

การผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรรจากลำต้นข้าวโพด

นายวราพงษ์ ไสพิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MODIFIED SODA PULPING FROM CORN STALK

Mr. Warapong Sopin

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรงจากลำต้นข้าวโพด

โดย

นายวราพงษ์ ไสพิน

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา บุญ-หลง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.สิริวรรณ พัฒนาฤดี)

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

วราพงษ์ ไสพิน : การผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรงจากลำต้นข้าวโพด. (MODIFIED SODA PULPING FROM CORN STALK) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์: อ.ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ, 115 หน้า.

ลำต้นข้าวโพดซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรสามารถนำมาเพิ่มมูลค่าได้โดยนำมาเป็นแหล่งเส้นใยใช้ในการผลิตกระดาษ อย่างไรก็ตาม การผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพดยังมีปริมาณลิกนินหลงเหลืออยู่ในเยื่อสูง และการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณผลผลิตเยื่อมีค่าลดลงเนื่องจากคาร์บอไฮเดรตถูกทำลาย การผลิตเยื่อแบบโซดาสามารถตัดแปรงกระบวนการโดยการเติมแอนทราควิโนน (anthraquinone, AQ) และ/หรือเมทานอล (methanol, MeOH) เพื่อผลิตเยื่อให้มีคุณภาพดีขึ้น ฉะนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการทดลองผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรงจากลำต้นข้าวโพดโดยการเติมแอนทราควิโนน และ/หรือเมทานอล และเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและแผ่นขึ้นทดสอบที่ได้จากการผลิตเยื่อแบบโซดาและการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรงจากลำต้นข้าวโพด ซึ่งจากการทดลองพบว่าการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรงโดยการเติมแอนทราควิโนนและ/หรือเมทานอลให้ผลผลิตเยื่อเพิ่มขึ้นและสามารถกำจัดลิกนินออกจากเยื่อได้มากขึ้น โดยดูได้จากค่าคัปปานัมเบอร์มีค่าลดลง จึงส่งผลให้มีค่าความขาวสว่างสูงขึ้นด้วย เมื่อนำแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อวิธีโซดาตัดแปรงมาเปรียบเทียบกับแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อวิธีโซดา พบว่า เยื่อที่ผลิตจากวิธีโซดาตัดแปรงมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าความแข็งแรงด้นทะลุสูงขึ้น หากแต่ความต้านทานแรงฉีกและค่าความทึบแสงกลับมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตเยื่อแบบโซดา ทั้งนี้อาจเนื่องจากแอนทราควิโนนทำหน้าที่ป้องกันคาร์บอไฮเดรตจากการถูกทำลาย ในขณะที่เดียวกันแอนทราควิโนนยังทำปฏิกิริยากับลิกนิน ทำให้ปริมาณลิกนินลดน้อยลง เส้นใยจึงสามารถสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีขึ้น ในขณะที่เมทานอลทำให้การแทรกซึมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารต้มเยื่อดีขึ้น ลิกนินถูกทำลายมากขึ้น เส้นใยสามารถสร้างพันธะระหว่างกันดีขึ้น งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นว่าการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรงจากลำต้นข้าวโพดนอกจากให้ปริมาณผลผลิตเยื่อสูงขึ้นแล้ว ยังให้เยื่อมีคุณภาพดีและสามารถนำเยื่อมาผลิตเป็นกระดาษที่มีคุณภาพสูงได้

สาขาวิชา เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ปลายมือชื่อ นิสิต .....

ปีการศึกษา 2552..... ปลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ .....

# # 5172436323 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY

KEYWORDS : CORN STALK / SODA PULPING / MODIFIED SODA PULPING /  
ANTHRAQUINONE / METHANOL

WARAPONG SOPIN : MODIFIED SODA PULPING FROM CORN STALK.

THESIS ADVISOR : KUNTINEE SUVARNAKICH, Ph.D. 115 pp.

Agricultural residue like corn stalks could be value added by being a potential fiber source for papermaking. However, pulping of corn stalks using soda process still resulted in high lignin content and low pulp yield when using high dosage of sodium hydroxide due to carbohydrate degradation. The soda process can be modified by adding anthraquinone (AQ) and/or methanol (MeOH) to improve pulp properties. Thus, the objective of this research was to study pulping of corn stalk using modified soda process by adding AQ and/or MeOH and compare pulp and handsheet properties of modified soda corn stalk pulp to those of conventional soda corn stalk pulp. It was found that modified soda pulping with AQ and/or MeOH could improve pulp yield and delignification as indicated by lower kappa number and higher brightness. Modified soda pulping also enhanced tensile and burst strength of handsheet. However tear resistance and opacity of handsheets were lower when compared to conventional soda pulping. These might be because AQ preserved carbohydrate while reacted with lignin, which led to lower lignin content and better fiber bonding. MeOH might enhance the impregnation of woodchips with sodium hydroxide, a cooking chemical. More lignin was then degraded and fiber bonding was improved. From the experiment, it was found that modified soda pulping from corn stalk not only provided better pulp yield but produced good pulp properties which is essential for high quality paper.

