechanical properties of paper) และ สมบัติเชิงแสงของกระดาษ (optical properties of paper) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.2.1.6.1 สมบัติทางโครงสร้าง (structural properties of paper)

3.2.1.6.1.1 น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) นำแผ่นทดสอบมาชั่งน้ำหนัก แล้วนำค่าน้ำหนักที่ได้มาหารพื้นที่ของแผ่นทดสอบ โดยวัดแผ่นทดสอบของแต่ละภาวะจำนวน 6 แผ่น

3.2.1.6.1.2 ความหนา (thickness) วัดความหนาของแผ่นทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนา โดยวัดแผ่นทดสอบของแต่ละภาวะจำนวน 6 แผ่น ในแต่ละแผ่นจะวัด 5 ตำแหน่ง

3.2.1.6.1.3 ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) เป็นค่าที่คำนวณได้จากการนำน้ำหนักมาตรฐานจากข้อ 3.2.1.6.1.1 หารด้วยความหนาจากข้อ 3.2.1.6.1.2 ของแผ่นทดสอบ

3.2.1.6.2 สมบัติเชิงกลของกระดาษ (mechanical properties of paper)

3.2.1.6.2.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) วัดโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง ตามมาตรฐานของ TAPPI T 494 om-01 [15] ดังแสดงในภาพที่ 6 ในภาคผนวก ก โดยตัดชิ้นทดสอบให้มีความกว้าง 15 มิลลิเมตร ในแต่ละภาวะจะทดสอบแผ่นทดสอบจำนวน 6 แผ่น แผ่นละ 2 ครั้ง นำค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน

3.2.1.6.2.2 ความต้านทานแรงฉีก (tear resistance) หรือความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear strength) วัดโดยใช้เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก แบบ Elmendorf internal tearing resistance test ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98 [16] ดังแสดงในภาพที่ 7 ในภาคผนวก ก โดยตัดชิ้นทดสอบให้มีความกว้าง 63 มิลลิเมตร ในแต่ละภาวะจะทดสอบแผ่นทดสอบจำนวน 6 แผ่น แต่ละแผ่นสามารถนำมาหาค่าความต้านทานแรงฉีกได้ 2 ครั้ง ในแต่ละครั้งวัด 1 จุด นำค่าความต้านทานแรงฉีกที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกมาหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน

3.2.1.6.3 สมบัติเชิงแสงของกระดาษ (optical properties of paper)

3.2.1.6.3.1 ความขาวสว่าง (brightness) วัดด้วยเครื่องวัดสมบัติเชิงแสง ตามมาตรฐาน TAPPI T 525 om-02 [18] ดังแสดงในภาพที่ 8 ในภาคผนวก ก โดยวัดแผ่นทดสอบของแต่ละภาวะจำนวน 6 แผ่น แผ่นละ 3 ตำแหน่ง

3.2.1.6.3.2 ความทึบแสง (opacity) วัดด้วยเครื่องวัดสมบัติเชิงแสง เครื่องเดียวกับการวัดหาค่าความขาวสว่าง ตามมาตรฐาน TAPPI T 519 om-02 [19] วัดแผ่นทดสอบของแต่ละภาวะจำนวน 6 แผ่น แต่ละแผ่นวัด 3 ตำแหน่ง

3.2.1.7 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำผลการทดลองของการผลิตเยื่อแบบโซดา ได้แก่ ค่าผลผลิตเยื่อ ค่าคัป ปานัมเบอร์ ค่าปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ และผลที่ได้จากการทดสอบแผ่นทดสอบในด้านต่างๆ รวมถึงสมมติฐานวิทยาของเส้นใย มาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA แบบ single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อดูว่าระดับของการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ซึ่งการวิเคราะห์ทางสถิตินั้นจะพิจารณาจาก P-value เป็นหลัก คือ หาก P-value ของตัวแปรใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อสมบัตินั้นๆ อย่างมีนัยสำคัญ

3.2.1.8 การวิเคราะห์ผลเพื่อหาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสม

นำผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมในการต้มเยื่อแบบโซดาจากต้นกล้วย

3.2.2 การทดลองตอนที่ 2: การผลิตเยื่อวีธีคราฟต์จากต้นกล้วย

3.2.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำขึ้นกล้วยที่ตากแห้งแล้วมาวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น และชั่งน้ำหนักตามที่ได้คำนวณไว้

3.2.2.2 การผลิตเยื่อแบบคราฟต์เพื่อใช้ในการทดลองควบคุม

นำขึ้นกล้วยมาผลิตเยื่อด้วยวิธีคราฟต์ โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองตอนที่ 1 และใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ตามปริมาณที่สอดคล้องกับค่าซัลฟิดิตี (sulfidity) ต่างๆ กัน ดังนี้ ร้อยละ 20 25 และ 30 โดยสามารถดูวิธีการคำนวณสารเคมีที่ใช้ได้ในภาคผนวก 2 ทำการทดลอง 2 ซ้ำ โดยใช้ภาวะในการต้มเยื่อดังนี้ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.2.2.1 นำขึ้นกล้วยมาบรรจุลงในบอมบ์ของเครื่องต้มเยื่อ ซึ่งใช้เป็นภาชนะในการต้มเยื่อ

3.2.2.2.2 นำค่าซัลฟิดิตีที่กำหนดไว้ และนำค่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 มาใช้คำนวณ เพื่อหาปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ที่ต้องใช้และปริมาณน้ำที่

ต้องเติมเพิ่ม ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ และน้ำที่คำนวณได้ลงในบอมบ์

3.2.2.2.3 ต้มกล้วยตามภาวะที่กำหนดและด้วยวิธีการเช่นเดียวกันกับการทดลอง ตอนที่ 1

3.2.2.2.4 นำเยือกกล้วยที่ต้มเสร็จแล้วมาล้างให้สะอาด และนำมาคำนวณหา ผลผลิตของเยื่อ

3.2.2.3 การทดสอบสมบัติของเยื่อ

นำเยื่อที่เตรียมได้มาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของเยื่อ ได้แก่ คัปปานัมเบอร์ ปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ สันฐานวิทยาของเส้นใย ตามการทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.3

3.2.2.4 การเตรียมน้ำเยือก่อนขึ้นแผ่น

นำเยือกกล้วยที่ได้จากข้อ 3.2.2.2 มาทำการตีกระจายด้วยเครื่องบดเยื่อ เป็น เวลา 5 นาที แล้วนำไปวัดสภาพการระบายได้ (ในกรณีที่ว่าสภาพระบายได้สูงกว่าช่วงที่กำหนดก็ จะทำการบดเยื่อจนได้ค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ) นำเยื่อที่ผ่านการตีกระจายแล้วมาขึ้นแผ่นทดสอบ ตามการทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.4 ก่อนที่จะนำแผ่นทดสอบไปทดสอบสมบัติต่อไป

3.2.2.5 การทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ

นำแผ่นทดสอบที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว ตามขั้นตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.5 มา ทดสอบสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติเชิงกลของกระดาษ สมบัติเชิงแสงของกระดาษ ตามการ ทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.6

3.2.2.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำผลการทดลองของการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ มาวิเคราะห์ผลทางสถิติตาม การทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.7

3.2.2.7 การวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่าซัลฟิเดิตีที่เหมาะสม

นำผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อหาซัลฟิเดิตีที่เหมาะสมในการต้ม เยื่อแบบกราฟต์จากต้นกล้วย

3.2.3 การทดลองตอนที่ 3: การผลิตเชื้อจากต้นกล้วยด้วยวิธีกราฟต์ตัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนน

3.2.3.1 การเตรียมวัสดุดิบ

นำขึ้นกล้วยที่ตากแห้งแล้วมาวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น และชั่งน้ำหนักตามที่ได้คำนวณไว้

3.2.3.2 การผลิตเชื้อแบบกราฟต์ตัดแปรโดยร่วมกับการใช้แอนทราควิโนน

นำขึ้นกล้วยมาผลิตเชื้อด้วยวิธีกราฟต์ตัดแปร โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองตอนที่ 1 และใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองตอนที่ 2 ร่วมกับการใช้แอนทราควิโนนปริมาณร้อยละต่างๆ ดังนี้ 0.1 และ 0.2 ของน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง ทดลอง 2 ซ้ำ โดยใช้ภาวะในการต้มเยื่อดังนี้ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.3.2.1 นำขึ้นกล้วยมาบรรจุลงในบอมบ์ของเครื่องต้มเยื่อ ซึ่งใช้เป็นภาชนะในการต้มเยื่อ

3.2.3.2.2 คำนวณปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ตามค่าร้อยละซัลไฟด์ที่ที่เหมาะสมจากการทดลองตอนที่ 2 ปริมาณแอนทราควิโนนที่ต้องใช้ และปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพิ่ม ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ แอนทราควิโนน และน้ำที่คำนวณได้ลงในบอมบ์

3.2.3.2.3 ต้มกล้วยตามภาวะที่กำหนดและด้วยวิธีการเช่นเดียวกันกับการทดลองตอนตอนที่ 1

3.2.3.2.4 นำเยื่อกล้วยที่ต้มเสร็จแล้วมาล้างให้สะอาด และนำมาคำนวณหาร้อยละผลผลิตของเยื่อ

3.2.3.3 การทดสอบสมบัติของเชื้อ

นำเชื้อที่เตรียมได้มาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของเชื้อ ได้แก่ คับปานัมเบอร์ ปริมาณต่างที่เหลือจากการต้ม สันฐานวิทยาของเส้นใย ตามการทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.3 รวมถึงวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อ

3.2.3.4 การเตรียมน้ำเยือก่อนขึ้นแผ่น

นำเยือก๊วยที่ได้จากข้อ 3.2.3.2 มาทำการตีกระจายด้วยเครื่องบดเยื่อ เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปวัดสภาพการระบายได้ (ในกรณีที่ค่าสภาพระบายได้สูงกว่าช่วงที่กำหนดก็ จะทำการบดจนได้ค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ) นำเยื่อที่ผ่านการตีกระจายแล้วมาขึ้นแผ่นทดสอบตาม การทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.4 ก่อนที่จะนำแผ่นทดสอบไปทดสอบสมบัติต่อไป

3.2.3.5 การทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ

นำแผ่นทดสอบที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว ตามการทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.5 มาทดสอบสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงแสงของแผ่นทดสอบ ตามการ ทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.6

3.2.3.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำผลการทดลองของการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ มาวิเคราะห์ผลทางสถิติตาม การทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.7

3.2.2.7 การวิเคราะห์ผลเพื่อหาปริมาณแอนทราควิโนนที่เหมาะสม

นำผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณแอนทราควิโนนที่ เหมาะสมในการต้มเยื่อแบบกราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนน

3.2.4 การทดลองตอนที่ 4: การผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรโดยใช้ เมทานอล

3.2.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำช่อกกล้วยที่ตากแห้งแล้วมาวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น และชั่ง น้ำหนักตามที่ได้คำนวณไว้

3.2.4.2 การผลิตเยื่อแบบกราฟต์ดัดแปรโดยร่วมกับการใช้เมทานอล

นำช่อกกล้วยมาผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปร โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองตอนที่ 1 และใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ที่เหมาะสมซึ่งได้จาก การทดลองตอนที่ 2 ร่วมกับเมทานอลในปริมาณร้อยละ 20 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมดที่ใช้ใน

การต้ม ทดลอง 2 ซ้ำ โดยใช้ภาวะในการต้มเยื่อดังนี้ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 ต่อ 1 ที่ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.4.2.1 นำชิ้นกล้วยมาบรรจุลงในบอมบ์ของเครื่องต้มเยื่อ ซึ่งใช้เป็นภาชนะ ในการต้มเยื่อ

3.2.4.2.2 คำนวณปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ตามค่าร้อยละซัลไฟด์ที่ที่เหมาะสมจากการทดลองตอนที่ 2 ปริมาณ เมทานอลที่ต้องใช้ และปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพิ่ม ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข จากนั้นเติม สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ เมทานอล และน้ำที่คำนวณได้ลงในบอมบ์

3.2.4.2.3 ต้มกล้วยตามภาวะที่กำหนดและด้วยวิธีการเช่นเดียวกันกับการ ทดลองตอนที่ 1

3.2.4.2.4 นำเยือกกล้วยที่ต้มเสร็จแล้วมาล้างให้สะอาด และนำมาคำนวณหา ร้อยละผลผลิตของเยื่อ

3.2.4.3 การทดสอบสมบัติของเยื่อ

นำเยื่อที่เตรียมได้มาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของเยื่อ ได้แก่ คัปปานัมเบอร์ ปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ สันฐานวิทยาของเส้นใย ตามการทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.2 รวมถึงวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ

3.2.4.4 การเตรียมน้ำเยือก่อนขึ้นแผ่น

นำเยือกกล้วยที่ได้จากข้อ 3.2.4.2 มาทำการตีกระจายด้วยเครื่องบดเยื่อ เป็น เวลา 5 นาที แล้วนำไปวัดสภาพการระบายน้ำ (ในกรณีที่ว่าสภาพการระบายน้ำได้สูงกว่าช่วงที่กำหนดก็ จะทำการบดจนได้ค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ) นำเยื่อที่ผ่านการตีกระจายแล้วมาขึ้นแผ่นทดสอบตาม การทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.4 ก่อนที่จะนำแผ่นทดสอบไปทดสอบสมบัติต่อไป

3.2.4.5 การทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ

นำแผ่นทดสอบที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว ตามขั้นตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.5 มา ทดสอบสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงแสงของแผ่นทดสอบ ตามการทดลอง ตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.6

3.2.4.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำผลการทดลองของการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ดัดแปรร่วมกับเมทานอลมาวิเคราะห์ผลทางสถิติตามการทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.7

3.2.5 การทดลองตอนที่ 5: การผลิตเยื่อแบบกราฟต์ดัดแปรโดยร่วมกับการใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลจากต้นกล้วย

3.2.5.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำขึ้นกล้วยที่ตากแห้งแล้วมาวัดความชื้นด้วยเครื่องวัดความชื้น และชั่งน้ำหนักตามที่ได้คำนวณไว้

3.2.5.2 การผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนร่วมกับเมทานอล

นำขึ้นกล้วยมาผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปร โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองตอนที่ 1 ใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองตอนที่ 2 และใช้ปริมาณแอนทราควิโนนที่เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองตอนที่ 3 ร่วมกับเมทานอลในปริมาณร้อยละ 20 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมดที่ใช้ในการต้ม ทดลอง 2 ชั่วโมง โดยใช้ภาวะในการต้มเยื่อดังนี้ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.5.2.1 นำขึ้นกล้วยมาบรรจุลงในบอมบ์ของเครื่องต้มเยื่อ ซึ่งใช้เป็นภาชนะในการต้มเยื่อ

3.2.5.2.2 คำนวณปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ตามค่าร้อยละซัลไฟด์ที่ดีที่เหมาะสมจากการทดลองตอนที่ 2 ปริมาณแอนทราควิโนนที่ได้จากการทดลองตอนที่ 3 ปริมาณเมทานอลที่ต้องใช้ และปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพิ่ม ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ แอนทราควิโนน เมทานอล และน้ำที่คำนวณได้ลงในบอมบ์

3.2.5.2.3 ต้มกล้วยตามภาวะที่กำหนดและด้วยวิธีการเช่นเดียวกันกับขั้นตอนที่ 1

3.2.5.2.4 นำเยื่อกล้วยที่ต้มเสร็จแล้วมาล้างให้สะอาด และนำมาคำนวณหาร้อยละผลผลิตของเยื่อ

3.2.5.3 การทดสอบสมบัติของเยื่อ

นำเยื่อที่เตรียมได้มาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของเยื่อ ได้แก่ คัปปานัมเบอร์ ปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ สันฐานวิทยาของเส้นใย ตามการทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.3 รวมถึงวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ

3.2.5.4 การเตรียมน้ำเยื่อก่อนขึ้นแผ่น

นำเยื่อกล้วยที่ได้จากข้อ 3.2.5.2 มาทำการตีกระจายด้วยเครื่องบดเยื่อ เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำไปวัดสภาพการระบายได้ (ในกรณีที่ว่าสภาพระบายได้สูงกว่าช่วงที่กำหนดก็จะทำการบดจนได้ค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ) นำเยื่อที่ผ่านการตีกระจายแล้วมาขึ้นแผ่นทดสอบตามการทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.4 ก่อนที่จะนำแผ่นทดสอบไปทดสอบสมบัติต่อไป

3.2.5.5 การทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ

นำแผ่นทดสอบที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว ตามการทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.5 มาทดสอบสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงแสงของแผ่นทดสอบ ตามการทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.6

3.2.5.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำผลการทดลองของการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ดัดแปรร่วมกับแอนทราควิโนน และเมทานอล มาวิเคราะห์ผลทางสถิติตามการทดลองตอนที่ 1 ในข้อ 3.2.1.7

3.2.6 การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีต่างๆ

3.2.6.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ (fiber chemical composition)

นำเยื่อที่ผลิตได้จากสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเยื่อแต่ละวิธีมาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โดยจะทำการวิเคราะห์หาปริมาณลิกนิน และปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ตามมาตรฐาน TAPPI T222 [30] ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ตามวิธี Acid chlorite ของ Browning [31] ส่วนปริมาณเฮมิเซลลูโลสนั้นสามารถหาได้จากผลต่างของปริมาณไฮโดรเซลลูโลส และปริมาณแอลฟาเซลลูโลส

3.2.6.2 วิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.2.1 ถึง 3.2.5 และข้อ 3.2.6.1 มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA แบบ single factor เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลว่าการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบหรือไม่ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีโซดา

ผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.1 นี้ เป็นผลจากการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งเป็นการทดลองหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อแบบโซดาจากต้นกล้วย และเพื่อนำปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังกล่าวไปใช้ในการทดลองในตอนต่อไป โดยในการทดลองตอนที่ 1 จะมีการแปรผันปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 15 และ 20 ของน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง ทำการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที ทดสอบสมบัติต่างๆ ของเยื่อและนำเยื่อที่ได้ไปขึ้นเป็นแผ่นกระดาษ และนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลผลิตเยื่อ (pulp yield)

ตารางที่ 4-1 แสดงผลผลิตเยื่อของการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีโซดาที่ใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลผลิตเยื่อมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเข้าทำปฏิกิริยากำจัดลิกนินออกได้มากขึ้น รวมถึงอาจไปทำลายบางส่วนของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสตามปฏิกิริยาฟิลลิ่ง (peeling reaction) ซึ่งคือ การที่เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายในภาวะที่เป็นด่างสูง โดยด่างจะไปตัดสายโซ่โมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสตรงบริเวณหมู่ปลายออกที่ละหนึ่งโมเลกุล ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะส่งผลให้โมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสั้นลง เส้นใยจะอ่อนแอลง [5]

ตารางที่ 4-1 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยื่อกล้วย

ปริมาณ NaOH (%)	ผลผลิตเยื่อ (%)	สภาพระบายได้ (ml)	ค่าป่านัมเบอร์	ปริมาณต่างที่เหลือ (g/l)
10	38.22 ± 4.87	158.25 ± 20.14	49.15 ± 6.94	0 ± 0
15	35.78 ± 2.18	179.40 ± 9.97	35.56 ± 1.09	0 ± 0
20	30.48 ± 2.17	206.63 ± 31.52	37.64 ± 4.60	0.80 ± 0

อย่างไรก็ตาม ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-2 พบว่า การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับ

ต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อผลผลิตเยื่อ เนื่องจากค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.1853 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยื่อกล้วย

สมบัติของเยื่อ	P-value	F_{cal}	F_{crit}
ผลผลิตเยื่อ**	0.1853	3.1157	9.5520
สภาพระบายได้	0.0399*	4.7085	4.2565
คัปป่านัมเบอร์	0.0068*	9.1204	4.2565
ปริมาณต่างที่เหลือ	0.0000*	65535	4.2565

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

** คือ ทดลอง 2 ครั้ง (1 ครั้ง/replicate) ส่วนสมบัติอื่นทดลอง 4 ครั้ง (2 ครั้ง/replicate)

4.1.2 สภาพระบายได้ (freeness)

จากตารางที่ 4-1 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการใช้ไซโตเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น สภาพการระบายได้ของเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะการกัดกร่อนที่มากขึ้น รวมถึงเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสบางส่วนถูกทำลายไปด้วย ซึ่งเฮมิเซลลูโลสจะถูกทำลายได้ง่ายกว่าเซลลูโลส เพราะมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous) และมีจำนวน DP (degree of polymerization) น้อยกว่าเซลลูโลส [32] แต่เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสมีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) มากกว่าองค์ประกอบเคมีอื่นๆ ในเส้นใย ฉะนั้นการที่สูญเสียเฮมิเซลลูโลสไปในปริมาณที่มากขึ้น อาจส่งผลให้เส้นใยมีความสามารถในการรับน้ำลดลง จึงเป็นสาเหตุทำให้สภาพระบายได้มีค่ามากขึ้น และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-2 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า การใช้ไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อสภาพการระบายได้ของเยื่อ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0399 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.1.3 คัปป่านัมเบอร์ (kappa number)

คัปป่านัมเบอร์ คือ ค่าอนุมาณที่บ่งบอกถึงปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ ซึ่งเป็นการวัดความสามารถของเยื่อในการเปลี่ยนโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) ให้อยู่ในรูปแมงกานีส

ไดออกไซด์ (MnO_2) จากการทดสอบดังแสดงผลในตารางที่ 4-1 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ค่าปฏิกิริยาของเยื่อมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเคมีสามารถเข้าไปทำการกำจัดลิกนินออกได้มากขึ้น ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อจึงมีปริมาณน้อยลง ส่งผลให้ค่าค่าปฏิกิริยาของเยื่อลดลงด้วย โดยพบว่าเมื่อต้มเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 15 มีค่าค่าปฏิกิริยาของเยื่อต่ำที่สุดคือ 35.56 ± 1.09 และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-2 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าปฏิกิริยาของเยื่อ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0068 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.1.4 ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อ (residual alkali)

ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อมีความสำคัญมาก เนื่องจากถ้ามีปริมาณต่างไม่เพียงพอในระหว่างการต้มเยื่อ จะส่งผลให้ลิกนินที่ถูกละลายไปกลับมารวมตัวกันได้อีก เรียกว่า การเกิด lignin condensation และกลับมาตกค้างในเยื่อ ซึ่งการละลายลิกนินเหล่านี้ออกในขั้นตอนการฟอกเยื่อทำได้ยากและสิ้นเปลืองสารเคมีในการฟอกเยื่อเป็นอย่างมาก โดย lignin condensation จะเกิดขึ้นเมื่อสารที่ใช้ต้มเยื่อมีความเป็นกรด-เบสต่ำกว่า 12 และจะเกิดอย่างต่อเนื่องและรุนแรงขึ้นเมื่อต่ำกว่า 6 ดังนั้นปริมาณต่างหลังจากการต้มเยื่อควรมีเหลือมากพอที่จะป้องกันการเกิด lignin condensation [33]

จากตารางที่ 4-1 พบว่า ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณสูงขึ้น โดยเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ไม่มีต่างเหลือหลังจากการต้มเยื่อ แสดงว่ามีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการทำปฏิกิริยาจนหมดและปริมาณที่ใช้ยังไม่เพียงพอ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นร้อยละ 20 พบว่าเริ่มมีปริมาณต่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อ แสดงว่าต่างที่ใช้ในการต้มเยื่อสามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้มากขึ้นและเพียงพอ ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงในตารางที่ 4-2 พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ มีผลต่อปริมาณต่างเหลือในน้ำต้มเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.1.5 สัณฐานวิทยาของเส้นใย (fiber characteristic)