Field of Study : .....Pulp and Paper Technology..... Student's Signature .....

Academic Year : ..2009..... Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเสียสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ สนับสนุนและให้กำลังใจ ซึ่งแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนดูแลผู้วิจัยตั้งแต่แรกเข้าการศึกษาจนจบการศึกษาเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์สมพร ชัยอารีย์กิจ ผู้ทำหน้าที่เสมือนเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาอีกหนึ่งท่าน ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา ซึ่งแนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ สนับสนุนและให้กำลังใจ ซึ่งแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนดูแลผู้วิจัยตั้งแต่แรกเข้าการศึกษาจนจบการศึกษาเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ปรีดา บุญ-หลง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.สิริวรรณ พัฒนาคดี และอาจารย์ ดร.เลอพงศ์ จารุพันธ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามาให้คำแนะนำและทำการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณโครงการวิทยาเพื่อพื้นที่ถิ่นตามแผนพัฒนาวิชาการจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนสนับสนุนตลอดงานวิจัย

ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องคัดกรองเยื่อในระหว่างการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจในการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และขอบคุณพี่สาว ที่คอยเลี้ยงดูผู้วิจัยมาเป็นอย่างดี คอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนทางด้านการศึกษาและการวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี



2.1.3.1	ชั้นมิดเดิลลาเมลลา (middle lamella, M).....	13
2.1.3.2	ชั้นผนังเซลล์ของเส้นใย (cell wall).....	13
2.1.3.3	ลูเมน (lumen).....	14
2.1.4	องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้.....	14
2.1.4.1	เซลลูโลส (cellulose).....	14
2.1.4.2	เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose).....	15
2.1.4.3	ลิกนิน (lignin).....	17
2.1.4.4	สารแทรก (extractives).....	19
2.1.5	กระบวนการผลิตเยื่อ (pulping process).....	19
2.1.5.1	กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล.....	20
2.1.5.2	กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลกึ่งเคมี.....	20
2.1.5.3	กระบวนการผลิตเยื่อเคมี.....	20
2.1.6	ปฏิกิริยาขององค์ประกอบเคมีในเส้นใยในการผลิตเยื่อแบบต่าง.....	22
2.1.6.1	ปฏิกิริยาของลิกนิน.....	22
2.1.6.2	ปฏิกิริยาของคาร์โบไฮเดรต.....	23
2.1.7	แอนทราควิโนน.....	23
2.1.8	เมทานอล.....	25
2.1.9	การบดเยื่อ (beating).....	25
2.2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....		28
3.1	วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	28
3.1.1	วัสดุและสารเคมี.....	28
3.1.2	เครื่องมือ.....	28
3.2	วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
3.2.1	การทดลองตอนที่ 1: ทำการผลิตเยื่อวิธีโซดาจากลำต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพื่อใช้เป็นการทดลองควบคุม.....	30
3.2.2	การทดลองตอนที่ 2: ทำการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพด.....	44



บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	47
4.1 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อวิธีโซดาจากลำต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพื่อใช้เป็นการ ทดลองควบคุม.....	47
4.2 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพด.....	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	105
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	105
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	107
รายการอ้างอิง.....	108
ภาคผนวก.....	110
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	115

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยจากแหล่งต่างๆ .....	9
2-2	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากแหล่งต่างๆ.....	9
3-1	ภาวะการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปร.....	45
4-1	สมบัติของเยื่อข้าวโพดที่ผลิตได้จากวิธีโซดา.....	48
4-2	ความเป็นอิสระของเยื่อก่อนบดเยื่อและปริมาณต่างหลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อแบบวิธีโซดา.....	50
4-3	องค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพดและเยื่อข้าวโพดที่ผลิตจากวิธีโซดา.....	52
4-4	ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยเยื่อข้าวโพดที่ผ่านการบดเยื่อและไม่ผ่านการบดเยื่อที่ผลิตได้จากวิธีโซดา.....	54
4-5	ผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ต่อสมบัติเยื่อข้าวโพด.....	66
4-6	ผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และการบดเยื่อที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของแผ่นขึ้นทกดสบและเส้นใย .....	68
4-7	ผลการวิเคราะห์สถิติการใช้ปริมาณ NaOH ที่ระดับต่างๆ ต่อสมบัติของแผ่นขึ้นทกดสบและเส้นใย.....	69
4-8	สมบัติของเยื่อข้าวโพดที่ผลิตได้จากวิธีโซดาตัดแปร.....	71
4-9	ความเป็นอิสระของเยื่อก่อนบดเยื่อและปริมาณต่างหลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อแบบวิธีโซดาตัดแปร.....	75
4-10	ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยเยื่อข้าวโพดที่ผลิตได้จากวิธีโซดาตัดแปร.....	81
4-11	ผลการวิเคราะห์สถิติการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลต่อสมบัติของเยื่อโดยใช้วิธี Anova แบบ Two factor with replication.....	96
4-12	ผลการวิเคราะห์สถิติการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลต่อสมบัติของแผ่นขึ้นทกดสบ โดยใช้วิธี Anova แบบ Two factor with replication.....	97
4-13	ผลการวิเคราะห์สถิติการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย โดยใช้วิธี Anova แบบ Two factor with replication.....	98