4.1.5.1 ความยาวของเส้นใย (fiber length)

จากตารางที่ 4-3 พบว่า เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความยาวของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งในความจริงแล้วเส้นใยอาจไม่ได้ยาวขึ้นเพียงแต่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีปริมาณลดลงทำให้ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นใยเพิ่มขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-4 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความยาวของเส้นใย เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.3948 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

ตารางที่ 4-3 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยื่อกล้วย

	ปริมาณ NaOH (%)		
	10	15	20
ความยาวเส้นใยแบบ LWW (mm ± SD)	3.81 ± 0.24	3.85 ± 0.07	3.97 ± 0.13
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (% ± SD)	70.86 ± 1.01	69.26 ± 1.08	64.90 ± 0.76
ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (value ± SD)	0.39 ± 0.08	0.26 ± 0.01	0.23 ± 0.06
ดัชนีความหักงอของเส้นใย (value ± SD)	2.25 ± 0.35	2.05 ± 0.03	1.83 ± 0.56
ความกว้างของเส้นใย (µm ± SD)	21.73 ± 0.72	21.08 ± 0.46	21.30 ± 0.91

ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยื่อกล้วย

สัณฐานวิทยาของเส้นใย	P-value	F_{cal}	F_{crit}
ความยาวเส้นใยแบบ LWW	0.3948	1.0322	4.2565
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก	2.9E-05*	41.3270	4.2565
ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย	0.0053*	9.9106	4.2565
ดัชนีความหักงอของเส้นใย	0.3395	1.2208	4.2565
ความกว้างของเส้นใย	0.4647	0.8355	4.2565

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

4.1.5.2 ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (fines content)

เส้นใยขนาดเล็กหรือไฟน์ (fine) คือเส้นใยขนาดเล็กที่สามารถลอดผ่านตะแกรงที่มีรูขนาด 200 เมช (mesh) ได้ ซึ่งเส้นใยขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าเส้นใยปกติ แต่มีความแข็งแรงน้อยกว่าเส้นใยปกติ จากตารางที่ 4-3 พบว่าเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากเส้นใยขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวมากสามารถดูดซึมสารเคมีได้มากขึ้น จึงเกิดปฏิกิริยาและถูกทำลายได้มากกว่า จากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-4 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ มีผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $2.9E-05$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 มาก และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.1.5.3 ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใย (curl and kink index)

เส้นใยที่โค้งงอและหักงอเป็นเส้นใยที่เกิดขึ้นจากเส้นใยปกติที่ถูกทำให้เสียรูปไป อาจจะเป็นด้วยการทำลายของสารเคมีหรืออาจเพราะการถูกแรงกลมากกระทำ เช่นการบิดเยื่อ เป็นต้น โดยที่เส้นใยเหล่านี้จะมีพื้นที่ผิวมากกว่าเส้นใยปกติ แต่มีความอ่อนแอกว่าเช่นเดียวกับไฟน์ จากตารางที่ 4-3 พบว่า เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากการที่เส้นใยที่โค้งงอและมีพื้นที่ผิวมาก การดูดซึมสารเคมีก็มากด้วย เมื่อมีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณสูงขึ้น การดูดซึมที่เพิ่มทำให้เส้นใยที่โค้งงอและหักงอถูกทำลายออกไปมาก นอกจากนี้ยังอาจเป็นเพราะการที่เส้นใยที่โค้งงอและหักงอดูดซึมสารเคมีมาก จึงอาจส่งผลให้ลิกนินถูกกำจัดออกจากเส้นใยได้มากขึ้น เส้นใยรับน้ำได้มากขึ้น ทำให้เส้นใยมีความอ่อนตัวมากขึ้น การโค้งงอและหักงอของเส้นใยจึงเกิดน้อยลง

จากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-4 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ มีผลต่อดัชนีความโค้งงอของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0053 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit} แต่ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อดัชนีการหักงอของเส้นใย เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.3395 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

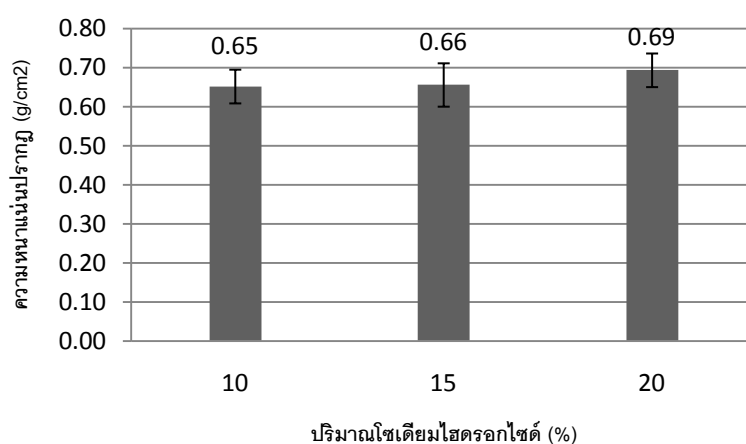
4.1.5.4 ความกว้างของเส้นใย

จากตารางที่ 4-3 พบว่า ปริมาณไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แทบไม่ส่งผลต่อความกว้างของเส้นใย และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-4 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า ปริมาณไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความกว้างของเส้นใย เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.4647 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

4.1.6 สมบัติทางโครงสร้าง (structural properties)

4.1.6.1 ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density)

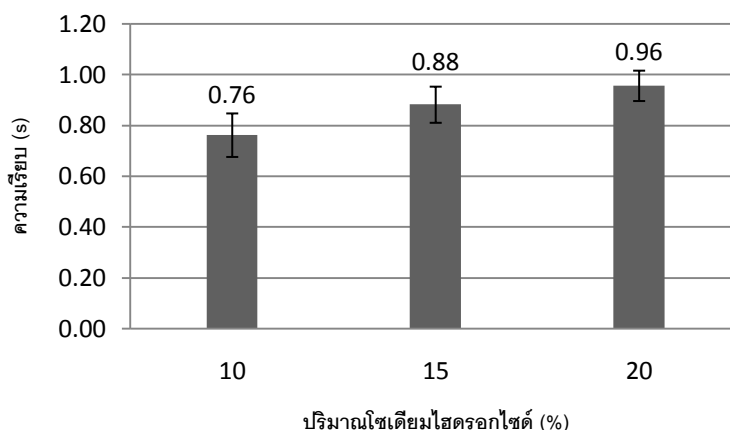
จากภาพที่ 4-1 พบว่า เมื่อใช้ไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณมากขึ้น ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลิกนินถูกกำจัดออกมากขึ้น ส่งผลให้สามารถในการรับน้ำของเส้นใยเพิ่มขึ้น เส้นใยจึงมีความยืดหยุ่นมากขึ้น เมื่อนำเส้นใยที่ได้มาขึ้นแผ่นทดสอบจึงส่งผลให้เส้นใยแนบชิดตัวกันได้ดี แผ่นทดสอบที่ได้จึงมีความหนาแน่นสูงขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-5 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความหนาแน่นปรากฏ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.1621 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}



ภาพที่ 4-1 ผลของปริมาณไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

4.1.6.2 ความเรียบ (smoothness)

จากภาพที่ 4-2 เมื่อมีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ความเรียบของแผ่นทดสอบที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้มีปริมาณเส้นใยโค้งและหักงอ น้อยลง เมื่อนำเส้นใยที่ได้มาขึ้นแผ่นทดสอบ จึงส่งผลให้แผ่นทดสอบที่ได้จึงมีความเรียบมากขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-5 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ มีผลความเรียบของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $9.8E-07$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 มาก และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}



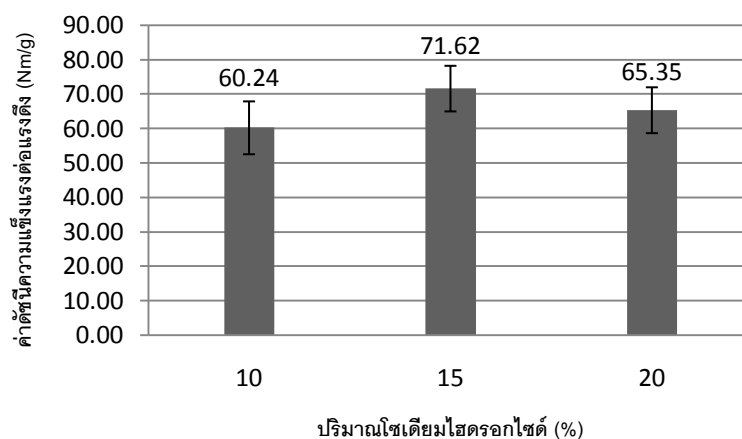
ภาพที่ 4-2 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

4.1.7 สมบัติเชิงกล (mechanical properties)

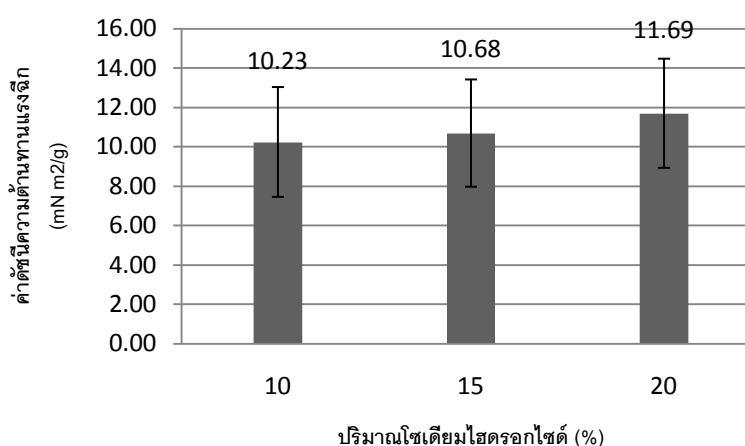
4.1.7.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength)

จากภาพที่ 4-3 พบว่า การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินไป ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงกลับลดลง โดยการผลิตเยื่อกล้วยด้วยความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 ให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุดคือ 71.62 Nm/g ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่า เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น ลิกนินถูกกำจัดออกมากขึ้น เส้นใยเป็นอิสระต่อกันมากขึ้น การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยจึงดีขึ้น นอกจากนี้โซเดียมไฮดรอกไซด์ยังอาจไปทำลายเส้นใยขนาดเล็กๆ ส่งผลให้เหลือเส้นใยยาวในระบบมากขึ้น แผ่นทดสอบจึงมีความแข็งแรง

ต่อแรงดึงมากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินไป อาจส่งผลให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายด้วยปฏิกิริยาฟิชลิ่ง [5] ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง แผ่นทดสอบจึงมีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-5 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ มีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0024 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}



ภาพที่ 4-3 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยือกกล้วย



ภาพที่ 4-4 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยือกกล้วย

4.1.7.2 ความต้านทานแรงฉีก (tear resistance)

จากภาพที่ 4-4 พบว่า เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีกของแผ่นทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณมากขึ้น ความยาวของเส้นใยเพิ่มขึ้นและปริมาณเส้นใยขนาดเล็กลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยในเยื่อเพิ่มขึ้น ซึ่งสำหรับความต้านทานแรงฉีกนั้นความแข็งแรงของเส้นใยมีบทบาทสูงกว่าพันธะระหว่างเส้นใย จึงทำให้แผ่นทดสอบมีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าสูงมาก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการฟอร์มตัวของแผ่นทดสอบ (sheet formation) ไม่ดีนัก กล่าวคือ เส้นใยมีการกระจายตัวที่ไม่ดี และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-5 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความต้านทานแรงฉีก เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.2386 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

4.1.8 สมบัติเชิงแสง (optical properties)

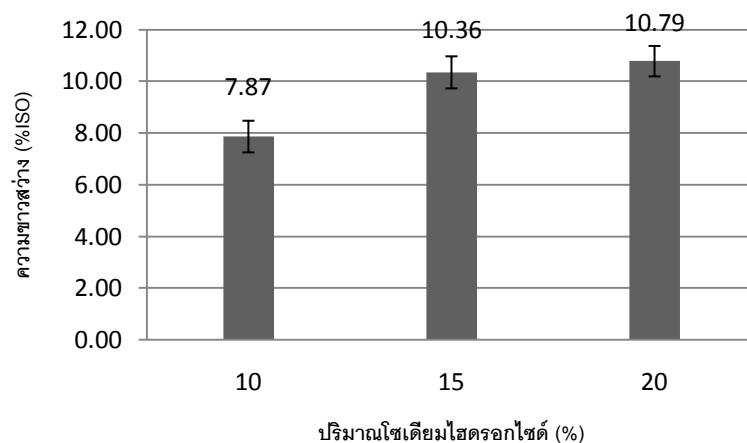
4.1.8.1 ความขาวสว่าง (brightness)

จากภาพที่ 4-5 แสดงผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยือกกล้วย พบว่า เมื่อใช้ปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะลิกนินถูกกำจัดออกไปมากขึ้น และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-5 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ มีผลความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $2.9E-21$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 มาก และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit} มีค่าน้อยกว่า 0.05

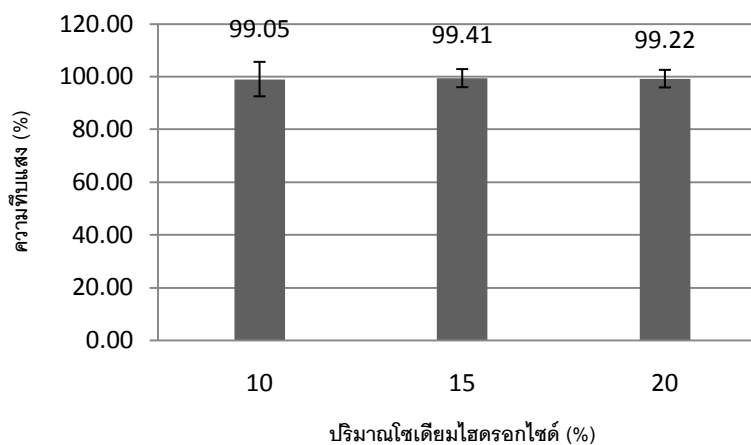
4.1.8.2 ความทึบแสง (opacity)

จากภาพที่ 4-6 แสดงผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้จากเยือกกล้วย พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ ไม่ส่งผลต่อความทึบแสงของกระดาษ และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้

ในตารางที่ 4-5 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความทึบแสง เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.9662 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}



ภาพที่ 4-5 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย



ภาพที่ 4-6 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

ตารางที่ 4-5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

สมบัติของแผ่นทดสอบ	P-value	F _{cal}	F _{crit}
ความหนาแน่นปรากฏ	0.1621	1.9237	3.2849
ความเรียบ	9.8E-07*	21.6565	3.2849
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	0.0024*	7.2989	3.2849
ดัชนีความต้านทานแรงฉีก	0.2386	1.4969	3.2849
ความขาวสว่าง	2.9E-21*	272.9917	3.2849
ความทึบแสง	0.9662	0.0344	3.2849

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

จากผลการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งเป็นการหาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมต่อการผลิตเยื่อแบบโซดาจากต้นกล้วย พบว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับร้อยละ 15 ของน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลองตอนต่อไป เนื่องจากให้ค่าป่านัมเบอร์ต่ำที่สุดและให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุด

4.2 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์

ผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.2 นี้ เป็นผลจากการทดลองตอนที่ 2 ซึ่งเป็นการทดลองหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อแบบคราฟต์จากต้นกล้วย และเพื่อนำปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ตามค่าซัลฟิดิตี (sulfidity) ดังกล่าวไปใช้ในการทดลองในตอนต่อไป โดยในการทดลองตอนที่ 2 จะมีการแปรผันค่าซัลฟิดิตีร้อยละ 20 25 และ 30 ของน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง ใช้ร่วมกับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 ที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 ทำการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที นำเยื่อที่ได้ส่วนหนึ่งไปขึ้นเป็นแผ่นทดสอบ ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเยื่อและแผ่นทดสอบ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลผลิตเยื่อ

ตารางที่ 4-6 ผลของค่าซัลไฟดิทที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยื่อกล้วย

ซัลไฟดิท (%)	ผลผลิตเยื่อ (%)	สภาพระบายได้ (ml)	คัปปานัมเบอร์	ปริมาณต่างที่เหลือ (g/l)
0 (เยื่อไซดา)	35.78 ± 2.18	179.40 ± 9.97	35.56 ± 1.09	0 ± 0
20	33.84 ± 3.89	195.98 ± 16.31	40.89 ± 2.93	2.63 ± 0.44
25	31.89 ± 0.52	245.28 ± 28.34	41.38 ± 1.54	2.57 ± 0.13
30	25.70 ± 3.82	240.08 ± 109.05	40.33 ± 2.06	2.60 ± 0.40

ตารางที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าซัลไฟดิทที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยื่อกล้วย

สมบัติของเยื่อ	P-value	F _{cal}	F _{crit}
ผลผลิตเยื่อ**	0.0954	4.3274	6.5914
สภาพระบายได้	0.3206	1.2963	3.4903
คัปปานัมเบอร์	0.0055*	7.0550	3.4903
ปริมาณต่างที่เหลือ	5.62E-08*	73.0400	3.4903

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

** คือ ทดลอง 2 ครั้ง (1 ครั้ง/replicate) ส่วนสมบัติอื่นทดลอง 4 ครั้ง (2 ครั้ง/replicate)

จากตารางที่ 4-6 แสดงผลผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ที่ใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ตามค่าซัลไฟดิทต่างๆ พบว่า การผลิตเยื่อแบบคราฟต์ให้ค่าผลผลิตเยื่อต่ำกว่าการผลิตเยื่อแบบไซดา เมื่อค่าซัลไฟดิทที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลิตผลของเยื่อมีแนวโน้มลดลง อาจเป็นเพราะการเพิ่มสารโซเดียมซัลไฟด์เข้ามาทำงานร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินมากขึ้น เพราะไฮโดรซัลไฟด์ไอออน (SH^-) ทำให้การซึมของสารเคมีเข้าสู่ชั้นไม้เกิดได้มากขึ้น [5] รวมถึงคาร์บอนไฮเดรต ได้แก่ เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของเส้นใยถูกทำลายมากขึ้นจากปฏิกิริยาฟลิติ่ง อย่างไรก็ตามผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่าการใช้ค่าซัลไฟดิทต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อผลผลิตเยื่อ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0954 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

4.2.2 สภาพระบายได้

จากตารางที่ 4-6 พบว่า การผลิตเยื่อแบบกราฟต์ให้ค่าสภาพระบายได้สูงกว่าการผลิตเยื่อแบบโซดา เมื่อใช้ค่าซัลฟิตดีในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นส่งผลให้สภาพการระบายได้ของเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยพบว่าเมื่อต้มเยื่อด้วยค่าซัลฟิตดีร้อยละ 25 ให้ค่าสภาพระบายได้สูงที่สุดคือ 245.28 ± 28.34 มิลลิลิตร จากนั้นเมื่อใช้ค่าซัลฟิตดีเพิ่มขึ้นแทบไม่มีผลต่อค่าสภาพระบายได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้ค่าซัลฟิตดีเพิ่มขึ้น ทำให้สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากำจัดลิกนินออกได้มากขึ้น รวมทั้งเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสบางส่วนถูกทำลายมากขึ้น ซึ่งเฮมิเซลลูโลสจะถูกทำลายได้ง่ายกว่าเซลลูโลส แต่เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสมีคุณสมบัติชอบน้ำ ฉะนั้นการสูญเสียเฮมิเซลลูโลสไปในปริมาณที่มากขึ้น อาจส่งผลให้เส้นใยรับน้ำลดลง สภาพระบายได้จึงมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้การที่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กลดลงเมื่อใช้ค่าซัลฟิตดีเพิ่มขึ้น ก็อาจทำให้ค่าสภาพระบายได้เพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากพื้นที่ในการอุ้มน้ำของเส้นใยลดลง

จากผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ค่าซัลฟิตดีต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อสภาพระบายได้ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.3206 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

4.2.3 ค่าป่านัมเบอร์

จากตารางที่ 4-6 พบว่า ค่าซัลฟิตดีที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าค่าป่านัมเบอร์ของเยื่อในทิศทางที่ไม่แน่นอน โดยพบว่าเมื่อต้มเยื่อด้วยค่าซัลฟิตดีร้อยละ 25 ให้ค่าค่าป่านัมเบอร์สูงสุดคือ 41.38 ± 1.54 มากกว่าค่าที่ได้จากการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดาซึ่งให้ค่าค่าป่านัมเบอร์เท่ากับ 35.56 ± 1.09 โดยตามทฤษฎีแล้วการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ควรจะทำให้ได้ค่าค่าป่านัมเบอร์ที่น้อยกว่า เนื่องจากการผลิตเยื่อแบบกราฟต์โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์นั้น ไฮโดรซัลไฟด์ไอออน (SH^-) ทำให้การซึมของสารเคมีเข้าสู่ชั้นไม้เกิดได้มากขึ้น

อย่างไรก็ตามค่าค่าป่านัมเบอร์เป็นเพียงค่าอนุมาณที่บ่งบอกถึงปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ ซึ่งเป็นการวัดความสามารถของเยื่อในการเปลี่ยนโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) ให้อยู่ในรูปแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ดังนั้นจึงมีโอกาสที่ค่าที่ได้อาจจะไม่ได้มาจากปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่เพียงอย่างเดียว แต่อาจมาจากสารแทรกด้วย นอกจากนี้ในการวิเคราะห์หาค่าค่าป่านัมเบอร์นั้นควรทำอย่างรวดเร็วโดยไม่ควรทิ้งเยื่อให้นานเกิน 3-7 วันหลังการต้มเยื่อ เพราะอาจมีผลให้ค่าคาดเคลื่อนได้ อย่างไรก็ตามเมื่อนำเยื่อที่ได้จากการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ที่ใช้ค่าซัลฟิตดีร้อยละ 25 และเยื่อที่ผลิตด้วยวิธีโซดาไปวิเคราะห์ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อแล้ว

กลับพบว่า เยื่อคราฟต์มีปริมาณลิกนินในเยื่อต่ำกว่าเยื่อโซดาเล็กน้อย (7.81 ± 0.2 เทียบกับ 8.62 ± 0.11 ในตารางที่ 4-31)

เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ตามค่าซัลไฟดิตีต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อกับปานัมเบอร์เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0055 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.2.4 ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อ

จากตารางที่ 4-6 พบว่า ค่าซัลไฟดิตีที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อในทิศทางที่ไม่แน่นอน โดยพบว่าเมื่อต้มเยื่อกล้วยด้วยค่าซัลไฟดิตี (sulfidity) ร้อยละ 25 ให้ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อต่ำสุด คือ 2.57 ± 0.13 กรัมต่อลิตร โดยค่านี้อย่างสูงกว่าปริมาณต่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อด้วยวิธีโซดา ซึ่งไม่มีปริมาณต่างเหลืออยู่เลย นั่นอาจหมายถึงว่าการต้มเยื่อแบบคราฟต์อาจทำให้ประสิทธิภาพการต้มเยื่อดีขึ้น เนื่องจากไฮโดรซัลไฟด์ไอออน (SH⁻) ทำให้การซึมของสารเคมีเข้าสู่ชิ้นไม้เกิดได้มากขึ้น ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วและสมบูรณ์มากขึ้น โดยอาจใช้สารเคมีน้อยลง จึงเหลือต่างหลังจากการต้มเยื่อมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับต้มเยื่อแบบโซดา จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ค่าซัลไฟดิตีต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณต่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 5.62×10^{-8} ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.2.5 สันฐานวิทยาของเส้นใย