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-14	ผลการวิเคราะห์สถิติการใช้ปริมาณแอนทราควิโนนที่ระดับต่างๆ ของเมทานอล ต่อสมบัติของเยื่อ โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor.....	99
4-15	ผลการวิเคราะห์สถิติการใช้ปริมาณแอนทราควิโนนที่ระดับต่างๆ ของเมทานอล ต่อสมบัติของแผ่นทดสอบ โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor.....	100
4-16	ผลการวิเคราะห์สถิติการใช้ปริมาณแอนทราควิโนนที่ระดับต่างๆ ของเมทานอล ต่อลักษณะสัญญาณวิทยาของเส้นใย โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor.....	101
4-17	ผลการวิเคราะห์สถิติการใช้ปริมาณเมทานอลที่ระดับต่างๆ ของแอนทราควิโนน ต่อสมบัติของเยื่อ โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor.....	102
4-18	ผลการวิเคราะห์สถิติการใช้ปริมาณเมทานอลที่ระดับต่างๆ ของแอนทราควิโนน ต่อสมบัติของแผ่นทดสอบ โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor.....	103
4-19	ผลการวิเคราะห์สถิติการใช้ปริมาณเมทานอลที่ระดับต่างๆ ของแอนทราควิโนน ต่อลักษณะสัญญาณวิทยาของเส้นใย โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor.....	104

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	ชนิดของเซลลูโลสในไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง.....	11
2-2	โครงสร้างของเส้นใย.....	12
2-3	ชั้นมิดเดิลลามเมลลา (M) ของโครงสร้างเส้นใย.....	13
2-4	โครงสร้างของเซลลูโลส.....	14
2-5	บริเวณส่วนที่เป็นผลึก (ส่วนที่เป็นระเบียบ) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (ไม่เป็นระเบียบ) ของเซลลูโลส.....	15
2-6	น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบในเฮมิเซลลูโลส.....	16
2-7	โครงสร้างลิกนินที่พบในเนื้อไม้ spruce.....	17
2-8	หน่วยโครงสร้างหลักของลิกนิน.....	18
2-9	องค์ประกอบทางเคมีของชั้นผนังเซลล์เส้นใย.....	19
2-10	ลักษณะการทำปฏิกิริยาของแอนทราควิโนน.....	24
3-1	ลักษณะของลำต้นข้าวโพดที่ใช้ในงานวิจัย.....	31
3-2	ลักษณะของลำต้นข้าวโพดที่ผ่านการลอกเปลือก.....	31
3-3	ลักษณะของชิ้นลำต้นข้าวโพดที่ผ่านการตัดเป็นท่อน.....	31
3-4	บอมบ์ (bomb) สำหรับบรรจุท่อนข้าวโพดในการต้มเยื่อ.....	32
3-5	เครื่องต้มเยื่อ (autoclave digester).....	33
3-6	ลักษณะเยื่อที่ออกจากบอมบ์หลังการต้มเยื่อ.....	33
3-7	เครื่องตีกระจายเยื่อ (disintegrator).....	34
3-8	เครื่องบดเยื่อ (valley beater).....	35
3-9	เครื่องวัดความเป็นอิสระของเยื่อ (freeness tester).....	36
3-10	เครื่องวัดสัณฐานวิทยาของเส้นใย (FQA).....	37
3-11	เครื่องขึ้นแผ่นทดสอบ.....	38
3-12	ลักษณะของขึ้นแผ่นทดสอบ.....	39
3-13	ส่วนอบแห้งของเครื่องขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ.....	39
3-14	ลักษณะของการตัดแผ่นขึ้นทดสอบเพื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงต่างๆ.....	40
3-15	เครื่องวัดสมบัติเชิงแสงของแผ่นขึ้นทดสอบ (Color Touch PC).....	41