4.2.5.1 ความยาวของเส้นใย

จากตารางที่ 4-8 พบว่า ค่าซัลไฟดิตีที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อความยาวของเส้นใย และพบว่าเมื่อต้มเยื่อกล้วยด้วยค่าซัลไฟดิตีร้อยละ 25 ให้ความยาวของเส้นใยต่ำสุด คือ 3.87 ± 0.09 mm ซึ่งค่าที่ได้นั้นไม่แตกต่างจากความยาวของเส้นใยที่ผลิตได้จากการผลิตเยื่อแบบโซดาเท่าไรนัก อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการทดลองไม่สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่ว่า การเพิ่มค่าซัลไฟดิตีส่งผลให้ค่าความยาวเฉลี่ยของเส้นใยเพิ่มขึ้น เนื่องจากไฮโดรซัลไฟด์ไอออนสามารถเข้าไปปกป้องคาร์โบไฮเดรตได้มากขึ้น [5] และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-9 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ค่าซัลไฟดิตี

ต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความยาวของเส้นใย เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.9401 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

ตารางที่ 4-8 ผลของค่าซัลฟิเดตที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยือกกล้วย

	ซัลฟิเดต (%)			
	0 (เยื่อโซดา)	20	25	30
ความยาวเส้นใยแบบ LWW (mm ± SD)	3.85 ± 0.07	3.92 ± 0.25	3.87 ± 0.09	3.90 ± 0.18
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (% ± SD)	69.26 ± 1.08	67.54 ± 2.16	53.45±1.45	61.40±2.59
ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (value ± SD)	0.26 ± 0.01	0.22 ± 0.01	0.15±0.01	0.20±0.05
ดัชนีความหักงอของเส้นใย (value ± SD)	2.05 ± 0.03	1.71 ± 0.15	1.00±0.04	1.11±0.09
ความกว้างของเส้นใย (µm± SD)	21.08 ± 0.46	20.83 ± 0.21	22.38±0.19	21.30±0.60

ตารางที่ 4-9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าซัลฟิเดตที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยือกกล้วย

สัณฐานวิทยาของเส้นใย	P-value	F_{cal}	F_{crit}
ความยาวเส้นใยแบบ LWW	0.9401	0.1305	3.4903
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก	2.52E-07*	55.9262	3.4903
ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย	0.0011*	10.4880	3.4903
ดัชนีความหักงอของเส้นใย	3.24E-09*	120.1069	3.4903
ความกว้างของเส้นใย	0.0017*	9.5400	3.4903

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

4.2.5.2 ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

จากตารางที่ 4-8 พบว่า ค่าซัลฟิเดิตีที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก และพบว่าเมื่อต้มเยือกด้วยค่าซัลฟิเดิตีร้อยละ 25 ให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กต่ำสุดคือร้อยละ 53.45 ± 1.45 อย่างไรก็ตามค่าปริมาณเส้นใยขนาดเล็กของเยือกด้วยที่ผลิตแบบคราฟต์โดยใช้ปริมาณซัลฟิเดิตีต่างๆ นั้น มีค่าต่ำกว่าปริมาณเส้นใยขนาดเล็กของเยือกด้วยที่ผลิตแบบโซดา (ร้อยละ 69.26 ± 1.08) แสดงว่าการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กลดลง เนื่องจากสารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ดีขึ้น และเส้นใยขนาดเล็กเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากกว่าจะถูกเข้าทำปฏิกิริยาก่อน และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-9 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่าการใช้ค่าซัลฟิเดิตีต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $2.52E-07$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 มาก และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.2.5.3 ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใย

จากตารางที่ 4-8 พบว่า เมื่อค่าซัลฟิเดิตีที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มส่งผลให้ค่าดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตเยื่อแบบโซดาจะเห็นได้ว่าดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยของเยื่อคราฟต์นั้นมีค่าต่ำกว่าดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยของเยื่อโซดา โดยที่ค่าซัลฟิเดิตีร้อยละ 25 ให้ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยต่ำที่สุดคือ ร้อยละ 0.15 ± 0.01 และ 1.00 ± 0.04 ตามลำดับ ในขณะที่ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยของเยื่อโซดาเท่ากับ 0.26 ± 0.01 และ 2.05 ± 0.03 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์สถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-9 ซึ่งเป็นผลการทดสอบทางสถิติโดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ค่าซัลฟิเดิตีต่างๆ มีผลต่อดัชนีความโค้งงอของเส้นใยและดัชนีความหักงอของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0011 และ $3.24E-09$ ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.2.5.4 ความกว้างของเส้นใย

จากตารางที่ 4-8 พบว่า ค่าซัลฟิเดิตีที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นส่งผลต่อความกว้างของเส้นใยในทิศทางที่ไม่ชัดเจน โดยพบว่าเมื่อต้มเยือกด้วยค่าซัลฟิเดิตีร้อยละ 25 ให้

ความกว้างของเส้นใยสูงสุดคือ $22.38 \pm 0.19 \mu\text{m}$ อย่างไรก็ตามค่าความกว้างของเส้นใยที่ได้จากการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ที่ค่าซัลฟิเดิตีต่างๆ นั้นไม่แตกต่างจากความกว้างของเส้นใยที่ได้จากการผลิตเยื่อแบบโซดา ($21.08 \pm 0.46 \mu\text{m}$) เท่าไรนัก เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-9 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor กลับพบว่า การใช้ค่าซัลฟิเดิตีต่างๆ มีผลต่อความกว้างของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0017 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.2.6 สมบัติทางโครงสร้าง

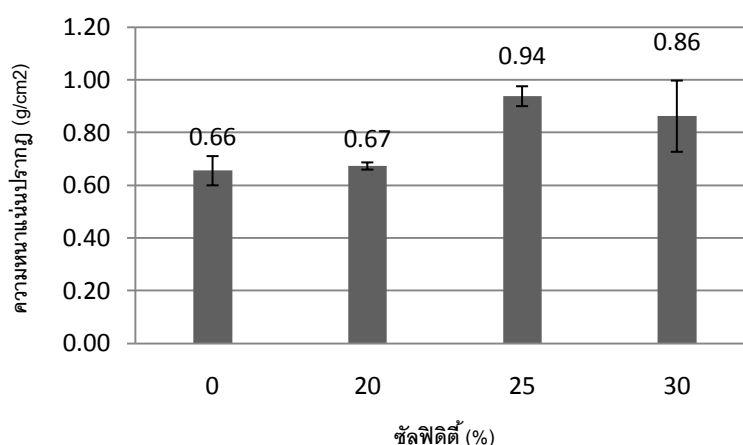
4.2.6.1 ความหนาแน่นปรากฏ

จากภาพที่ 4-7 พบว่า เมื่อค่าซัลฟิเดิตีที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ยกเว้นสำหรับซัลฟิเดิตีร้อยละ 30 ซึ่งมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูง โดยพบว่าเมื่อต้มเยื่อด้วยค่าซัลฟิเดิตีร้อยละ 25 ให้ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบสูงสุด คือ $0.94 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$ และค่าความหนาแน่นปรากฏที่ได้จากเยื่อคราฟต์เมื่อใช้ค่าซัลฟิเดิตีระดับต่างๆ มีค่าสูงกว่าความหนาแน่นปรากฏที่ได้จากเยื่อโซดา ทั้งนี้อาจเป็นเพราะดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยของเยื่อคราฟต์นั้นมีค่าต่ำกว่าดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยของเยื่อโซดา จึงส่งผลให้เส้นใยสามารถสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีขึ้น ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบจึงเพิ่มขึ้น จากการพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-10 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ค่าซัลฟิเดิตีต่างๆ มีผลต่อความหนาแน่นของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 2.91×10^{-12} ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

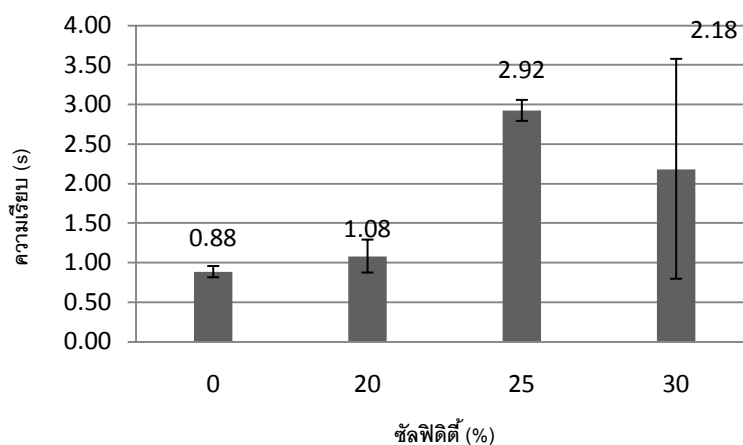
4.2.6.2 ความเรียบ

จากภาพที่ 4-8 ค่าซัลฟิเดิตีที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเรียบของแผ่นทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ยกเว้นสำหรับซัลฟิเดิตีร้อยละ 30 ซึ่งมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูง โดยพบว่าเมื่อมีการต้มเยื่อที่ภาวะค่าซัลฟิเดิตีร้อยละ 25 ความเรียบของแผ่นทดสอบที่ได้มีค่าสูงสุดคือ 2.92 ± 0.13 วินาที และค่าความเรียบที่ได้จากเยื่อคราฟต์เมื่อใช้ค่าซัลฟิเดิตีระดับต่างๆ มีค่าสูงกว่าความเรียบที่ได้จากเยื่อโซดา ทั้งนี้อาจเป็นเพราะดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยของเยื่อคราฟต์นั้นมีค่าต่ำกว่าดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยของ

เยื่อโซดา เมื่อนำเส้นใยที่ได้มาขึ้นแผ่นทดสอบจึงส่งผลให้เส้นใยแนบชิดตัวกันได้ดี ความเรียบของแผ่นทดสอบจึงมากขึ้น และผลจากการวิเคราะห์สถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-10 ซึ่งเป็นผลการทดสอบทางสถิติโดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ค่าซัลไฟด์ที่ต่างๆ มีผลต่อความเรียบของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $7.05E-09$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}



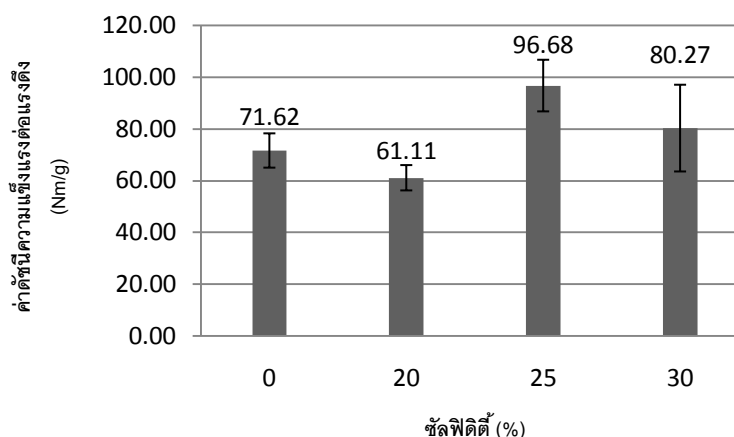
ภาพที่ 4-7 ผลของค่าซัลไฟด์ต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบจากเยื่อคราฟต์



ภาพที่ 4-8 ผลของค่าซัลไฟด์ต่อความเรียบของแผ่นทดสอบจากเยื่อคราฟต์

4.2.7 สมบัติเชิงกล

4.2.7.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง



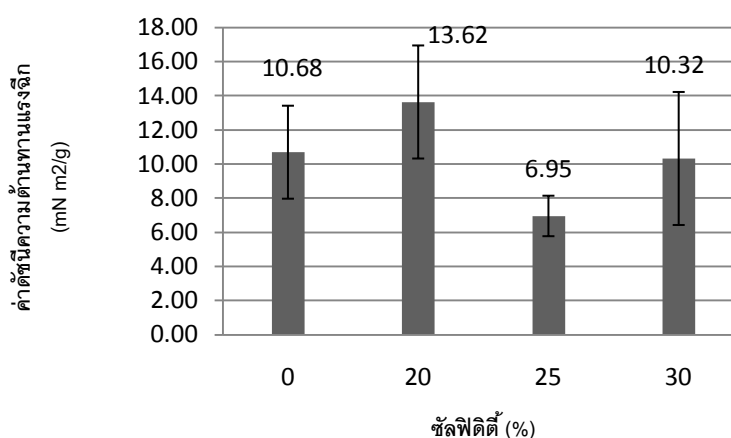
ภาพที่ 4-9 ผลของค่าชัลพิดิตีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบจากเยื่อคราฟต์

จากภาพที่ 4-9 พบว่า เมื่อค่าชัลพิดิตีที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ยกเว้นสำหรับชัลพิดิตีที่ร้อยละ 30 ซึ่งมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูง โดยพบว่าเมื่อต้มเยื่อด้วยค่าชัลพิดิตีร้อยละ 25 ให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบสูงสุด คือ 96.68 ± 9.96 Nm/g ซึ่งให้ค่าสูงกว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตมาจากเยื่อไซโตดา ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไฮโดรชัลไฟต์ไอออนส่งผลให้ทั้งไซเตียมไฮดรอกไซด์และไซเตียมชัลไฟต์เข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนินได้มากขึ้น เส้นใยเป็นอิสระมากขึ้น การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยจึงดีขึ้น นอกจากนี้ไฮโดรชัลไฟต์ไอออนยังเข้าไปช่วยปกป้องเซลล์ลูโลสจากการปฏิกิริยาฟลลิงหรือปฏิกิริยาการสลายคาร์โบไฮเดรตไว้ [30] จึงอาจส่งผลให้แผ่นทดสอบมีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากขึ้น จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-10 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ค่าชัลพิดิตีต่างๆ มีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $6.34E-09$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.2.7.2 ความต้านทานแรงฉีก

จากภาพที่ 4-10 พบว่า เมื่อค่าชัลพิดิตีที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบในทิศทางที่ไม่แน่นอน และเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าที่ได้มี

ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูง ยกเว้นกรณีที่ใช้ซัลฟิเตอ์ร้อยละ 25 ซึ่งมีค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกเท่ากับ $6.95 \pm 1.19 \text{ mN m}^2/\text{g}$ ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุดและมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด หากแต่ค่าที่ได้ยังคงมีค่าต่ำกว่าค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของเยื่อไซดา ซึ่งค่าที่ได้ค่อนข้างไม่สอดคล้องกับทฤษฎีเนื่องจากในงานวิจัยอื่นพบว่า การเพิ่มค่าซัลฟิเตอ์ส่งผลให้ค่าความยาวเฉลี่ยของเส้นใยเพิ่มขึ้น เนื่องจากไฮโดรซัลไฟต์ไอออนสามารถเข้าไปปกป้องคาร์โบไฮเดรตได้มากขึ้น [5] ซึ่งน่าจะส่งผลให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การลดลงของดัชนีความต้านทานแรงฉีกที่ซัลฟิเตอ์ร้อยละ 25 อาจเนื่องมาจากเยื่อที่ได้จากภาวะนี้ผ่านการนำไปบดเยื่อเพื่อทำให้ค่าสภาพระบายได้อยู่ในช่วงเดียวกันกับภาวะอื่นๆ จึงทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยที่ได้อาจลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-10 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ค่าซัลฟิเตอ์ต่างๆ มีผลต่อความต้านทานแรงฉีกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 6.48×10^{-5} ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

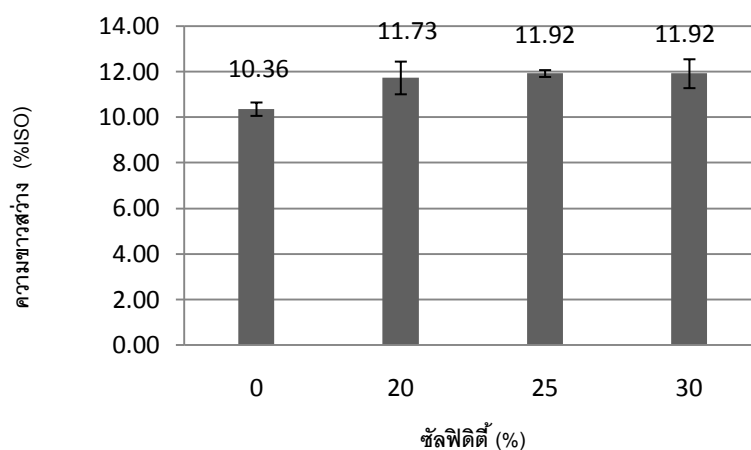


ภาพที่ 4-10 ผลของค่าซัลฟิเตอ์ต่อดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบจากเยื่อคราฟต์

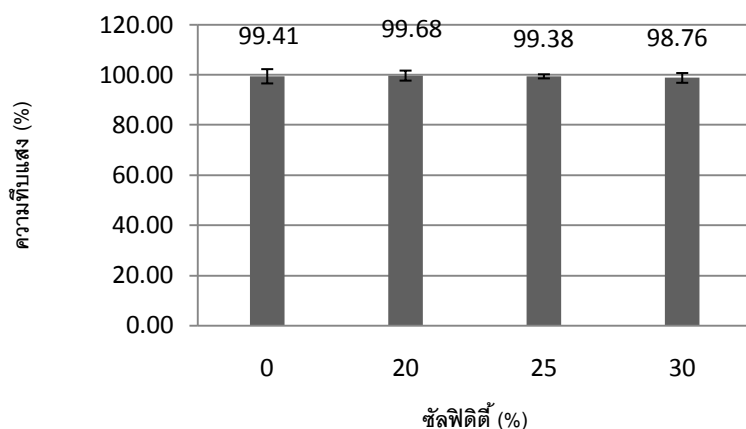
4.2.8 สมบัติเชิงแสง

4.2.8.1 ความขาวสว่าง

จากภาพที่ 4-11 พบว่า เมื่อค่าซัลฟิเดิตีที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยความขาวสว่างที่ได้จากการใช้ค่าซัลฟิเดิตีในระดับต่างๆ มีค่าสูงกว่าความขาวสว่างที่ได้จากเยื่อไชดา ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลิกนินถูกกำจัดออกมากขึ้น เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-10 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ค่าซัลฟิเดิตีต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความขาวสว่าง เนื่องจากค่า P-value มีค่าเท่ากับ $6.21E-10$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}



ภาพที่ 4-11 ผลของค่าซัลฟิเดิตีต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบจากเยื่อคราฟต์



ภาพที่ 4-12 ผลของค่าซัลฟิเดิตีต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบจากเยื่อคราฟต์

4.2.8.2 ความทึบแสง (opacity)

จากภาพที่ 4-12 เมื่อค่าซัลฟิเดิตีที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตได้จากเยือกัลวยมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความหนาแน่นปรากฏที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ช่องว่างระหว่างเส้นใยและอากาศในการสะท้อนแสงจึงลดลง จึงอาจทำให้แผ่นทดสอบมีความทึบแสงน้อยลง อย่างไรก็ตามความทึบแสงที่ได้จากเยื่อคราฟต์นั้นไม่ค่อยแตกต่างจากความทึบแสงที่ได้จากเยื่อโซดามากนัก เมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-10 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ค่าซัลฟิเดิตีต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความทึบแสง เนื่องจากค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.7267 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

ตารางที่ 4-10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของค่าซัลฟิเดิตีที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากเยือกัลวย

สมบัติของแผ่นทดสอบ	P-value	F_{cal}	F_{crit}
ความหนาแน่นปรากฏ	2.91E-12*	37.9200	2.8165
ความเรียบ	7.05E-09*	22.0920	2.8165
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	6.34E-09*	22.2718	2.8165
ดัชนีความต้านทานแรงฉีก	6.48E-05*	9.3940	2.8165
ความขาวสว่าง	6.21E-10*	26.4406	2.8165
ความทึบแสง	0.7267	0.438377	2.8165

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

จากผลการทดลองที่ได้เมื่อนำมาพิจารณาแล้วพบว่าค่าร้อยละซัลฟิเดิตีที่เหมาะสมต่อการผลิตเยื่อแบบคราฟต์จากต้นกัลวย คือ ค่าซัลฟิเดิตีร้อยละ 25 เนื่องจากให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ความหนาแน่น ความเรียบ และความขาวสว่างสูงสุด ขณะที่ปริมาณผลผลิตก็อยู่ในระดับไม่น้อยจนเกินไป จึงเลือกใช้ค่าซัลฟิเดิตีไปใช้สำหรับการทดลองต่อไปซึ่งเป็นการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปร

4.3 ผลการศึกษาการผลิตเชื้อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ตัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนน

ผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.3 นี้ เป็นผลจากการทดลองตอนที่ 3 ซึ่งเป็นการทดลองหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ตัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนน และเพื่อนำปริมาณแอนทราควิโนนดังกล่าวไปใช้ในการทดลองตอนต่อไป โดยในการทดลองตอนที่ 3 จะมีการแปรผันปริมาณแอนทราควิโนนร้อยละ 0.1 และ 0.2 ของน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง ใช้ร่วมกับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 15 และปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ตามค่าซัลไฟด์ที่ได้จากการทดลองตอนที่ 2 ซึ่งค่าซัลไฟด์เท่ากับร้อยละ 25 ทำการต้มเชื้อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที นำเชื้อที่ได้ส่วนหนึ่งไปขึ้นเป็นแผ่นทดสอบ ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเชื้อและแผ่นทดสอบ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลผลิตเชื้อ

ตารางที่ 4-11 ผลของปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ในการต้มเชื้อต่อสมบัติของเชื้อกล้วย

ปริมาณ AQ (%)	ผลผลิตเชื้อ (%)	สภาพระบายได้ (ml)	คัปปานัมเบอร์	ปริมาณต่างที่เหลือ (g/l)
0 (เชื้อคราฟต์)	31.89 ± 0.52	245.28 ± 28.34	41.38 ± 1.54	2.57 ± 0.13
0.1	33.47 ± 1.43	162.63 ± 18.55	37.33 ± 2.07	4.50 ± 0.48
0.2	37.22 ± 0.16	141.50 ± 47.50	35.50 ± 0.63	4.55 ± 0.25

ตารางที่ 4-12 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ในการต้มเชื้อต่อสมบัติของเชื้อกล้วย

สมบัติของเชื้อ	P-value	F _{cal}	F _{crit}
ผลผลิตเชื้อ**	0.0194*	19.2950	9.5520
สภาพระบายได้	0.0043*	10.6040	4.2565
คัปปานัมเบอร์	0.0012*	15.3936	4.2565
ปริมาณต่างที่เหลือ	1.32E-05*	50.1076	4.2565

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

** คือ ทดลอง 2 ครั้ง (1 ครั้ง/replicate) ส่วนสมบัติอื่นทดลอง 4 ครั้ง (2 ครั้ง/replicate)

ผลของการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ดัดแปรร่วมกับแอนทราควิโนนที่ใช้ปริมาณแอนทราควิโนนต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4-11 พบว่า เมื่อใช้แอนทราควิโนนเพิ่มขึ้น ผลผลิตเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเมื่อใช้แอนทราควิโนนปริมาณร้อยละ 0.2 จะให้ผลผลิตเยื่อสูงสุด (ร้อยละ 37.22 ± 0.16) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณแอนทราควิโนนช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในภาวะที่เป็นด่างสูง และช่วยกำจัดลิกนินมากขึ้น โดยการไปทำลายพันธะที่เชื่อมกันภายในโมเลกุลของลิกนินแล้วเปลี่ยนลิกนินให้ไปอยู่ในรูปอ่อนที่สามารถละลายได้ [5] เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-12 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ปริมาณแอนทราควิโนนต่างๆ มีผลต่อผลผลิตเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0194 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.3.2 สภาพระบายได้

จากตารางที่ 4-11 พบว่า เมื่อใช้แอนทราควิโนนเพิ่มขึ้นส่งผลให้สภาพระบายได้ของเยื่อมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณแอนทราควิโนนช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้มากขึ้น รวมถึงช่วยไปกำจัดลิกนินมากขึ้น จึงทำให้เส้นใยมีความสามารถในการรับน้ำได้ดีขึ้น เส้นใยจึงอุ้มน้ำได้ดี ค่าสภาพระบายได้จึงลดลง โดยพบว่าเมื่อใช้ปริมาณแอนทราควิโนนร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักกล้วยแห้งจะให้ค่าสภาพระบายได้ต่ำที่สุดคือ 141.50 ± 47.50 ml และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-12 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ปริมาณแอนทราควิโนนต่างๆ มีผลต่อสภาพระบายได้ของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0043 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.3.3 คัปปานัมเบอร์ (kappa number)

จากตารางที่ 4-11 พบว่า เมื่อใช้แอนทราควิโนนเพิ่มขึ้นส่งผลให้คัปปานัมเบอร์ของเยื่อมีแนวโน้มลดลง โดยค่าคัปปานัมเบอร์ต่ำสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 35.50 ± 0.63 เมื่อใช้ปริมาณแอนทราควิโนนร้อยละ 0.2 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแอนทราควิโนนเข้าทำปฏิกิริยากับลิกนิน แล้วทำให้ลิกนินสลายตัวและละลายออกมากับสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อมากขึ้น [23] และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-12 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ปริมาณแอนทราควิโนนต่างๆ มีผลต่อคัปปานัมเบอร์อย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0012 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.3.4 ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อ

จากตารางที่ 4-11 พบว่า เมื่อใช้แอนทราควิโนนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะแอนทราควิโนนเข้าไปช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินมากขึ้น ปริมาณสารเคมีหลักที่ใช้ในการต้มเยื่อจึงน้อยลง ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อจึงเพิ่มขึ้น และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-12 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ปริมาณแอนทราควิโนนต่างๆ มีผลต่อปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $1.32E-05$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.3.5 สัณฐานวิทยาของเส้นใย

4.3.5.1 ความยาวของเส้นใย

ตารางที่ 4-13 ผลของปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยื่อกล้วย

	ปริมาณ AQ (%)		
	0 (เยื่อคราฟต์)	0.1	0.2
ความยาวเส้นใยแบบ LWW (mm ± SD)	3.87 ± 0.09	4.04 ± 0.22	3.95 ± 0.07
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (% ± SD)	53.45 ± 1.45	63.35 ± 2.14	67.75 ± 1.01
ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (value ± SD)	0.15 ± 0.01	0.19 ± 0.03	0.20 ± 0.02
ดัชนีความหักงอของเส้นใย (value ± SD)	1.00 ± 0.04	1.29 ± 0.49	1.58 ± 0.01
ความกว้างของเส้นใย (µm ± SD)	22.38 ± 0.19	20.90 ± 0.12	20.75 ± 0.29

จากตารางที่ 4-13 พบว่า เมื่อใช้แอนทราควิโนนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความยาวของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณแอนทราควิโนนช่วยลดการทำลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในภาวะที่เป็นต่างได้มากขึ้น เส้นใยจึงยังคงสภาพความแข็งแรงและความยาวไว้ได้ และพบว่าปริมาณแอนทราควิโนนร้อยละ 0.1 ให้ความยาวเส้นใยมากที่สุดคือ 4.04 ± 0.22 mm เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-14 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ปริมาณแอนทราควิโนนต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความยาวของเส้นใย เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.3233 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

ตารางที่ 4-14 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยเยื่อกล้วย

สัณฐานวิทยาของเส้นใย	P-value	F_{cal}	F_{crit}
ความยาวเส้นใยแบบ LWW	0.3233	1.2834	4.2565
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก	1.54E-06*	83.5994	4.2565
ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย	0.0110*	7.7498	4.2565
ดัชนีความหักงอของเส้นใย	0.0568	4.0121	4.2565
ความกว้างของเส้นใย	2.73E-06*	73.0377	4.2565

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

4.3.5.2 ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

จากตารางที่ 4-13 พบว่า เมื่อใช้แอนทราควิโนนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเพิ่มปริมาณแอนทราควิโนนช่วยป้องกันการทำลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในภาวะที่เป็นต่างได้มากขึ้น เส้นใยปกติจึงมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อาจช่วยลดการทำลายเส้นใยขนาดเล็กที่มีความอ่อนแอ เยื่อที่ผลิตได้จึงสามารถกักเก็บเส้นใยขนาดเล็กไว้ได้มากขึ้น และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-14 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ปริมาณแอนทราควิโนนต่างๆ มีผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 1.54E-06 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.3.5.3 ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใย

จากตารางที่ 4-13 พบว่า การใช้แอนทราควิโนนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจสันนิษฐานได้ว่า แอนทราควิโนนอาจเข้าไปปกป้องเส้นใยได้มากขึ้น ความโค้งงอและหักงอของเส้นใยจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และผลจากการ

วิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-14 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ปริมาณแอนทราควิโนนต่างๆ มีผลต่อดัชนีความโค้งงอของเส้นใย อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0110 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit} แต่ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อการหักงอของเส้นใย เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0568 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

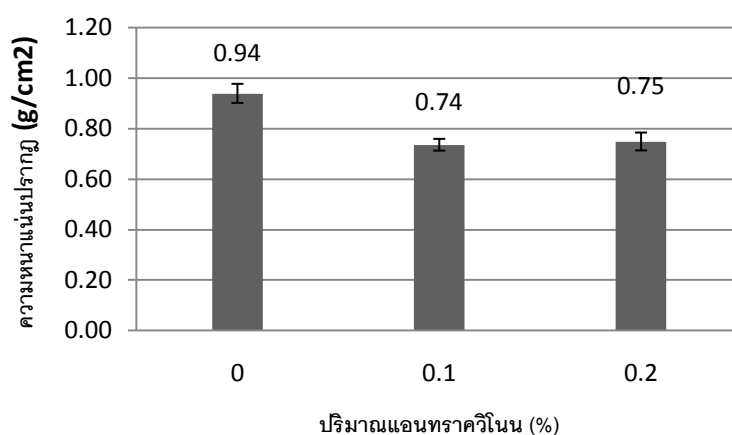
4.3.5.4 ความกว้างของเส้นใย

จากตารางที่ 4-13 พบว่า การใช้แอนทราควิโนนส่งผลให้ความกว้างของเส้นใย มีแนวโน้มลดลง หากแต่การเพิ่มปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้มีผลต่อความกว้างของเส้นใยเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้แอนทราควิโนน ส่งผลให้ลิกนินถูกกำจัดออกไปได้มากขึ้น เส้นใยมีความหยุ่นตัวมากขึ้น เส้นใยยุบตัวได้ง่ายขึ้น ความกว้างของเส้นใยจึงอาจลดลง ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-14 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ปริมาณแอนทราควิโนนต่างๆ มีผลต่อความกว้างของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 2.73E-06 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.3.6 สมบัติทางโครงสร้าง

4.3.6.1 ความหนาแน่นปรากฏ

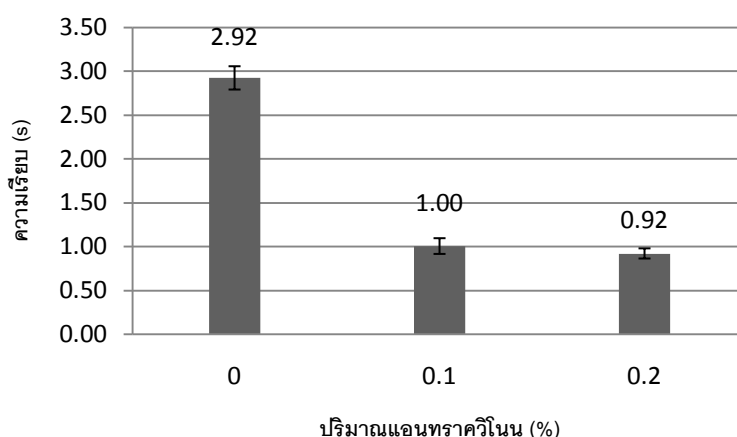
จากภาพที่ 4-13 พบว่า การใช้แอนทราควิโนนส่งผลให้ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบมีแนวโน้มลดลง หากแต่การเพิ่มปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้มีผลต่อความหนาแน่นปรากฏเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเพราะเส้นใยมีความโค้งและงอมากขึ้น เมื่อนำเส้นใยเหล่านั้นมาขึ้นเป็นแผ่นทดสอบจึงอาจทำให้แผ่นทดสอบที่ผลิตได้จึงมีความหนาแน่นลดลง โดยพบว่าเมื่อต้มเยื่อกล้วยด้วยแอนทราควิโนนร้อยละ 0.1 ให้ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบต่ำสุด คือ $0.74 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-15 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ปริมาณแอนทราควิโนนต่างๆ มีผลต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 8.05E-17 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}



ภาพที่ 4-13 ผลของปริมาณแอนทราควิโนนต่อความหนาแน่นปรากฏ
ของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

4.3.6.2 ความเรียบ

จากภาพที่ 4-14 พบว่า การใช้ปริมาณแอนทราควิโนนส่งผลให้ความเรียบของแผ่นทดสอบลดลง โดยความเรียบของแผ่นทดสอบที่ได้มีแนวโน้มลดลงอีกเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณแอนทราควิโนน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณเส้นใยที่มีความโค้งและงอมีมากขึ้น เมื่อนำเส้นใยเหล่านั้นมาขึ้นเป็นแผ่นทดสอบ อาจส่งผลให้แผ่นทดสอบที่ผลิตได้จึงมีความเรียบลดลงด้วย และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-15 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ปริมาณแอนทราควิโนนต่างๆ มีผลต่อความเรียบของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $1.54E-33$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

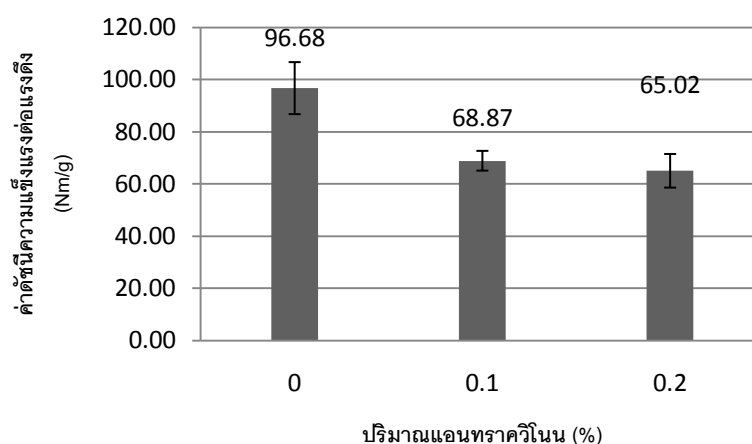


ภาพที่ 4-14 ผลของปริมาณแอนทราควิโนนต่อความเรียบ
ของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยือกกล้วย

4.3.7 สมบัติเชิงกล

4.3.7.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

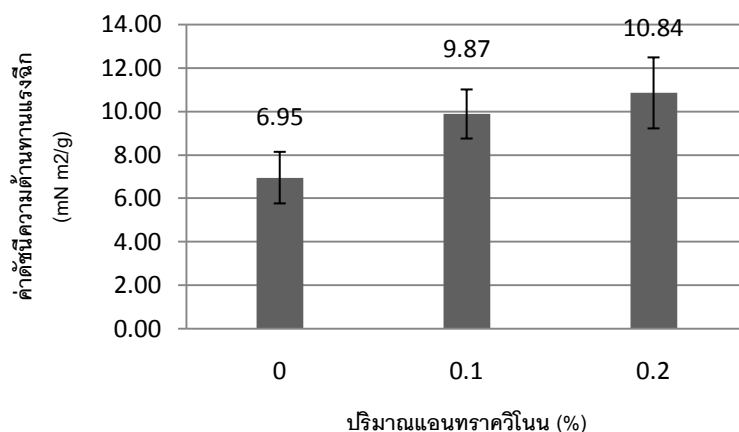
จากภาพที่ 4-15 พบว่า เมื่อมีการใช้แอนทราควิโนนส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ได้มีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากการใส่แอนทราควิโนนทำให้เกิดปฏิกิริยาการกำจัดลิกนินได้ดีขึ้นก็ตาม แต่ขณะเดียวกันก็มีการปกป้องคาร์โบไฮเดรตจากปฏิกิริยาฟูลลิงได้ เส้นใยที่ได้จึงมีความแข็งแรง รวมทั้งสามารถที่จะรักษาเส้นใยขนาดเล็กและเส้นใยที่โค้งงอและหักงอไว้ได้มากขึ้น เมื่อเส้นใยเหล่านี้มาสร้างพันธะกันจะทำให้มีพื้นที่ถ่ายเทแรง (stress area) เมื่อระบบได้รับแรงมากกระทำ บริเวณนี้จะถูกทำลายก่อน ส่งผลให้การกระจายตัวของแรงเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอเท่าเส้นใยปกติ [34] ความแข็งแรงต่อแรงดึงจึงลดลง ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-15 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า ปริมาณแอนทราควิโนนที่ระดับต่างๆ มีผลความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $3.23E-12$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}



ภาพที่ 4-15 ผลของปริมาณแอนทราควิโนนต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง
ของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

4.3.7.2 ความต้านทานแรงฉีก

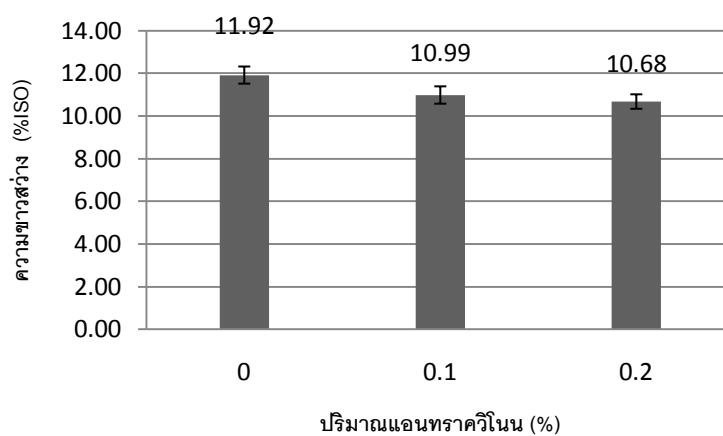
จากภาพที่ 4-16 พบว่า เมื่อมีการใช้ปริมาณแอนทราควิโนนมากขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น อาจเนื่องมาจากการใส่แอนทราควิโนนทำให้ปฏิกิริยาการกำจัดลิกนินเกิดได้ดีขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็มีการปกป้องคาร์โบไฮเดรตจากปฏิกิริยาฟลลิ่งได้ เส้นใยที่ได้จึงมีความแข็งแรง รวมทั้งสามารถที่รักษาเส้นใยขนาดเล็กและเส้นใยที่โค้งงอไว้ได้มากขึ้น รวมถึงทำให้ความยาวเฉลี่ยของเส้นใยเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเส้นใยเหล่านี้มาสร้างพันธะกันจะทำให้มีพื้นที่ถ่ายเทแรง (stress area) เมื่อระบบได้รับแรงมากระทำ พันธะในบริเวณนี้จะถูกทำลายก่อนที่เส้นใยจะขาด การที่จะทำลายความแข็งแรงของเส้นใยจึงต้องใช้แรงมากขึ้น [34] ดังนั้นค่าความต้านทานแรงฉีกจึงเพิ่มขึ้นด้วย ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-15 ซึ่งเป็นผลการทดสอบทางสถิติโดยใช้วิธี Anova แบบ single factor พบว่า ปริมาณแอนทราควิโนนที่ระดับต่างๆ มีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงฉีกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $2.10E-07$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}



ภาพที่ 4-16 ผลของปริมาณแอนทราควิโนนต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

4.3.8 สมบัติเชิงแสง

4.3.8.1 ความขาวสว่าง

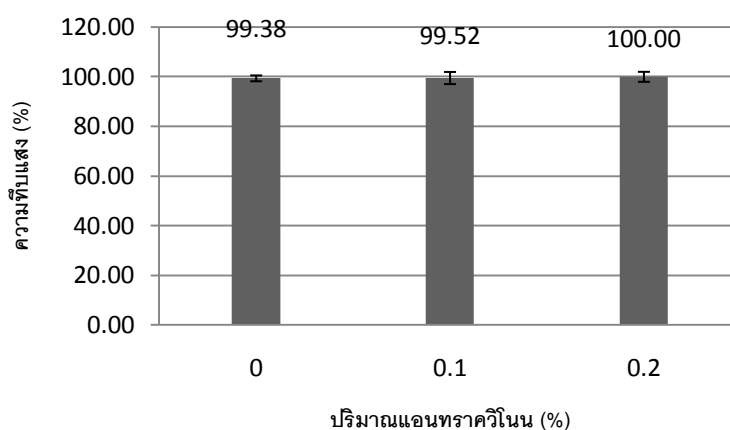


ภาพที่ 4-17 ผลของปริมาณแอนทราควิโนนต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

จากภาพที่ 4-17 พบว่า การใช้ปริมาณแอนทราควิโนนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วยมีแนวโน้มลดลง ทั้งๆ ที่ค่าคัปปานัมเบอร์ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณลิกนินในเยื่อมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการที่เส้นใยมีการโค้งงอและหักงอมากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวในการกระเจิงแสงลดลง ความขาวสว่างจึงลดลง และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-15 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ

single factor พบว่า การใช้ปริมาณแอนทราควิโนนต่างๆ มีผลต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $1.95E-16$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.3.8.2 ความทึบแสง



ภาพที่ 4-18 ผลของปริมาณแอนทราควิโนนต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

จากภาพที่ 4-18 การใช้ปริมาณแอนทราควิโนนเพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตได้จากเยื่อกล้วยค่อนข้างน้อย แม้การใช้ปริมาณแอนทราควิโนนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้นก็ตาม และจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-15 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ปริมาณแอนทราควิโนนต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.5223 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

ตารางที่ 4-15 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของแอนทราควิโนนที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

สมบัติของแผ่นทดสอบ	P-value	F _{cal}	F _{crit}
ความหนาแน่นปรากฏ	8.05E-17*	139.4100	3.2849
ความเรียบ	1.54E-33*	1590.9230	3.2849
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	3.23E-12*	65.5086	3.2849
ดัชนีความต้านทานแรงฉีก	2.10E-07*	25.3968	3.2849
ความขาวสว่าง	1.95E-16*	131.2617	3.2849
ความทึบแสง	0.5223	0.6625	3.2849

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้จากการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ดัดแปรร่วมกับแอนทราควิโนนพบว่า ปริมาณแอนทราควิโนนร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักกล้วยแห้ง เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้สำหรับการทดลองต่อไป เนื่องจากให้ผลผลิตเยื่อและความแข็งแรงต่อแรงฉีกสูงสุด แต่ให้ค่าคัพปานัมเบอร์ต่ำสุด

4.4 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรโดยใช้เมทานอล

ผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.4 นี้ เป็นผลจากการทดลองตอนที่ 4 ซึ่งเป็นการทดลองหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรโดยใช้เมทานอล และเพื่อนำปริมาณเมทานอลดังกล่าวไปใช้ในการทดลองตอนต่อไป โดยในการทดลองตอนที่ 4 จะใช้ปริมาณเมทานอลร้อยละ 20 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมดที่ใช้ในการต้ม ร่วมกับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 ซึ่งได้จากผลการทดลองตอนที่ 1 และปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ตามค่าซัลไฟดิตี ซึ่งค่าซัลไฟดิตีเท่ากับร้อยละ 25 ทำการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที นำเยื่อที่ได้ส่วนหนึ่งไปขึ้นเป็นแผ่นทดสอบ ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเยื่อและแผ่นทดสอบ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลผลิตเยื่อ

ผลของการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรร่วมกับเมทานอลที่ใช้ในปริมาณร้อยละ 20 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมดที่ใช้ในการต้ม แสดงไว้ในตารางที่ 4-16 พบว่าการใช้เมทานอลส่งผลให้ผลผลิตเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากเมทานอลช่วยให้การแทรกซึมสารเคมีเข้าสู่ชั้นต้นกล้วยแห้งเกิดได้ดีขึ้น [5] นอกจากนี้เมทานอลยังสามารถทำลายพันธะที่

เชื่อมต่อกันภายในสายโมเลกุลของลิกนิน การแทรกซึมของสารจึงดีขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาการสลายลิกนินจึงเกิดได้เร็วกว่า โดยที่คาร์โบไฮเดรตจึงไม่ถูกทำลายไปมาก [23] เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-17 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้ปริมาณเมทานอลมีผลต่อผลผลิตเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0345 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

ตารางที่ 4-16 ผลของปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยื่อกล้วย

ปริมาณ methanol (%)	ผลผลิตเยื่อ (%)	สภาพระบายได้ (ml)	คัปานัมเบอร์	ปริมาณต่างที่เหลือ (g/l)
0 (เยื่อคราฟต์)	31.89 ± 0.52	245.28 ± 28.34	41.38 ± 1.54	2.57 ± 0.13
20	37.96 ± 1.55	127.75 ± 1.79	35.85 ± 0.74	3.05 ± 0.41

ตารางที่ 4-17 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยื่อกล้วย

สมบัติของเยื่อ	P-value	F_{cal}	F_{crit}
ผลผลิตเยื่อ**	0.0345*	27.4780	18.5128
สภาพระบายได้	0.0002*	68.4114	5.9874
คัปานัมเบอร์	0.0006*	41.8891	5.9874
ปริมาณต่างที่เหลือ	0.0664	5.0159	5.9874

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

** คือ ทดลอง 2 ครั้ง (1 ครั้ง/replicate) ส่วนสมบัติอื่นทดลอง 4 ครั้ง (2 ครั้ง/replicate)

4.4.2 สภาพระบายได้

จากตารางที่ 4-16 พบว่า เมื่อมีการใช้เมทานอลส่งผลให้สภาพระบายได้ของเยื่อมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากเมทานอลไปช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาการกำจัดลิกนินเกิดได้ดีขึ้น ทำให้เส้นใยเป็นอิสระต่อกันมากขึ้น ความสามารถในการรับน้ำของเส้นใยจึงดีขึ้น สภาพระบายได้ของเยื่อจึงลดลง และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-17 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้เมทานอลมีผลต่อสภาพระบายได้ของ

เยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0002 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.4.3 คัปปานัมเบอร์

จากตารางที่ 4-16 พบว่า การใช้เมทานอลส่งผลให้คัปปานัมเบอร์ของเยื่อมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากเมทานอลช่วยให้การแทรกซึมของสารเคมีเข้าสู่ชั้นต้นกล้วยแห้งเกิดได้ดีขึ้น [5] จึงอาจไปช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยากำจัดลิกนินให้มากขึ้น นอกจากนี้เมทานอลยังไปเปลี่ยนแปลงสารเคมีที่ใช้ต้มเพื่อป้องกันการรวมตัวกันของลิกนินด้วย [23] จึงส่งผลให้คัปปานัมเบอร์ลดลง และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-17 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้เมทานอลมีผลต่อคัปปานัมเบอร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0006 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.4.4 ปริมาณน้ำที่เหลือหลังจากต้มเยื่อ

จากตารางที่ 4-16 พบว่า เมื่อมีการใช้เมทานอลส่งผลให้ปริมาณน้ำที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากเมทานอลมีบทบาทช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อในมากขึ้น เนื่องจากเมทานอลช่วยให้การแทรกซึมของสารเคมีเข้าสู่ชั้นต้นกล้วยแห้งเกิดได้ดีขึ้น [5] จึงอาจส่งผลให้ปริมาณสารเคมีหลักที่ใช้ในการต้มเยื่อมีเหลือมากขึ้น อย่างไรก็ตามผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-17 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้เมทานอลไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณน้ำที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0664 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

4.4.5 สัณฐานวิทยาของเส้นใย

4.4.5.1 ความยาวของเส้นใย

จากตารางที่ 4-18 พบว่า เมื่อมีการใช้เมทานอลส่งผลให้ความยาวของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการใช้เมทานอลแม้จะช่วยทำให้การกำจัดลิกนินเกิดได้มากขึ้น หากแต่เมทานอลก็ส่งผลต่อความหนืดของเยื่อ (pulp viscosity) ด้วยเหมือนกัน เนื่องจากการใช้เมทานอลทำให้ความหนืดของเยื่อลดลง [11] ซึ่งความหนืดของเยื่อนั้นสัมพันธ์กับความแข็งแรงของเส้นใย เนื่องจากเป็นการวัดค่าน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลส เมื่อความหนืดของเยื่อลดลง

นั่นคือ น้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสลดลง ความแข็งแรงรวมถึงความยาวของเส้นใยจึงลดลง นอกจากนี้การที่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีเพิ่มขึ้น อาจมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นใยลดลงด้วย และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-19 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้เมทานอลมีผลต่อความยาวของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0025 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

ตารางที่ 4-18 ผลของปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยื่อกล้วย

	ปริมาณ methanol (%)	
	0 (เยื่อคราฟต์)	20
ความยาวเส้นใยแบบ LWW (mm \pm SD)	3.87 \pm 0.09	3.59 \pm 0.06
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (% \pm SD)	53.45 \pm 1.45	69.58 \pm 1.74
ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (value \pm SD)	0.15 \pm 0.01	0.23 \pm 0.03
ดัชนีความหักงอของเส้นใย (value \pm SD)	1.00 \pm 0.04	1.56 \pm 0.13
ความกว้างของเส้นใย (μm \pm SD)	22.38 \pm 0.19	20.50 \pm 0.27

ตารางที่ 4-19 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณเมทานอลที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยื่อกล้วย

สัณฐานวิทยาของเส้นใย	P-value	F_{cal}	F_{crit}
ความยาวเส้นใยแบบ LWW	0.0025*	24.6423	5.9874
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก	7.45E-06*	203.2102	5.9874
ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย	0.0022*	26.2796	5.9874
ดัชนีความหักงอของเส้นใย	0.0002*	65.6206	5.9874
ความกว้างของเส้นใย	2.80E-05*	128.8168	5.9874

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

4.4.5.2 ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

จากตารางที่ 4-18 พบว่า การใช้เมทานอลส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการใช้เมทานอลส่งผลต่อความหนืดของเยื่อโดยทำให้ความหนืดของเยื่อลดลง [11] เมื่อความหนืดของเยื่อลดลง นั่นคือ น้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสลดลง ความแข็งแรงรวมถึงความยาวของเส้นใยจึงลดลง จึงอาจส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กในระบบเพิ่มขึ้น และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-19 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้เมทานอลมีผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $7.45E-06$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.4.5.3 ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใย

จากตารางที่ 4-18 พบว่า เมื่อมีการใช้เมทานอลส่งผลให้ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจสันนิษฐานได้ว่าการใช้เมทานอลส่งผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง เนื่องจากความหนืดของเยื่อลดลงและการกำจัดลิกนินออกได้มากขึ้นอาจส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยด้วย [11] ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-19 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้เมทานอลมีผลต่อดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0022 และ 0.0002 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

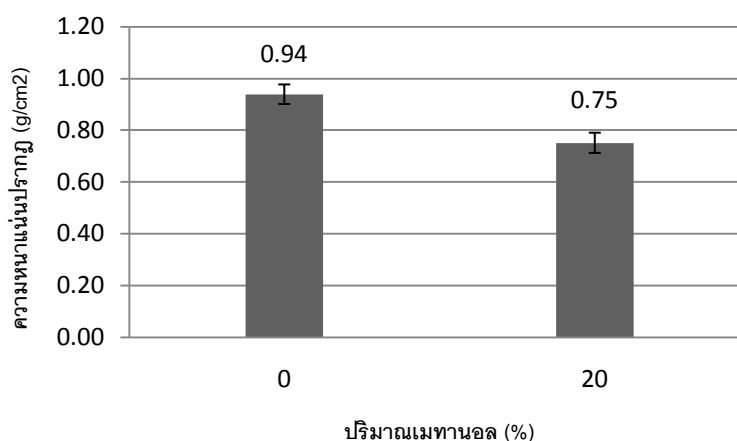
4.3.5.4 ความกว้างของเส้นใย

จากตารางที่ 4-18 พบว่า เมื่อมีการใช้เมทานอลส่งผลให้ความกว้างของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ลิกนินถูกกำจัดออกไปได้มากขึ้น และการที่เส้นใยมีความแข็งแรงลดลง เส้นใยจึงอาจเกิดการยุบตัวได้มากขึ้น ความกว้างของเส้นใยจึงลดลง และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-19 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้เมทานอลมีผลต่อความกว้างของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $2.80E-05$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.4.6 สมบัติเชิงโครงสร้าง

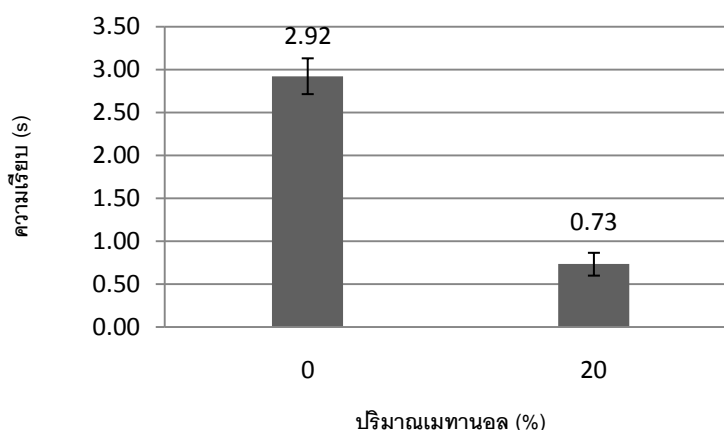
4.4.6.1 ความหนาแน่นปรากฏ

จากภาพที่ 4-19 พบว่า การใช้เมทานอลส่งผลให้ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบที่ได้มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้เมทานอลส่งผลให้ความยาวเฉลี่ยของเส้นใยลดลง ความโค้งงอและหักงอของเส้นใยเพิ่มขึ้น ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากขึ้น แม้ปริมาณลิกนินลดลง (ดูจากค่าคัปปานัมเบอร์) ก็ตาม เมื่อนำเส้นใยเหล่านี้มาขึ้นเป็นแผ่นทดสอบทำให้การแนบชิดกันของเส้นใยในแผ่นทดสอบไม่ดีเท่าที่ควร กระดาษที่ผลิตได้จึงมีความหนาแน่นลดลง และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-20 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้เมทานอลมีผลต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $9.44E-11$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}



ภาพที่ 4-19 ผลของปริมาณเมทานอลต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

4.4.6.2 ความเรียบ



ภาพที่ 4-20 ผลของปริมาณเมทานอลต่อความเรียบ
ของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

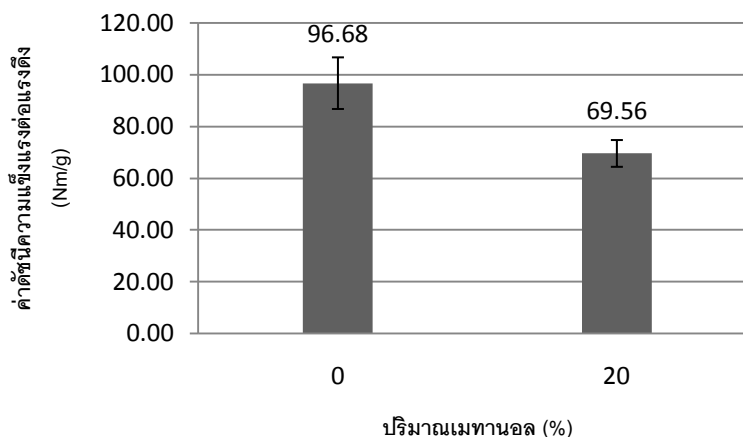
จากภาพที่ 4-20 พบว่า เมื่อมีการใช้เมทานอลส่งผลให้ความเรียบของแผ่นทดสอบที่ได้มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณเส้นใยที่มีความโค้งและหักงอมากขึ้น แม้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กจะมากขึ้นด้วยก็ตาม เมื่อนำมาเยื่อที่ได้มากขึ้นเป็นแผ่นทดสอบทำให้การแนบชิดกันของแผ่นทดสอบไม่ดีเท่าที่ควร ความเรียบจึงลดลง และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-20 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้เมทานอลมีผลต่อความเรียบของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $2.13E-20$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.4.7 สมบัติเชิงกล

4.4.7.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

จากภาพที่ 4-21 พบว่า เมื่อมีการใช้เมทานอลส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ได้มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใส่เมทานอลแม้ทำให้สามารถกำจัดลิกนินออกไปได้มากขึ้น หากแต่การใช้เมทานอลส่งผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง เนื่องจากความหนืดของเยื่อลดลง [11] นอกจากนี้ยังส่งผลให้เส้นใยโค้งงอและหักงอมากขึ้น จึงอาจส่งผลให้เกิดพันธะระหว่างเส้นใยลดลง ซึ่งการที่ความแข็งแรงของเส้นใยและพันธะระหว่างเส้นใยลดลง อาจมีผลทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง และจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-20 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า

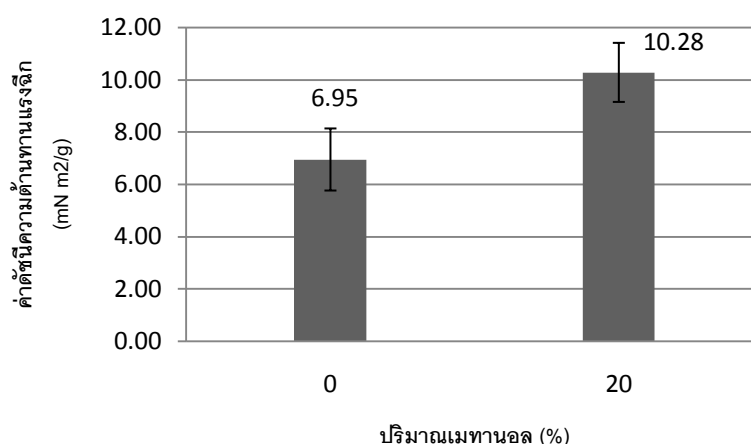
ปริมาณเมทานอลมีผลความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $4.94E-08$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}



ภาพที่ 4-21 ผลของเมทานอลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

4.4.7.2 ความต้านทานแรงฉีก

จากภาพที่ 4-22 พบว่า เมื่อมีการใช้เมทานอลส่งผลให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากการใช้เมทานอลมีผลทำให้ความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยเพิ่มขึ้น เมื่อเส้นใยเหล่านี้มาสร้างพันธะกันจะทำให้มีพื้นที่ถ่ายเทแรง (stress area) เมื่อระบบได้รับแรงมากกระทำ พันธะในบริเวณนี้จะถูกทำลายก่อนที่เส้นใยจะขาด การที่จะทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยจึงต้องใช้แรงมากขึ้น [34] และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-20 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้เมทานอลมีผลต่อความต้านทานแรงฉีกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $1.57E-05$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

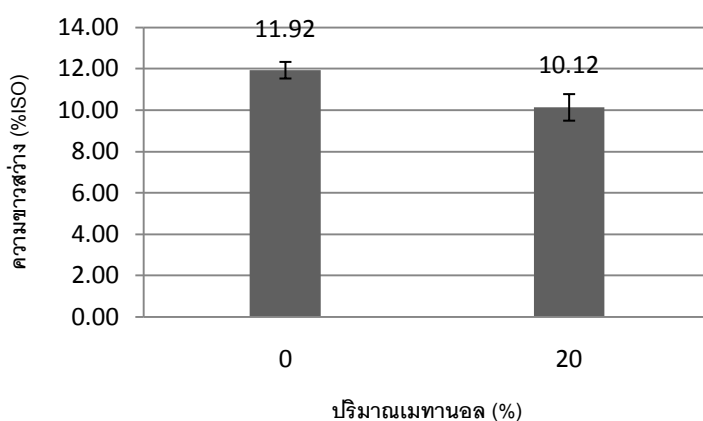


ภาพที่ 4-22 ผลของปริมาณเมทานอลต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก
ของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

4.4.8 สมบัติเชิงแสง

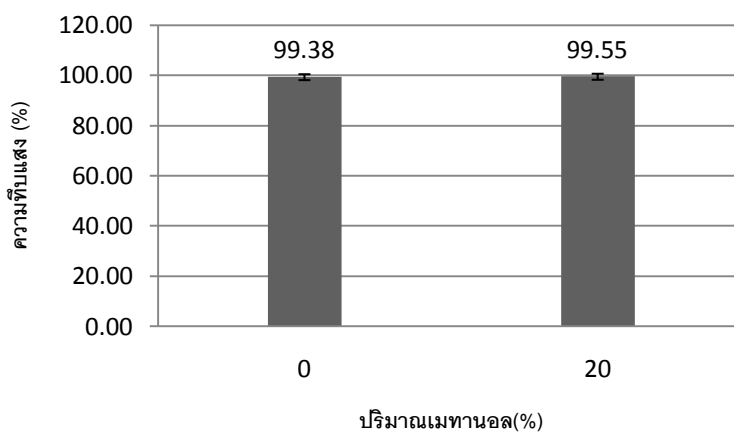
4.4.8.1 ความขาวสว่าง

จากภาพที่ 4-23 พบว่า การใช้เมทานอลส่งผลให้ความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วยมีแนวโน้มลดลง ทั้งๆ ที่ค่าคัปปานมเบอร์ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณลิกนินในเยื่อมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการที่เส้นใยมีการโค้งงอและหักงอมากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวในการกระเจิงแสงลดลง ความขาวสว่างจึงลดลง เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-20 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้เมทานอลมีผลต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $8.70E-10$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}



ภาพที่ 4-23 ผลของปริมาณเมทานอลต่อความขาวสว่าง
ของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

4.4.8.2 ความทึบแสง



ภาพที่ 4-24 ผลของปริมาณเมทานอลต่อความทึบแสง
ของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

จากภาพที่ 4-24 การใช้เมทานอลส่งผลต่อค่าความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตได้จากเยื่อกล้วยค่อนข้างน้อย แม้การใช้เมทานอลจะส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้นก็ตาม อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์สถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-20 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การใช้เมทานอลต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.6681 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

ตารางที่ 4-20 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของเมทานอลที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

สมบัติของแผ่นทดสอบ	P-value	F _{cal}	F _{crit}
ความหนาแน่นปรากฏ	9.44E-11*	131.5322	4.3009
ความเรียบ	2.13E-20*	1128.2560	4.3009
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	4.94E-08*	65.3904	4.3009
ดัชนีความต้านทานแรงฉีก	1.57E-05*	30.3034	4.3009
ความขาวสว่าง	8.70E-10*	103.6578	4.3009
ความทึบแสง	0.6681	0.1888	4.3009

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

4.5 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีกราฟต์ตัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนร่วมกับเมทานอล

ผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.5 นี้ เป็นผลจากการทดลองตอนที่ 5 ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อหาอิทธิพลของการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีกราฟต์ตัดแปรจากต้นกล้วยโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลร่วมกัน โดยใช้ปริมาณไซเตียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 15 ปริมาณไซเตียมซัลไฟด์ตามค่าซัลฟิเดิตีที่ได้จากการทดลองตอนที่ 2 ซึ่งค่าซัลฟิเดิตีเท่ากับร้อยละ 25 ปริมาณแอนทราควิโนนที่ได้จากการทดลองตอนที่ 3 ซึ่งเท่ากับร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง และปริมาณเมทานอลร้อยละ 20 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด โดยทำการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที นำเยื่อที่ได้ส่วนหนึ่งไปขึ้นเป็นแผ่นทดสอบ ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเยื่อและแผ่นทดสอบ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีดังต่อไปนี้

4.5.1 ผลผลิตเยื่อ

ผลของการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีกราฟต์ตัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอล จากตารางที่ 4-21 พบว่า เมื่อมีการใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลส่งผลให้ผลผลิตของเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแอนทราควิโนนช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในภาวะที่เป็นต่างสูง และช่วยกำจัดลิกนินมากขึ้น โดยการไปทำลายพันธะที่เชื่อมกันภายในโมเลกุลของลิกนินแล้วเปลี่ยนลิกนินให้ไปอยู่ในรูปอื่นที่สามารถละลายได้ [5] ส่วนเมทานอลไปช่วยทำลายพันธะที่เชื่อมต่อกันภายในสายโมเลกุลของลิกนิน ทำ

ให้การแทรกซึมของสารเคมีดีขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาการสลายลิกนินเกิดได้เร็ว โดยที่คาร์โบไฮเดรตไม่ถูกทำลายไปมาก [23] อย่างไรก็ตามผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-22 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การผลิตเยื่อคราฟต์แบบดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อผลผลิตเยื่อเนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.3065 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

ตารางที่ 4-21 ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีคราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยื่อกล้วย

การผลิตเยื่อ	ผลผลิตเยื่อ (%)	สภาพระบายได้ (ml)	คัปปานัมเบอร์	ปริมาณต่างที่เหลือ (g/l)
คราฟต์	31.89 ± 0.52	245.28 ± 28.34	41.38 ± 1.54	2.57 ± 0.13
คราฟต์ดัดแปร	34.60 ± 2.76	140.00 ± 20.25	34.24 ± 0.66	3.75 ± 0.64

ตารางที่ 4-22 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการผลิตเยื่อด้วยวิธีคราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยื่อกล้วย

สมบัติของเยื่อ	P-value	F_{cal}	F_{crit}
ผลผลิตเยื่อ**	0.306497	1.853169	18.51282
สภาพระบายได้	0.002181*	26.19974	5.987378
คัปปานัมเบอร์	0.000144*	72.4278	5.987378
ปริมาณต่างที่เหลือ	0.010975*	13.17141	5.987378

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

** คือ ทดลอง 2 ครั้ง (1 ครั้ง/replicate) ส่วนสมบัติอื่นทดลอง 4 ครั้ง (2 ครั้ง/replicate)

4.5.2 สภาพการระบายได้

จากตารางที่ 4-21 พบว่า การใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลร่วมกับการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ส่งผลให้สภาพการระบายได้ของเยื่อมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณ

แอนทราควิโนนช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้มากขึ้น รวมถึงช่วยไปกำจัดลิกนินมากขึ้น จึงทำให้เส้นใยมีความสามารถในการรับน้ำได้ดีขึ้น เส้นใยจึงอุ้มน้ำได้ดี ในขณะที่เมทานอลไปช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาการกำจัดลิกนินเกิดได้ดี ทำให้เส้นใยเป็นอิสระต่อกันมากขึ้น ความสามารถในการรับน้ำของเส้นใยจึงดีขึ้น สภาพระบายได้ของเยื่อจึงลดลง เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-22 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การผลิตเยื่อกราฟต์แบบดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลมีผลต่อผลผลิตเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0022 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.5.3 คัปปานัมเบอร์

จากตารางที่ 4-21 พบว่า การใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลร่วมกับการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ส่งผลให้คัปปานัมเบอร์ของเยื่อมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากแอนทราควิโนนและเมทานอลช่วยให้ปฏิกิริยาการกำจัดลิกนินเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงสามารถกำจัดลิกนินออกจากเส้นใยได้มาก และเมทานอลเองยังสามารถป้องกันการรวมตัวกันของลิกนิน (lignin condensation) ได้ด้วย [23] และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-22 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การผลิตเยื่อกราฟต์แบบดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลมีผลต่อคัปปานัมเบอร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.5.4 ปริมาณน้ำที่เหลือหลังจากต้มเยื่อ

จากตารางที่ 4-21 พบว่า การใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลมีบทบาทช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการกำจัดลิกนินให้ดีขึ้น จึงอาจส่งผลให้การใช้สารเคมีหลักในการต้มเยื่อลดลง ปริมาณน้ำที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-22 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การผลิตเยื่อกราฟต์แบบดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลมีผลต่อปริมาณน้ำที่เหลือหลังการต้มเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0110 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.5.5 สัณฐานวิทยาของเส้นใย

4.5.5.1 ความยาวของเส้นใย

ตารางที่ 4-23 ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลในการต้มเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยือกกล้วย

	การผลิตเยื่อ	
	เยื่อกราฟต์	เยื่อกราฟต์ดัดแปร
ความยาวเส้นใยแบบ LWW (mm ± SD)	3.87 ± 0.09	3.66 ± 0.07
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (% ± SD)	53.45 ± 1.45	66.26 ± 1.16
ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (value ± SD)	0.15 ± 0.01	0.20 ± 0.01
ดัชนีความหักงอของเส้นใย (value ± SD)	1.00 ± 0.04	1.42 ± 0.11
ความกว้างของเส้นใย (μm ± SD)	22.38 ± 0.19	20.40 ± 0.12

ตารางที่ 4-24 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลในการต้มเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยื่อ

สัณฐานวิทยาของเส้นใย	P-value	F _{cal}	F _{crit}
ความยาวเส้นใยแบบ LWW	0.011394*	12.94543	5.9874
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก	8.95E-06*	190.8505	5.9874
ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย	0.0005*	45.2738	5.9874
ดัชนีความหักงอของเส้นใย	0.0004*	52.0129	5.9874
ความกว้างของเส้นใย	2.01E-06*	317.3390	5.9874

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

จากตารางที่ 4-23 พบว่า การใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลร่วมกับการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ส่งผลให้ความยาวของเส้นใยมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจสันนิษฐานได้ว่าแม้การใช้แอนทราควิโนนจะช่วยลดการทำลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในภาวะที่เป็นต่างได้มากขึ้น เส้นใยน่าจะยังคงสภาพความแข็งแรงและความยาวไว้ได้ หากแต่การใช้เมทานอลทำให้ความหนืดของเยื่อลดลง [11] ซึ่งความหนืดของเยื่อนั้นสัมพันธ์กับความแข็งแรงของเส้นใย เมื่อความ

หนืดของเส้นใยลดลง นั่นคือ น้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสลดลง ความแข็งแรงรวมถึงความยาวของเส้นใยจึงลดลง นอกจากนี้การที่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีเพิ่มขึ้น อาจมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นใยลดลงด้วย และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-24 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การผลิตเยื่อกระดาษแบบดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลมีผลต่อความยาวของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0114 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.5.5.2 ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

จากตารางที่ 4-23 พบว่า การใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลร่วมกับการผลิตเยื่อแบบกระดาษส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเพิ่มปริมาณแอนทราควิโนนช่วยป้องกันการทำลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในภาวะที่เป็นต่างได้มากขึ้น จึงอาจช่วยลดการทำลายเส้นใยขนาดเล็ก ในขณะที่การใช้เมทานอลทำให้ความหนืดของเยื่อลดลง [11] เมื่อความหนืดของเส้นใยลดลง ความแข็งแรงรวมถึงความยาวของเส้นใยจึงลดลงอาจส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กในระบบเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-24 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การผลิตเยื่อกระดาษแบบดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลมีผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $8.95E-06$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.5.5.3 ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใย

จากตารางที่ 4-23 พบว่า การใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลร่วมกับการผลิตเยื่อแบบกระดาษส่งผลให้ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจสันนิษฐานได้ว่าการใช้เมทานอลส่งผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง เนื่องจากความหนืดของเยื่อลดลง และการกำจัดลิกนินออกได้มากขึ้นอาจส่งผลต่อสัดส่วนของเส้นใยด้วย [11] ในขณะที่แอนทราควิโนนอาจเข้าไปปกป้องเส้นใยได้มากขึ้น ความโค้งงอและหักงอของเส้นใยจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-24 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การผลิตเยื่อกระดาษแบบดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลมีผลต่อดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยอย่างมี

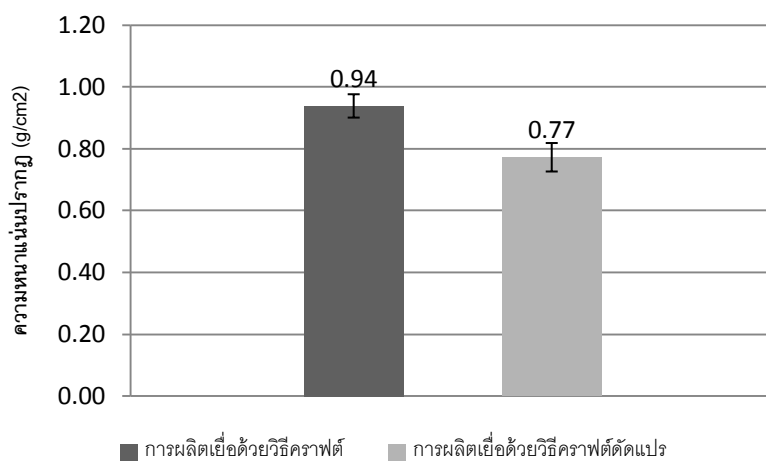
นัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0005 และ 0.0004 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.5.5.4 ความกว้างของเส้นใย

จากตารางที่ 4-23 พบว่า การใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลร่วมกับการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ส่งผลให้ความกว้างของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้แอนทราควิโนนและเมทานอล ส่งผลให้ลิกนินถูกกำจัดออกไปได้มากขึ้น เส้นใยมีความหยาบตัวมากขึ้น เส้นใยยุบตัวได้ง่ายขึ้น ความกว้างของเส้นใยจึงลดลง และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-24 ซึ่งเป็นผลการทดสอบทางสถิติโดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การผลิตเยื่อกราฟต์แบบดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลมีผลต่อความกว้างของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $2.01E-06$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.5.6 สมบัติเชิงโครงสร้าง

4.5.6.1 ความหนาแน่นปรากฏ



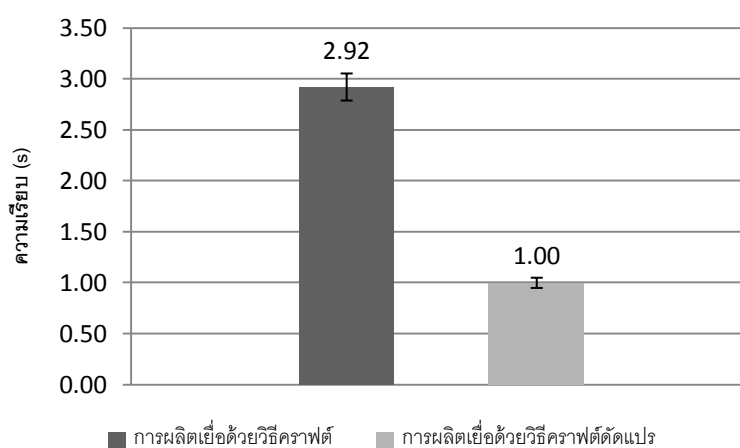
ภาพที่ 4-25 ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอล ต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

จากภาพที่ 4-25 พบว่า การใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลร่วมกับการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ส่งผลให้ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบที่ได้มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการใช้แอนทราควิโนนและเมทานอล ทำให้เส้นใยมีความโค้งและหักงอมากขึ้น และมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากขึ้น แม้ปริมาณลิกนินลดลง (ดูจากค่าคัปปานัมเบอร์) ก็ตาม เมื่อนำ

เส้นใยเหล่านี้มากขึ้นเป็นแผ่นทดสอบ อาจทำให้การแนบชิดกันของเส้นใยในแผ่นทดสอบไม่ดีเท่าที่ควร ความหนาแน่นปรากฏจึงลดลง เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-25 ซึ่งเป็นผลการทดสอบทางสถิติโดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การผลิตเยื่อกราฟต์แบบดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลมีผลต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $3.12E-09$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.5.6.2 ความเรียบ

จากภาพที่ 4-25 พบว่า การใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลร่วมกับการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ส่งผลให้ความเรียบของแผ่นทดสอบที่ได้มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลส่งผลให้ปริมาณเส้นใยที่มีความโค้งและหักงอมีมากขึ้น แม้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กจะมากขึ้นด้วยก็ตาม เมื่อนำมาเยื่อที่ได้มากขึ้นเป็นแผ่นทดสอบ อาจส่งผลให้การแนบชิดกันของแผ่นทดสอบไม่ดีเท่าที่ควร ความเรียบของแผ่นทดสอบจึงลดลง และผลจากการวิเคราะห์สถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-25 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การผลิตเยื่อกราฟต์แบบดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลมีผลต่อความเรียบของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $1.52E-23$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

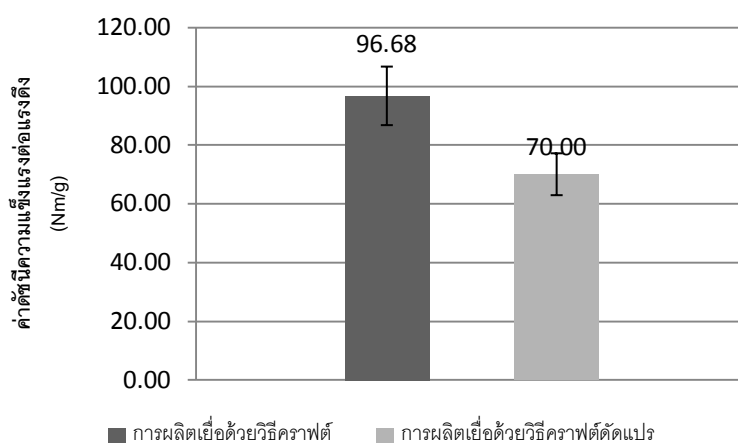


ภาพที่ 4-26 ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

4.5.7 สมบัติเชิงกล

4.5.7.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

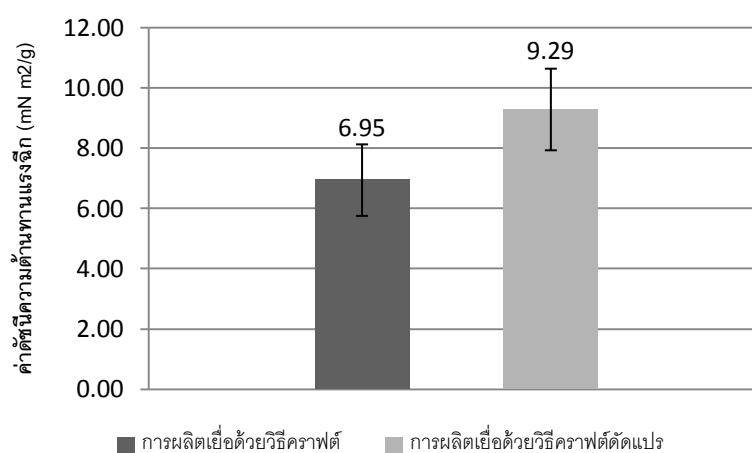
จากภาพที่ 4-27 พบว่า การใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลร่วมกับการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ได้มีแนวโน้มลดลง ทั้งๆที่ คัปานัมเบอร์ลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแม้การใส่แอนทราควิโนนและเมทานอลทำให้สามารถกำจัดลิกนินออกจากเส้นใยได้มาก หากแต่ยังส่งผลให้เส้นใยโค้งงอและหักงอมากขึ้น จึงอาจส่งผลให้เกิดพันธะระหว่างเส้นใยลดลง นอกจากนี้การใช้เมทานอลส่งผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง เนื่องจากความหนืดของเยื่อลดลง [11] จึงอาจทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลงได้ ในขณะที่การใช้แอนทราควิโนนแม้ทำให้ปกป้องคาร์โบไฮเดรตจากปฏิกิริยาฟูลลิงได้ แต่อาจไม่สามารถชดเชยกับความแข็งแรงของเส้นใยที่สูญเสียไปจากการใช้เมทานอลได้ โคนรวมแล้วการที่ความแข็งแรงของเส้นใยและพันธะระหว่างเส้นใยลดลง จึงอาจมีผลทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-25 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การผลิตเยื่อคราฟต์แบบดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลมีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $2.45E-07$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}



ภาพที่ 4-27 ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีคราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอล ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

4.5.7.2 ความต้านทานแรงฉีก

จากภาพที่ 4-28 การใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลร่วมกับการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ส่งผลให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลทำให้ปฏิกิริยาการกำจัดลิกนินเกิดได้ดีขึ้น โดยแอนทราควิโนนช่วยปกป้องคาร์โบไฮเดรตจากปฏิกิริยาฟูลลิงได้ เส้นใยที่ได้จึงมีความแข็งแรง ความยาวเฉลี่ยของเส้นใยเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลยังส่งผลให้ความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยเพิ่มขึ้น เมื่อเส้นใยเหล่านี้มาสร้างพันธะกันจะทำให้มีพื้นที่ถ่ายเทแรง (stress area) เมื่อระบบได้รับแรงมากกระทำ พันธะในบริเวณนี้จะถูกทำลายก่อนที่เส้นใยจะขาด การที่จะทำลายความแข็งแรงของเส้นใยจึงต้องใช้แรงมากขึ้น [34] เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์สถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-25 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การผลิตเยื่อกราฟต์แบบดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลมีผลต่อความต้านทานแรงฉีกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0002 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

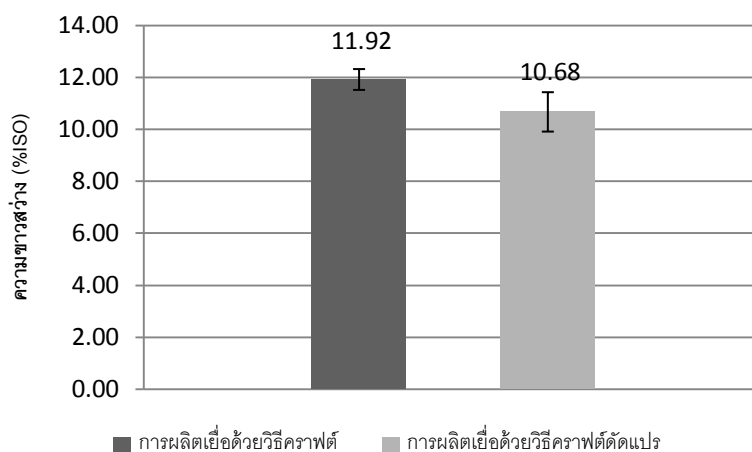


ภาพที่ 4-28 ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอล ต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

4.5.8 สมบัติเชิงแสง

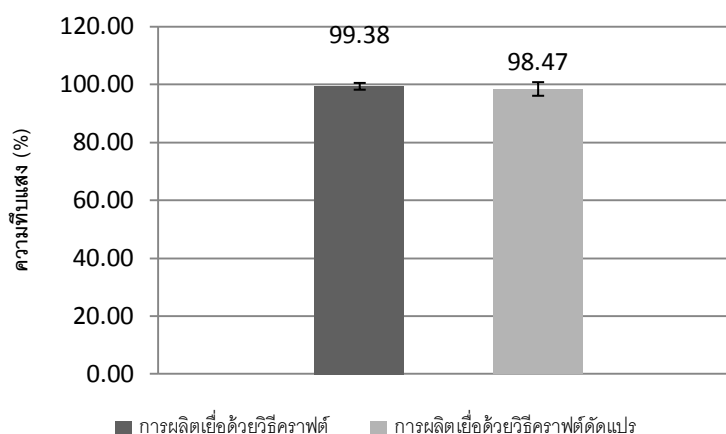
4.5.8.1 ความขาวสว่าง

จากภาพที่ 4-29 พบว่า การใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลส่งผลให้ความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วยมีแนวโน้มลดลง ทั้งๆ ที่ค่าคัปปานัมเบอร์ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณลิกนินในเยื่อมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการที่เส้นใยมีการโค้งงอและหักงอมากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวในการกระเจิงแสงลดลง ความขาวสว่างจึงลดลง และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-25 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การผลิตเยื่อกราฟต์แบบดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลมีผลต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $1.13E-06$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}



ภาพที่ 4-29 ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

4.5.8.2 ความทึบแสง



ภาพที่ 4-30 ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยือกกล้วย

จากภาพที่ 4-30 การใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลส่งผลต่อค่าความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตได้จากเยือกกล้วยค่อนข้างน้อย แม้การใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลจะส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้นก็ตาม และจากการวิเคราะห์สถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-25 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า การผลิตเยื่อกราฟต์แบบดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลมีผลต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.1141 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

ตารางที่ 4-25 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลต่อสมบัติของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยือกกล้วย

สมบัติของแผ่นทดสอบ	P-value	F_{cal}	F_{crit}
ความหนาแน่นปรากฏ	3.12E-09*	89.9973	4.3009
ความเรียบ	1.52E-23*	2199.3590	4.3009
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	2.45E-07*	53.7070	4.3009
ดัชนีความต้านทานแรงฉีก	0.0002*	19.5697	4.3009
ความขาวสว่าง	1.13E-06*	44.0301	4.3009
ความทึบแสง	0.1141	2.7073	4.3009

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

4.6 การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีต่างๆ

ผลการทดลองในส่วนนี้เป็นการนำผลการทดลองที่ได้จากการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยแบบต่างๆ อันได้แก่ การผลิตเยื่อโซดาที่เหมาะสม การผลิตเยื่อคราฟต์ที่เหมาะสม การผลิตเยื่อคราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนที่เหมาะสม การผลิตเยื่อคราฟต์ดัดแปรโดยใช้เมทานอลที่เหมาะสม และการผลิตเยื่อคราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลที่เหมาะสม มาเปรียบเทียบกัน เพื่อดูว่าการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีต่างๆ นั้นส่งผลต่อสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบที่ได้ อย่างไร

4.6.1 ผลผลิตเยื่อ

จากตารางที่ 4-26 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลของชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ จากต้นกล้วยต่อสมบัติของเยื่อที่ผลิตได้ พบว่า การต้มเยื่อด้วยวิธีคราฟต์ดัดแปรโดยใช้คราฟต์ร่วมกับแอนทราควิโนน (AQ) หรือร่วมกับเมทานอลให้ผลผลิตเยื่อที่สูงที่สุด อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-27 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า ชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อผลผลิตเยื่อ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0879 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}

ตารางที่ 4-26 ผลของชนิดการผลิตเยื่อต่อสมบัติของเยื่อกล้วย

ชนิดการผลิตเยื่อ	ผลผลิตเยื่อ (%)	สภาพระบายได้ (ml)	คัปปานัมเบอร์	ปริมาณต่างที่เหลือ (g/l)
Soda	35.78 ± 2.18	179.40 ± 9.97	35.56 ± 1.09	0 ± 0
Kraft	31.89 ± 0.52	245.28 ± 28.34	41.38 ± 1.54	2.57 ± 0.13
Kraft-AQ	37.22 ± 0.16	141.50 ± 47.50	35.50 ± 0.63	4.55 ± 0.25
Kraft-methanol	37.96 ± 1.55	127.75 ± 1.79	35.85 ± 0.74	3.05 ± 0.41
Kraft-AQ-methanol	34.60 ± 2.76	140.00 ± 20.25	34.24 ± 0.66	3.75 ± 0.64

ตารางที่ 4-27 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของชนิดการผลิตเยื่อต่อสมบัติของเยื่อกล้วย

สมบัติของเยื่อ	P-value	F _{cal}	F _{crit}
ผลผลิตเยื่อ**	0.0879	3.7980	5.1922
สภาพระบายได้	0.0001*	11.9562	3.0556
ค่าปทานัมเบอร์	3.78E-07*	31.6157	3.0556
ปริมาณต่างที่เหลือ	3.99E-11*	117.2818	3.0556

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

** คือ ทดลอง 2 ครั้ง (1 ครั้ง/replicate) ส่วนสมบัติอื่นทดลอง 4 ครั้ง (2 ครั้ง/replicate)

4.6.2 สภาพระบายได้

จากตารางที่ 4-26 จะเห็นได้ว่าการผลิตเยื่อวิธีคราฟต์ดัดแปรให้ค่าสภาพระบายได้ต่ำกว่าการผลิตเยื่อแบบคราฟต์และโซดา โดยการให้เมทานอลร่วมกับการผลิตเยื่อแบบคราฟต์จะให้ค่าสภาพระบายได้ต่ำสุด เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-27 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า ชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อสภาพระบายได้ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.0001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.6.3 ค่าปทานัมเบอร์

จากตารางที่ 4-26 จะเห็นได้ว่าการต้มเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ให้ค่าค่าปทานัมเบอร์สูงสุดโดยสูงกว่าโซดา ซึ่งเป็นที่รู้โดยทั่วไปว่าเยื่อคราฟต์ค่อนข้างให้ความแข็งแรงสูงแต่เยื่อที่ผลิตได้มีความคล้าสูง [5] การดัดแปรเยื่อคราฟต์โดยการให้แอนทราควิโนน และ/หรือ เมทานอลส่งผลให้ค่าค่าปทานัมเบอร์ลดลงอย่างมาก โดยการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปรร่วมกับเมทานอลและแอนทราควิโนน ให้ค่าปทานัมเบอร์ต่ำสุด คือ 34.24 ± 0.66 และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-27 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า ชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าปทานัมเบอร์ของเยื่อ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 3.78E-07 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.6.4 ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อ

จากตารางที่ 4-26 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตเยื่อด้วยแบบไฮดาแล้ว การผลิตเยื่อคราฟต์ให้ปริมาณต่างที่เหลือในเยื่อมากกว่า และหากการผลิตเยื่อคราฟต์มีการใช้แอนทราควิโนน และ/หรือ เมทานอลร่วมด้วยจะยิ่งทำให้ปริมาณต่างที่เหลือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการผลิตเยื่อแบบคราฟต์โดยใช้แอนทราควิโนนร่วมด้วย จะให้ปริมาณต่างที่เหลืออยู่หลังจากต้มเยื่อสูงสุดคือ 4.55 ± 0.25 g/l ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor ดังแสดงในตารางที่ 4-27 พบว่าชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ส่งผลต่อปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $3.99E-11$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.6.5 องค์ประกอบเคมีของเยื่อ

จากตารางที่ 4-28 ซึ่งแสดงผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ แอลฟาเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ของเยื่อ พบว่าการผลิตเยื่อด้วยวิธีคราฟต์ดัดแปรโดยใช้เมทานอลและแอนทราควิโนน ให้ปริมาณร้อยละของลิกนินที่อยู่ในเยื่อน้อยที่สุดคือ ร้อยละ 6.29 ± 0.06 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยมีค่าน้อยกว่าการผลิตเยื่อแบบคราฟต์และการผลิตเยื่อแบบไฮดา ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากการใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลทำให้ปฏิกิริยากำจัดลิกนินมีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าการต้มเยื่อด้วยวิธีคราฟต์ปกติ สำหรับในส่วนของคาร์บอไฮเดรตของเส้นใยนั้นพบว่าการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปรมีแนวโน้มให้ค่าแอลฟาเซลลูโลสสูงกว่าการผลิตเยื่อแบบคราฟต์และแบบไฮดา โดยการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ร่วมกับแอนทราควิโนนและเมทานอลให้ค่าแอลฟาเซลลูโลสที่มีอยู่มากที่สุดคือ ร้อยละ 65.87 ± 0.04 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แม้การใช้คราฟต์ร่วมกับเมทานอลเพียงอย่างเดียวอาจส่งผลให้แอลฟาเซลลูโลสลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับคราฟต์ดัดแปรอื่นๆ ทั้งนี้เป็นเพราะเมทานอลมีผลทำให้ความหนืดของเยื่อลดลง นั่นคือ ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสลดลง แต่เมื่อนำมาใช้ร่วมกับแอนทราควิโนนในการผลิตเยื่อแบบคราฟต์แล้ว เมทานอลอาจทำให้แอนทราควิโนนทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากเมทานอลจะช่วยให้สารเคมีซึมเข้าสู่ชั้นต้นกัลสยแห้งได้มากขึ้น จึงอาจส่งผลให้แอนทราควิโนนป้องกันการทำลายคาร์บอไฮเดรตได้มากขึ้น ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแทน

ตารางที่ 4-28 ผลของชนิดการผลิตเยื่อต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อกล้วย

ชนิดการผลิตเยื่อ	ลิกนิน (%)	แอลฟาเซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)
Soda	8.62 ± 0.11	63.00 ± 0.05	15.79 ± 0.17
Kraft	7.81 ± 0.2	64.45 ± 0.12	15.79 ± 0.21
Kraft-AQ	6.91 ± 0.04	64.80 ± 0.16	14.92 ± 0.07
Kraft-methanol	7.50 ± 0.04	64.48 ± 0.08	14.90 ± 0.02
Kraft-AQ-methanol	6.29 ± 0.06	65.87 ± 0.04	14.72 ± 0.01

ตารางที่ 4-29 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของชนิดการผลิตเยื่อต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อกล้วย

องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ	P-value	F _{cal}	F _{crit}
ลิกนิน	2.73E-05*	136.3930	5.1922
แอลฟาเซลลูโลส	9.25E-06*	211.2640	5.1922
เฮมิเซลลูโลส	0.0008*	34.3748	5.1922

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-value ≤ 0.05 และ F_{cal} > F_{crit})

สำหรับเฮมิเซลลูโลสนั้นพบว่าการผลิตเยื่อกราฟต์แบบดัดแปรส่งผลให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสต่ำกว่าการผลิตเยื่อแบบกราฟต์และแบบโซดา โดยการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ร่วมกับแอนทราควิโนนให้ค่าเฮมิเซลลูโลสที่มีอยู่สูงสุด คือ ร้อยละ 14.92 ± 0.07 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แต่ค่าที่ได้ไม่แตกต่างจากการผลิตเยื่อกราฟต์ดัดแปรอื่นๆ เท่าไรนัก ส่วนผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-29 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่าชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ส่งผลต่อองค์ประกอบเคมีต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value ของลิกนิน แอลฟาเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส มีค่าเท่ากับ 2.73E-05, 9.25E-06 และ 0.0008 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.6.5 สันฐานวิทยาของเส้นใย

4.6.5.1 ความยาวของเส้นใย

จากตารางที่ 4-30 พบว่า การผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์และวิธีโซดา ให้ค่าความยาวของเส้นใยไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่การผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนทำให้ความยาวของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยให้ค่าสูงสุดคือ 3.95 ± 0.07 mm ส่วนการใช้เมทานอลร่วมกับการผลิตเยื่อแบบคราฟต์มีแนวโน้มทำให้ความยาวของเส้นใยลดลง ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-31 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่าชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ มีผลต่อความยาวของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $2.51E-05$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.6.5.2 ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

จากตารางที่ 4-30 พบว่า การผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ให้ค่าปริมาณเส้นใยขนาดเล็กต่ำสุด การดัดแปรการผลิตเยื่อคราฟต์ด้วยแอนทราควิโนน รวมถึงเมทานอลส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา โดยการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปรร่วมกับเมทานอลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กสูงสุด คือร้อยละ 69.58 ± 1.74 ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-31 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่าชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ มีผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $8.97E-11$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.6.5.3 ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใย

จากตารางที่ 4-30 พบว่าการต้มเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีโซดาให้ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยสูงสุด คือ 0.26 ± 0.01 และ 2.05 ± 0.03 ตามลำดับ ในขณะที่การผลิตเยื่อแบบคราฟต์ให้ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยต่ำสุด คือ 0.15 ± 0.01 และ 1.00 ± 0.04 ตามลำดับ การผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปรส่งผลให้ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อคราฟต์ ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-31 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่าชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ มีผลต่อดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $1.70E-06$ และ $2.99E-10$ ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

ตารางที่ 4-30 ผลของชนิดการผลิตเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยื่อกล้วย

	ชนิดการผลิตเยื่อ				
	Soda	Kraft	Kraft-AQ	Kraft-methanol	Kraft-AQ-methanol
ความยาวเส้นใยแบบ LWW (mm \pm SD)	3.85 \pm 0.07	3.87 \pm 0.09	3.95 \pm 0.07	3.59 \pm 0.06	3.66 \pm 0.07
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (% \pm SD)	69.26 \pm 1.08	53.45 \pm 1.45	67.75 \pm 1.01	69.58 \pm 1.74	66.26 \pm 1.16
ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (value \pm SD)	0.26 \pm 0.01	0.15 \pm 0.01	0.20 \pm 0.02	0.23 \pm 0.03	0.20 \pm 0.01
ดัชนีความหักงอของเส้นใย (value \pm SD)	2.05 \pm 0.03	1.00 \pm 0.04	1.58 \pm 0.01	1.56 \pm 0.13	1.42 \pm 0.11
ความกว้างของเส้นใย (μ m \pm SD)	21.08 \pm 0.46	22.38 \pm 0.19	20.75 \pm 0.29	20.50 \pm 0.27	20.40 \pm 0.12

ตารางที่ 4-31 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของชนิดการผลิตเยื่อต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยื่อกล้วย

สัณฐานวิทยาของเส้นใย	P-value	F_{cal}	F_{crit}
ความยาวเส้นใยแบบ LWW	2.51E-05*	16.2424	3.0556
ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก	8.97E-11*	104.8463	3.0556
ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย	1.70E-06*	25.0998	3.0556
ดัชนีความหักงอของเส้นใย	2.99E-10*	88.6714	3.0556
ความกว้างของเส้นใย	4.86E-07*	30.4358	3.0556

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

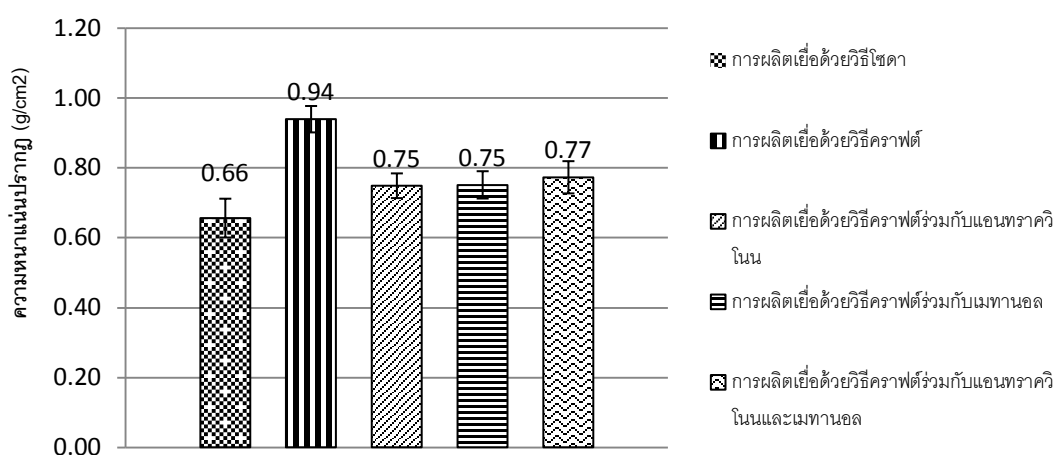
4.6.5.4 ความกว้างของเส้นใย

จากตารางที่ 4-30 พบว่าการต้มเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ให้ความกว้างของเส้นใยสูงสุด คือ $22.38 \pm 0.19 \mu\text{m}$ โดยการผลิตเยื่อคราฟต์แบบดัดแปรส่งผลให้ความกว้างของเส้นใยลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับการผลิตเยื่อแบบโซดา ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-31 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่าชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ มีผลต่อความกว้างของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $4.86\text{E}-07$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.6.6 สมบัติทางโครงสร้าง

4.6.6.1 ความหนาแน่นปรากฏ

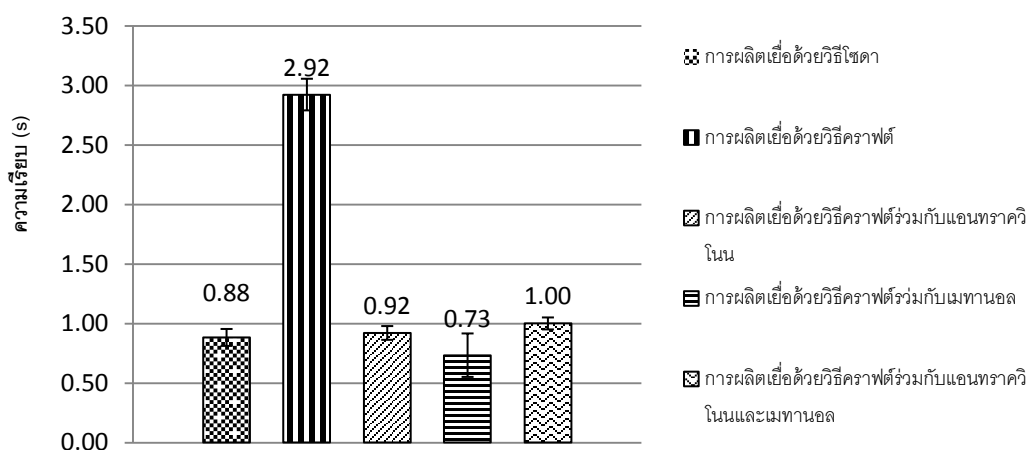
จากภาพที่ 4-31 พบว่าการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ให้ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบสูงสุดคือ $0.94 \pm 0.04 \text{ g/cm}^3$ ในขณะที่การผลิตเยื่อคราฟต์แบบดัดแปรให้ค่าความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบต่ำกว่าคราฟต์แต่สูงกว่าโซดา และผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-32 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า ชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ มีผลต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $2.77\text{E}-20$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}



ภาพที่ 4-31 ผลของชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ต่อความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

4.6.6.2 ความเรียบ

จากภาพที่ 4-32 พบว่าการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ให้ความเรียบของแผ่นทดสอบสูงสุด คือ 2.92 ± 0.13 s ในขณะที่การผลิตเยื่อคราฟต์แบบดัดแปรีผลต่อความเรียบไม่แตกต่างจากในกรณีของการผลิตเยื่อแบบโซดาเท่าไรนัก ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-32 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า ชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ มีผลต่อความเรียบของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $3.15E-48$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

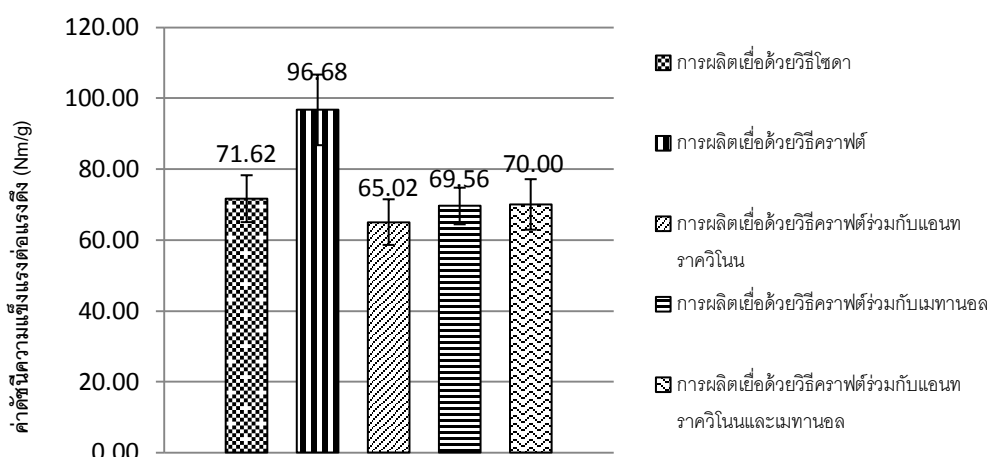


ภาพที่ 4-32 ผลของชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ต่อความเรียบของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

4.6.7 สมบัติเชิงกล

4.6.7.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

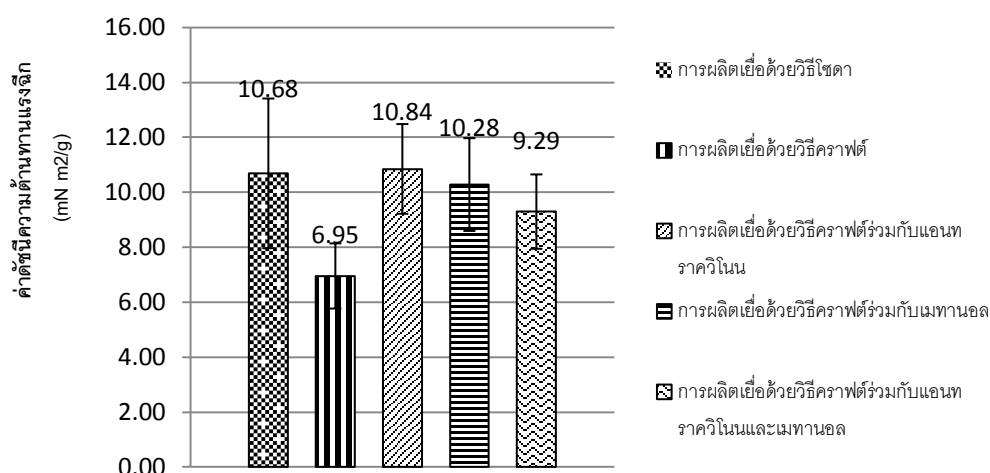
จากภาพที่ 4-33 พบว่าการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบสูงสุดคือ 96.68 ± 9.96 Nm/g ในขณะที่การผลิตเยื่อคราฟต์แบบดัดแปรส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าลดลงโดยค่าที่ได้ยังน้อยกว่าการผลิตเยื่อแบบโซดา เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-32 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่าชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ มีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $1.95E-14$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}



ภาพที่ 4-33 ผลของชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

4.6.7.2 ความต้านทานแรงฉีก

จากภาพที่ 4-34 พบว่า การผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกต่ำสุด การใช้วิธีการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปรส่งผลให้ความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับการผลิตเยื่อแบบไซดา เมื่อเปรียบเทียบการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปรด้วยตัวเองแล้วพบว่า การผลิตเยื่อคราฟต์ดัดแปรร่วมกับแอนทราควิโนนให้ค่าดัชนีความต้านทานฉีกของแผ่นทดสอบสูงสุดคือ $6.95 \pm 1.19 \text{ mN m}^2/\text{g}$ ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-32 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่า ชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ มีผลต่อความต้านทานแรงฉีกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 1.18×10^{-5} ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}



ภาพที่ 4-34 ผลของชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงดึงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

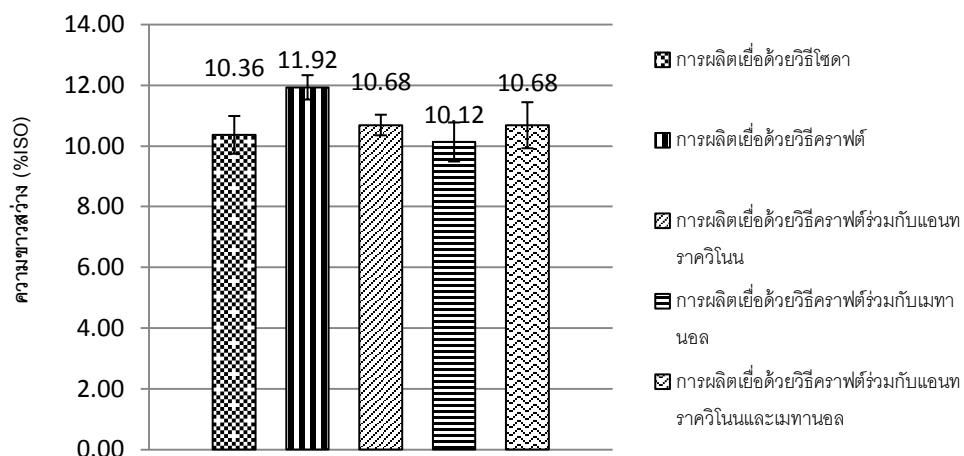
4.6.8 สมบัติเชิงแสง

4.6.8.1 ความขาวสว่าง

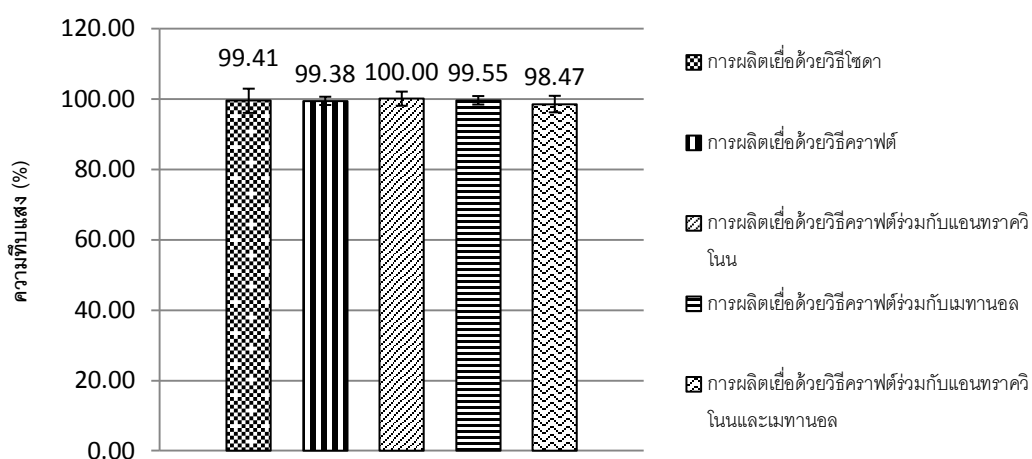
จากภาพที่ 4-35 การผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ให้ความขาวสว่างของแผ่นทดสอบสูงสุดคือ 11.92 ± 0.15 %ISO ในขณะที่การผลิตเยื่อคราฟต์แบบดัดแปรให้ค่าความขาวสว่างไม่แตกต่างจากการผลิตเยื่อแบบไซตาเท่าไรนัก ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-32 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่าชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ มีผลต่อความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ $6.03E-14$ ซึ่งน้อยกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่ามากกว่า F_{crit}

4.6.8.2 ความทึบแสง

จากภาพที่ 4-36 การผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ แบบไม่ทำให้ค่าความทึบแสงแตกต่างกันเท่าไรนัก จากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-32 โดยใช้วิธี ANOVA แบบ single factor พบว่าชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความทึบแสง เนื่องจาก P-value มีค่าเท่ากับ 0.3070 ซึ่งมากกว่า 0.05 และค่า F_{cal} ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า F_{crit}



ภาพที่ 4-35 ผลของชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย



ภาพที่ 4-36 ผลของชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ ต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

ตารางที่ 4-32 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของชนิดการผลิตเยื่อต่อสมบัติของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อกล้วย

สมบัติของแผ่นทดสอบ	P-value	F _{cal}	F _{crit}
ความหนาแน่นปรากฏ	2.77E-20*	65.5884	2.5397
ความเรียบ	3.15E-48*	814.7227	2.5397
ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	1.95E-14*	34.6290	2.5397
ดัชนีความต้านทานแรงฉีก	1.18E-05*	8.9773	2.5397
ความขาวสว่าง	6.03E-14*	32.6590	2.5397
ความทึบแสง	0.3070	1.2345	2.5397

หมายเหตุ * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

งานวิจัยนี้ยังมีการนำกระดาษคราฟต์ทางการค้าชนิด KP ที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 150 g/m² มาทำการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงและความต้านแรงฉีก พบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ได้จากแนวขนานเครื่อง (machine direction, MD) คือ 47.64 Nm/g และแนวขวางเครื่อง (cross direction, CD) คือ 15.29 Nm/g ส่วนค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกที่ได้ จากแนวขนานเครื่อง (machine direction, MD) คือ 8.49 mN m²/g และแนวขวางเครื่อง (cross direction, CD) คือ 10.53 mN m²/g ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกระดาษที่ผลิตจากต้นกล้วยพบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากต้นกล้วยด้วยวิธีต่างๆ มีค่ามากกว่ากระดาษคราฟต์ทางการค้า ส่วนค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก พบว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นกล้วยด้วยวิธีไฮโดรคราฟต์ร่วมกับแอนทราควิโนน และคราฟต์ร่วมกับเมทานอล มีค่ามากกว่ากระดาษคราฟต์ทางการค้า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลจากการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีโซดา

จากการนำเอาต้นกล้วยมาศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อแบบโซดา พบว่าการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลผลิตเยื่อ คีปปานัมเบอร์ และปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีแนวโน้มลดลง แต่ค่าสภาพระบายได้ ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อ ความยาวเส้นใย ความหนาแน่นปรากฏ ความเรียบ ความขาวสว่าง และค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อความทึบแสง และในส่วนของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงนั้นจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและจะลดลงเมื่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น

ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับร้อยละ 15 ของน้ำหนักกล้วยแห้งเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลองต่อไป เนื่องจากให้คีปปานัมเบอร์ต่ำที่สุดและให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุด

5.1.2 ผลจากการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์

จากการนำเอาต้นกล้วยมาศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ พบว่าเมื่อค่าซัลไฟต์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลผลิตของเยื่อ ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง ค่าความทึบแสงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วนค่าสภาพระบายได้ ความหนาแน่นปรากฏ ความเรียบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ความขาวสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตามค่าซัลไฟต์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าคีปปานัมเบอร์ ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อ รวมถึงดัชนีความต้านทานแรงฉีกในทิศทางที่ไม่แน่นอน และไม่ส่งผลต่อความยาวของเส้นใยและปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ในขณะที่ทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นในช่วงแรกก่อนที่จะลดลง

ค่าร้อยละซัลไฟต์ที่เหมาะสมต่อการผลิตเยื่อแบบคราฟต์จากต้นกล้วย คือ ค่าซัลไฟต์ร้อยละ 25 เนื่องจากให้ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความหนาแน่น ความเรียบ และความขาวสว่างสูงสุด ขณะที่ปริมาณผลผลิตก็อยู่ในระดับไม่น้อยจนเกินไป

5.1.3 ผลจากการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีคราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนน

จากการนำเอาต้นกล้วยมาศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนน พบว่าการใช้แอนทราควิโนนส่งผลให้ผลผลิตเยื่อและปริมาณต่างที่

เหลือหลังการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น ส่วนความยาวของเส้นใยและปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการใช้ปริมาณแอนทราควิโนนมากขึ้นยังส่งผลให้ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใย รวมถึงดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้แอนทราควิโนน ส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้ ค่าป่านัมเบอร์ ความหนาแน่นปรากฏ ความเรียบ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง และความขาวสว่างมีแนวโน้มลดลง หากแต่มีผลต่อความทึบแสงค่อนข้างน้อย

ปริมาณแอนทราควิโนนที่เหมาะสมต่อการผลิตเยื่อแบบกราฟต์แบบดัดแปรร่วมกับแอนทราควิโนน คือ ปริมาณแอนทราควิโนนร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักกล้วยแห้ง เนื่องจากให้ผลผลิตเยื่อและความต้านทานแรงฉีกสูงที่สุด แต่ให้ค่าป่านัมเบอร์ต่ำสุด

5.1.4 ผลจากการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรโดยใช้เมทานอล

จากการนำเอาต้นกล้วยมาศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ดัดแปรโดยใช้เมทานอลพบว่า ผลที่ได้ไปในทิศทางเดียวกับการใช้แอนทราควิโนน ยกเว้นในกรณีของความยาวของเส้นใย ซึ่งพบว่าการใช้เมทานอลส่งผลให้ความยาวของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง ซึ่งตรงข้ามกับที่พบในกรณีที่ใช้แอนทราควิโนน

5.1.5 ผลจากการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอล

จากการนำเอาต้นกล้วยมาศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลร่วมกันพบว่า ผลที่ได้ค่อนข้างสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกับการใช้เมทานอลอย่างเดียว

5.1.6 ผลจากการศึกษาเปรียบเทียบการผลิตเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีต่างๆ

จากการเปรียบเทียบผลของชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ จากสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบที่ผลิตได้ พบว่า การต้มเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรโดยใช้กราฟต์ร่วมกับแอนทราควิโนนหรือร่วมกับเมทานอลให้ผลผลิตเยื่อและปริมาณต่างที่เหลือหลังการต้มเยื่อสูงกว่า หากแต่ให้ค่าสภาพระบายได้ต่ำกว่าการผลิตเยื่อแบบกราฟต์และไซตา โดยการใช้เมทานอลร่วมกับการผลิตเยื่อแบบกราฟต์จะให้ค่าสภาพระบายได้ต่ำสุด การผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ให้ค่าป่านัมเบอร์สูงสุดโดยสูงกว่าไซตา อย่างไรก็ตามการดัดแปรเยื่อกราฟต์โดยการใช้แอนทราควิโนน และ/หรือ เมทานอล

ส่งผลให้ค่าค้ำปานัมเบอร์ลดลงอย่างมาก โดยการผลิตเยื่อแบบกราฟต์โดยใช้แอนทราควิโนนร่วมด้วยจะให้ปริมาณต่างที่เหลือน้อยหลังจากต้มเยื่อสูงสุด

การผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ดัดแปรโดยใช้เมทานอลและแอนทราควิโนน ให้ปริมาณร้อยละของลิกนินที่อยู่ในเยื่อน้อยที่สุด การผลิตเยื่อแบบกราฟต์ดัดแปรมีแนวโน้มให้ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสสูงกว่าการผลิตเยื่อแบบกราฟต์และแบบโซดา แต่ให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสต่ำกว่า โดยการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ร่วมกับแอนทราควิโนนและเมทานอลให้ค่าปริมาณแอลฟาเซลลูโลสสูงสุด ส่วนการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ร่วมกับแอนทราควิโนนให้ค่าปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูงสุดเมื่อเทียบกับการผลิตแบบกราฟต์ดัดแปรด้วยกัน

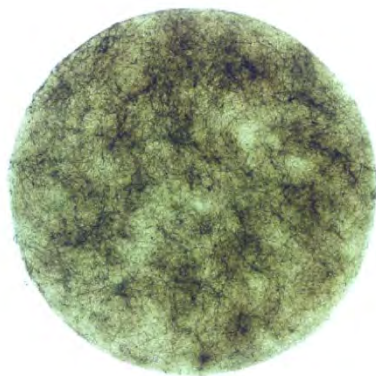
การผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์และวิธีโซดาให้ค่าความยาวของเส้นใยไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่การผลิตเยื่อแบบกราฟต์ดัดแปรโดยใช้แอนทราควิโนนทำให้ความยาวของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนการใช้เมทานอลร่วมกับการผลิตเยื่อแบบกราฟต์กลับทำให้ความยาวของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง การผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ให้ค่าปริมาณเส้นใยขนาดเล็กต่ำสุด การดัดแปรการผลิตเยื่อกราฟต์ด้วยแอนทราควิโนนรวมถึงเมทานอลส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา โดยการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ดัดแปรร่วมกับเมทานอลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กสูงสุด การต้มเยื่อจากต้นกล้วยด้วยวิธีโซดาให้ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยสูงสุด ในขณะที่การผลิตเยื่อแบบกราฟต์ให้ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยต่ำสุด โดยการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ดัดแปรส่งผลให้ดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใยเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อกราฟต์

การผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ให้ความหนาแน่นปรากฏ ความเรียบ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง และความขาวสว่างสูงสุด ในขณะที่การผลิตเยื่อกราฟต์แบบดัดแปรให้ค่าความหนาแน่นปรากฏต่ำกว่ากราฟต์แต่สูงกว่าโซดา แต่ให้ความเรียบและความขาวสว่างไม่แตกต่างจากในกรณีของการผลิตเยื่อแบบโซดา รวมถึงส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าลดลงโดยค่าที่ได้ยังน้อยกว่าการผลิตเยื่อแบบโซดา การผลิตเยื่อด้วยวิธีกราฟต์ให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกต่ำสุด และการผลิตเยื่อแบบกราฟต์ดัดแปรส่งผลให้ค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกเพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับการผลิตเยื่อแบบโซดา อย่างไรก็ตามชนิดการผลิตเยื่อแบบต่างๆ แทบไม่ส่งผลต่อความทึบแสง

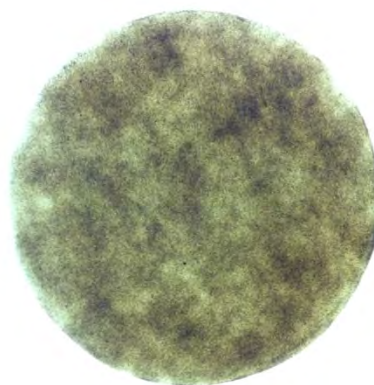
5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากการสังเกตเยื่อจากต้นกล้วยที่ผลิตได้พบว่าเส้นใยค่อนข้างมีความยาวหลากหลาย โดยมีส่วนที่เป็นเส้นใยยาวมาก จนทำให้แผ่นทดสอบที่ผลิตได้มีการกระจายตัวของเส้นใยไม่ดี ดังแสดงในภาพที่ 5-1 นอกจากนี้เยื่อกล้วยยังมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กๆ อยู่เป็นจำนวนมาก การมี

เส้นใยขนาดเล็กๆ มากเกินไป อาจส่งผลทำให้การผลิตแผ่นกระดาษต้องใช้เวลาานาน เนื่องจากเยื่อ
 ระบายน้ำได้ช้า ดังนั้นการนำเยื่อกล้วยไปใช้งานจริงควรทำการคัดแยกเยื่อตามขนาดของเส้นใย
 เสียก่อน จากนั้นหากจะนำเฉพาะเส้นใยยาวของเยื่อกล้วยไปใช้งานควรทำการบดเยื่อก่อน เพื่อให้
 แผ่นกระดาษที่ผลิตได้มีการกระจายตัวของเส้นใยสม่ำเสมอ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 5-1 การกระจายตัวของเส้นใยภายในแผ่นทดสอบที่ผลิตจาก
 เยื่อกล้วยที่ไม่ผ่านการบด (ก) และเยื่อกล้วยที่ผ่านการบด (ข)

5.2.2 ค่าซัลฟิเต้และปริมาณแอนทราควิโนนที่ศึกษานั้น อาจต้องมีการศึกษาครอบคลุม
 ในช่วงที่กว้างกว่านี้ เนื่องจากผลการทดลองที่ได้ในบางคุณสมบัติยังไม่เห็นความแตกต่างกันมาก
 นัก

รายการอ้างอิง

- [1] Cordeiro, N., Belgacem, M.N., Torres, I.C., and Moura, J.C.V.P. Chemical Composition and Pulping of Banana Pseudo-Stems. Industrial Crops and Products, 19(2), 2003: 147–154.
- [2] James, P., Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology. A wiley-interscience publication, 3(1), 1980: 125
- [3] Capretti G., Suitability of nonwood fibres for fibres for the paper industry, [Online] Available from: <http://www.ienica.net/italyseminar/fibres/capretti.pdf>, [2011, August 17]
- [4] Smook, G.A. Handbook for Pulp & Paper technologists. 2nd edition. Vancouver: Angus Wilde, 1994.
- [5] Gullichsen, J. and Paulapuro, H. Papermaking Science and Technology : Chemical Pulping Book 6A. Jyväskylä: Gummerus Printing, 2000
- [6] Roberts, J.C. The Chemistry of Paper. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1996.
- [7] Anthraquinone, [Online] Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Anthraquinone>, [2010, December 11]
- [8] Methanol, [Online] Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Methanol>, [2010, December 11]
- [9] Muurinen. E., Organosolv Pulping: A Review and Distillation Study Related to Peroxy Acid Pulping, Academic Dissertation, Faculty of Technology, University of Oulu, 2000.
- [10] Akgül, M., and Tozluoglu, A., A Comparison of Soda and Soda-AQ Pulps from Cotton Stalks, African Journal of Biotechnology, 8 (22), 2009: 6127-6133.
- [11] Norman, L., Olm, L., and Teder, E., Methanol Re-inforced Karft Pulping, TAPPI Journal, 76 (3), 1993:125-130.
- [12] ISO 16065-2, Pulps. Determination of fibre length by automated optical analysis. Unpolarized light method, International Organization for Standardization, Switzerland, 2007.

- [13] TAPPI. TAPPI Test Methods. Atlanta: TAPPI Press, 2002.
- [14] TAPPI T 479 cm-99, Smoothness of Paper (Bekk Method), TAPPI Test Methods. TAPPI Press, Atlanta, GA, 2002.
- [15] T 494 om-01, Tensile Properties of Paper and Paperboard (Using Constant Rate of Elongation Apparatus), TAPPI Test Methods, TAPPI Press, Atlanta, 2002.
- [16] T 414 om-98, Internal Tearing Resistance of Paper (Elmendorf-Type Method), TAPPI Test Methods, TAPPI Press, Atlanta, 2002.
- [17] Scott , W.E.Properties of Paper, An Introduction. Atlanta: Tappi press, 2000.
- [18] T 525 om-02, Diffuse brightness of pulp ($d/0$). TAPPI Test Methods, TAPPI Press, Atlanta, 2002.
- [19] T 519 om-02, Diffuse Opacity of Paper ($d/0^\circ$ Paper Backing), TAPPI Test Methods, TAPPI Press, Atlanta, 2002.
- [20] บุญจมาศ ศิลาชัย. กล้วย. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2543.
- [21] ทวีเกียรติ ยิ้มสวัสดิ์. กล้วย. ขอนแก่น : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2527.
- [22] เมทินี ปิ่งสว่างวงศ์ และ ตติณห์ ทงประดับ, การผลิตเยื่อกระดาษจากกล้วย. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [23] Minja, R.J.A., Christensen, P.K., and Moe, S.T., Extended Delignification of Kraft Pulping by Anthraquinone, Methanol and Black Liquor, 1996 Pulping Conference Proceedings, Nashville, TN, October 27-31, 1996.
- [24] T 258 om-11, Basic density and moisture content of pulpwood, TAPPI Test Methods. TAPPI Press, Atlanta, GA, 2002.
- [25] T 236 om-99, Kappa Number of Pulp, TAPPI Test Methods. TAPPI Press, Atlanta, GA, 2002.
- [26] SCAN-N 33:94, Residual Alkali (Hydroxide Ion Content), Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee, 1994.
- [27] TAPPI T200 sp-06, Laboratory Beating of Pulp (Valley Beater Method), TAPPI Test Methods. TAPPI Press, Atlanta, GA, 2002
- [28] T 277 om-04, Freeness of Pulp (Canadian Standard Method), TAPPI Test Methods. TAPPI Press, Atlanta, GA, 2002:

- [29] ISO 5269-3, Conventional and Rapid-Köthen sheet formers using a closed water system, International Organization for Standardization, Switzerland, 2008.
- [30] TAPPI T222 om-88, Acid-Insoluble Lignin in Wood and Pulp, TAPPI Test Methods. TAPPI Press, Atlanta, GA, 2002.
- [31] Browning, B.L. Method in Wood Chemistry. New York: Interscience Publisher, 1963.
- [32] Ziaie-Shirkolaee, Y., Mohammadi-Rovshandeh * J., Rezayati-Charani, P., and Khajeheian., M.B., Influence of dimethyl formamide pulping of wheat straw on cellulose degradation and comparison with Kraft process, [Online] Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852407006128> , [2011, August 17]
- [33] Biermann, C.J. Essential of Pulping and Papermaking. San Diego: Academic Press, 1993.
- [34] Joutsimo, O., Wathén R., and Tamminen T., Effects of fiber deformations on pulp sheet properties and fiber strength, : 1-13.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ภาพเครื่องมือและอุปกรณ์



ภาพที่ 1 บอมป์ที่ใช้ในการต้มเยื่อ



ภาพที่ 2 เครื่องต้มเยื่อ



ภาพที่ 3 Fiber quality analyzer : FQA



ภาพที่ 4 Canadian Standard Freeness tester (CSF)



ภาพที่ 5 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid-Köthen



ภาพที่ 6 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง



ภาพที่ 7 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก



ภาพที่ 8 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง (Color Touch PC)

ภาคผนวก ข

การคำนวณสารเคมีในการผลิตเยื่อและการเตรียมเยื่อ

1. วิธีการหาความชื้นของชิ้นต้นกล้วยแห้ง

นำชิ้นลำต้นกล้วยแห้งมาทำการชั่งน้ำหนักก่อนอบหลังจากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็นใน desicator หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักหลังอบและนำมาคำนวณหาปริมาณความชื้นของชิ้นต้นกล้วยแห้ง ดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความชื้นของต้นกล้วย (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักต้นกล้วยก่อนอบ} - \text{น้ำหนักต้นกล้วยหลังอบ}}{\text{น้ำหนักต้นกล้วยก่อนอบ}} \times 100$$

2. วิธีการคำนวณสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อ

ยกตัวอย่างของภาวะที่ใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง เดิมโซเดียมซัลไฟด์ตามปริมาณที่คำนวณได้จากค่าซัลไฟด์ร้อยละ 30 ของน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง แอนทราควิโนนร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง และเมทานอลร้อยละ 20 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด กำหนดให้น้ำหนักชิ้นต้นกล้วยทั้งหมดเท่ากับ 166.67 กรัม มีความชื้นร้อยละ 10 และในการต้มเยื่อกำหนดให้มีค่าของเหลวต่อน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง (L: W) เป็น 10 ต่อ 1

2.1 หาน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง จากความชื้นร้อยละ 10

น้ำหนักต้นกล้วย 100 กรัม จะมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ $100 - 10 = 90$ กรัม

ถ้าน้ำหนักต้นกล้วย 166.67 กรัม จะมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ $(166.67 \times 90) / 100 = 150$ กรัม

2.2 หาอัตราส่วนปริมาณของเหลวทั้งหมด จากค่า L: W = 10:1

น้ำหนักต้นกล้วยแห้งที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 150 กรัม ดังนั้นปริมาตรของเหลวทั้งหมดที่ใช้ในการต้มเยื่อคือ $10 \times 150 = 1500$ กรัม

2.3 หาปริมาณสารเคมีที่ต้องเติม

2.3.1 คำนวณปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง

น้ำหนักต้นกล้วยแห้ง 100 กรัมจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 กรัม

ถ้าน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง 150 กรัมจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ

$$(150 \times 15) / 100 = 22.5 \text{ กรัม}$$

แต่เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีการเตรียมไว้ที่ความเข้มข้น 180 กรัมต่อลิตร ดังนั้นจะต้องตวงปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังนี้

โซเดียมไฮดรอกไซด์ 180 กรัมจาก สารละลาย 1000 มิลลิลิตร

ถ้าต้องการโซเดียมไฮดรอกไซด์ 22.5 กรัม ดังนั้นต้องตวงสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ $(22.5 \times 1000) / 180 = 125$ มิลลิลิตร

2.3.2 โซเดียมซัลไฟด์ปริมาณที่คำนวณได้จากค่าซัลฟิดิตีร้อยละ 30

ซัลฟิดิตี (sulfidity) คือ อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซัลไฟด์กับ active alkaline ที่แสดงในรูปของค่าร้อยละ ซึ่งค่าที่ใช้มักจะอยู่ระหว่างร้อยละ 24-28 ซัลฟิดิตีมีส่วนช่วยเพิ่มอัตราการกำจัดลิกนินเนื่องจากไฮโดรซัลไฟด์แอนไอออน (SH^-) ที่จะไปทำปฏิกิริยากับพันธะ β -aryl ether และ methoxy group ในลิกนิน นอกจากนี้ซัลฟิดิตียังมีบทบาทในการช่วยรักษาการสลายของคาร์โบไฮเดรตด้วย [31]

ภาวะในการผลิตเยื่อวิธีโซดาที่เหมาะสมคือ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง

จากสูตร

$$\text{Sulfidity} = \frac{\text{Na}_2\text{S}}{\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}} \quad \text{express as Na}_2\text{O} \quad (1)$$

$$\text{EA} = \text{NaOH} + \frac{1}{2} \text{Na}_2\text{S} \quad \text{express as Na}_2\text{O} = \text{A}\% \quad (\text{chip O.D. weight}) \quad (2)$$

หมายเหตุ EA คือ Effective alkaline charge

- แปลงปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ให้อยู่ในรูปน้ำหนักของโซเดียมไดออกไซด์

$$\text{จาก NaOH} = y \text{ g}(\text{Na}_2\text{O}) \times \frac{1\text{mole}}{62\text{lb}} \times 2 \times \frac{40\text{lb}}{1\text{mole}} = 22.5$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ } y = \frac{22.5 \times 62}{80} = 17.44 \text{ g}(\text{Na}_2\text{O})$$

สมมติว่าใช้โซเดียมซัลไฟด์ร้อยละ 6.3 ของน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง

- คำนวณปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ที่ต้องใช้

ใช้โซเดียมซัลไฟด์ร้อยละ 15 ต้องใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ 22.5 กรัม

ถ้าใช้โซเดียมซัลไฟด์ร้อยละ 6.3 ดังนั้นต้องใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์

$$(22.5 \times 6.3) / 15 = 9.45 \text{ กรัม}$$

- แปลงปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ที่ใช้ให้อยู่ในรูปน้ำหนักของโซเดียมไดออกไซด์

$$\text{จาก Na}_2\text{S} = x \text{ g}(\text{Na}_2\text{O}) \times \frac{1\text{mole}}{62\text{lb}} \times \frac{78.1\text{ lb}}{1\text{ mole}} = 9.45 \text{ g}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ } x = \frac{9.45 \times 62}{78.1} = 7.50 \text{ g}(\text{Na}_2\text{O})$$

- คำนวณหาค่าซัลไฟดิตี แทนค่า y และ x ในสมการที่ (1)

$$\text{จะได้ Sulfidity} = \frac{7.50}{17.44 + 7.50} \times 100$$

$$= \frac{7.50}{24.94} \times 100$$

$$= 30.07\%$$

- คำนวณหา Effective alkaline แทนค่า y และ x ในสมการที่ (2)

$$\text{จะได้ } 150 \times A\% = 17.44 + \frac{1}{2}(7.50)$$

$$A = 0.141$$

$$A = 14.1\%$$

2.3.3 แอนทราควิโนนร้อยละ 0.20 ของน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง

- คำนวณปริมาณแอนทราควิโนนที่ต้องใช้

น้ำหนักต้นกล้วยแห้ง 100 กรัมจะใช้แอนทราควิโนน 0.2 กรัม

ถ้าน้ำหนักต้นกล้วยแห้ง 150 กรัมจะใช้แอนทราควิโนนเท่ากับ

$$(150 \times 0.2) / 100 = 0.3 \text{ กรัม}$$

2.3.4 เมทานอลร้อยละ 20 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด

- คำนวณหาปริมาณเมทานอลที่ต้องใช้

ปริมาตรของเหลวทั้งหมด 100 มิลลิลิตร ใช้เมทานอล 20 มิลลิลิตร

ถ้าปริมาตรของเหลวทั้งหมด 1500 มิลลิลิตร ใช้เมทานอลเท่ากับ

$$(1500 \times 20) / 100 = 300 \text{ มิลลิลิตร}$$

2.4 คำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องเติม

ปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพิ่ม = ปริมาตรของเหลวทั้งหมด - ปริมาตรไซเดียมไฮดรอกไซด์ - ปริมาตรเมทานอล - ปริมาตรความชื้นต้นกล้วยแห้ง

$$\text{ปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพิ่ม} = 1500 - 125 - 300 - 15 = 1060 \text{ มิลลิลิตร}$$

3. วิธีการคำนวณเยื่อในการบดเยื่อ

เนื่องจากตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-01 กำหนดให้ใช้น้ำหนักเยื่อแห้งในการบดเยื่อ 360 กรัม น้ำหนักแห้ง ในน้ำปริมาตร 23 ลิตร ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของเยื่อ (% consistency) มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.56 กำหนดให้เยื่อมีความชื้นร้อยละ 80 ดังนั้นถ้าต้องการเยื่อแห้ง 360 กรัม คำนวณได้ดังนี้

ความชื้นร้อยละ 80 แสดงว่าเมื่อชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความชื้น 100 กรัม จะมีเยื่อแห้งอยู่ 20

กรัม ถ้าต้องการเยื่อแห้ง 20 กรัม ต้องชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความชื้น 100 กรัม

ถ้าต้องการเยื่อแห้ง 360 กรัม ต้องชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความชื้นเท่ากับ

$$(360 \times 100) / 20 = 1800 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นต้องชั่งเยื่อที่มีความชื้นร้อยละ 80 มา 1800 กรัมถึงจะได้เยื่อแห้ง 360 กรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งในเยื่อจะมีน้ำอยู่แล้ว $1800 - 360 = 1440$ กรัม ดังนั้นจะต้องเติมน้ำเพิ่มลงไปอีก $23000 - 1440 = 21560$ กรัม เพื่อที่จะทำให้ให้น้ำเยื่อที่พร้อมก่อนการบดมีความเข้มข้นร้อยละ 1.56

4. วิธีการคำนวณหาปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการหาค่าความเป็นอิสระของเยื่อ (freeness)

เนื่องจากตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-94 กำหนดให้ใช้ความเข้มข้นของเยื่อเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตรทั้งหมด 1000 มิลลิลิตร ในการหาค่าความเป็นอิสระของเยื่อ และในการหาจะตวงน้ำเยื่อมาจากเครื่องบดเยื่อซึ่งมีความเข้มข้นของน้ำเยื่อเท่ากับ 1.56 ดังนั้นจะใช้สูตรดังต่อไปนี้ในการตวงปริมาณน้ำเยื่อเพื่อมาทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อตามมาตรฐานที่ต้องการคือ ร้อยละ 0.3

C_2 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อคือ ร้อยละ 1.56

V_1 = ปริมาตรน้ำเยื่อที่ใช้ในการวัดค่าความเป็นอิสระของเยื่อ คือ 1000 มิลลิลิตร

V_2 = ปริมาตรน้ำเยื่อที่ต้องตวงจากเครื่องบดเยื่อ

$$0.3 \times 1000 = 1.56 \times V_2$$

$$V_2 = (0.3 \times 1000) / 1.56$$

$$V_2 = 192 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้นต้องตวงน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อที่ความเข้มข้นของน้ำเยื่อร้อยละ 1.56 มา 192 มิลลิลิตรแล้วทำการเติมน้ำจนมีปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร แล้วนำไปหาค่าความเป็นอิสระของเยื่อ

5. วิธีการคำนวณปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ

กำหนดให้น้ำหนักของแผ่นขึ้นทดสอบมีน้ำหนักเท่ากับ 125 กรัมต่อตารางเมตร และเครื่องขึ้นแผ่นมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10.02 เซนติเมตร ดังนั้นพื้นที่ของเครื่องขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบจะมีพื้นที่เท่ากับ 0.0315 ตารางเมตร ดังนั้นถ้าจะทำการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 125 กรัมต่อตารางเมตรจะต้องใช้เยื่อแห้งเท่ากับดังนี้

- คำนวณหาน้ำหนักเยื่อต่อแผ่นทดสอบ

แผ่นขึ้นทดสอบ 1 ตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่น 125 กรัม

ถ้าแผ่นขึ้นทดสอบมีขนาด 0.0315 ตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่นเท่ากับ
 $125 \times 0.0315 = 3.94$ กรัม

ดังนั้นจะต้องใช้เยื่อแห้ง 3.94 กรัมในการขึ้นแผ่นเพื่อให้แผ่นขึ้นทดสอบมีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 125 กรัมต่อตารางเมตร แต่ละภาวจะทำการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ 15 แผ่น เพราะฉะนั้นจะต้องใช้เยื่อทั้งหมดในการขึ้นแผ่นเท่ากับ $3.94 \times 15 = 59.1$ กรัม

- คำนวณหาน้ำหนักเยื่อที่ต้องตวงสำหรับขึ้นแผ่นทดสอบ

เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.56

น้ำหนักเยื่อ 1.56 กรัม ตวงมาจากน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อ 100 มิลลิลิตร

ถ้าต้องการน้ำหนักเยื่อ 59.1 กรัม ต้องตวงน้ำเยื่อมาจากในเครื่องบดเยื่อเท่ากับ
 $(59.1 \times 100) / 1.56 = 3788.46$ มิลลิลิตร

- คำนวณการปรับความเข้มข้นเพื่อขึ้นแผ่นทดสอบ

น้ำเยื่อที่บดแล้วมาทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0.3 เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ หลังจากนั้นทำการคำนวณปริมาตรน้ำเยื่อเพื่อใช้ในการขึ้นแผ่น เนื่องจากแผ่นขึ้นทดสอบขนาด 125 กรัมต่อตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อ 3.94 กรัม ดังนั้นจะต้องทำการตวงน้ำเยื่อที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.3 ให้มีน้ำหนักเยื่อ 3.94 โดยการเทียบดังนี้

น้ำหนักเยื่อ 0.3 กรัม ตวงมาจากน้ำเยื่อ 100 มิลลิลิตร

ถ้าต้องการน้ำหนักเยื่อ 3.94 ต้องตวงมาจากน้ำเยื่อเท่ากับ $(3.94 \times 100) / 0.3 = 1313.33$ มิลลิลิตร

ดังนั้นต้องตวงน้ำเยื่อจำนวน 1313.33 มิลลิลิตรมาทำการขึ้นแผ่นก็จะได้น้ำหนักแผ่นขึ้นทดสอบที่มีขนาด 125 กรัมต่อตารางเมตร

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติส่วนตัว

นางสาวปาณิสรา พิริยะวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2530 ที่จังหวัด
ขอนแก่น

ประวัติการศึกษา

- ปี พ.ศ. 2547 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนแก่นนครวิทยาลัย
- ปี พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยีการ
บรรจุ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต
บางเขน

ผลงานวิชาการ

- Phiriyawat, P., Hanserbsai, A. and Chairrekij, S. (2011). Soda pulping from banana pseudostem. The 1st National and International Graduate Study Conference 2011, IGSC2011) "Creative Education". pp. 1251-1255, 10-11 May 2011. Bangkok, Thailand.