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3-16	เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	42
3-17	เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ.....	43
3-18	เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก.....	43
3-19	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	44
4-1	ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตเยื่อและค่าคัปปานัมเบอร์ของการผลิตเยื่อแบบ โซดาที่ระดับโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ.....	49
4-2	ผลของปริมาณ NaOH ต่อความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อลำตัน ข้าวโพดที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและที่ผ่านการบดเยื่อ.....	56
4-3	ผลของปริมาณ NaOH ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจาก เยื่อลำตันข้าวโพดที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและที่ผ่านการบดเยื่อ.....	57
4-4	ผลของปริมาณ NaOH ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิต จากเยื่อลำตันข้าวโพดที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและที่ผ่านการบดเยื่อ.....	58
4-5	ผลของปริมาณ NaOH ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจาก เยื่อลำตันข้าวโพดที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและที่ผ่านการบดเยื่อ.....	60
4-6	ผลของปริมาณ NaOH ต่อความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อลำตัน ข้าวโพดที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและที่ผ่านการบดเยื่อ.....	61
4-7	ผลของปริมาณ NaOH ต่อความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อลำตัน ข้าวโพดที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและที่ผ่านการบดเยื่อ.....	62
4-8	ลักษณะพื้นผิวของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อลำตันข้าวโพดแบบโซดาที่ปริมาณ NaOH ต่างๆ จากเยื่อที่ไม่ผ่านการบดและที่ผ่านการบด ที่กำลังขยาย 200 เท่า.	64
4-9	ลักษณะภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อลำตันข้าวโพดแบบโซดาที่ ปริมาณ NaOH ต่างๆ จากเยื่อที่ไม่ผ่านการบดและที่ผ่านการบด ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	65
4-10	ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อผลผลิตเยื่อ.....	72
4-11	ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อคัปปานัมเบอร์.....	73
4-12	ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อปริมาณลิกนิน.....	77

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-13	ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อปริมาณไฮโดรเซลลูโลส.....	77
4-14	ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลส.....	78
4-15	ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อปริมาณเฮมิเซลลูโลส.....	78
4-16	ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อปริมาณสิ่งเจือปนอื่นๆ.....	79
4-17	ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อความหนาแน่นของแผ่นขึ้นทดสอบ.....	83
4-18	ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่น ขึ้นทดสอบ.....	85
4-19	ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของ แผ่นขึ้นทดสอบ.....	86
4-20	ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของแผ่น ขึ้นทดสอบ.....	87
4-21	ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อความขาวสว่างของแผ่นขึ้นทดสอบ.....	89
4-22	ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อความทึบแสงของแผ่นขึ้นทดสอบ.....	90
4-23	ลักษณะพื้นผิวของแผ่นขึ้นทดสอบจากเยื่อแบบโซดาตัดแปร.....	92
4-24	ลักษณะภาคตัดขวางของแผ่นขึ้นทดสอบจากเยื่อแบบโซดาตัดแปร.....	93

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์หรือข้าวโพดไร่เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญของประเทศไทย ความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นมากหลังจากที่มีการขยายการเลี้ยงสัตว์ตั้งแต่ปี 2535 จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรพบว่าในปีการเพาะปลูก 2551/52 ประเทศไทยมีเนื้อที่การเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 6,691,807 ไร่ ซึ่งให้ผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ถึง 4,249,354 ตัน โดยภาคที่มีการปลูกข้าวโพดจำนวนมากได้แก่ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลางของประเทศ หลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้ว เศษลำต้นข้าวโพดสามารถนำไปทำปุ๋ย อาหารเลี้ยงสัตว์ หรือผลิตเอทานอลได้ อย่างไรก็ตามเศษลำต้นข้าวโพดส่วนใหญ่ถูกฝังกลบหรือเผาทิ้งเพื่อให้ได้พื้นที่สำหรับทำการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ต่อไป ซึ่งการเผาทำลายนั้นมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและเป็นส่วนหนึ่งในการเกิดปัญหาโลกร้อน กอปรกับปัจจุบันอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษของประเทศมีอัตราการขยายตัวสูงขึ้น มีความต้องการใช้เยื่อเพื่อผลิตกระดาษส่งออกขายต่างประเทศและใช้ภายในประเทศมากขึ้น แต่ปัจจุบันวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อส่วนใหญ่เป็นไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งพื้นที่ปลูกต้นยูคาลิปตัสมีอยู่จำกัดส่งผลให้ต้นยูคาลิปตัสที่จะใช้ในการผลิตเยื่อมีปริมาณเท่าเดิมแต่กำลังความต้องการใช้เยื่อเพื่อผลิตกระดาษนั้นมีแนวโน้มสูงขึ้น ดังนั้นจึงได้มีความพยายามหาเส้นใยจากแหล่งอื่นนอกเหนือไปจากยูคาลิปตัส เพื่อสามารถนำมาเป็นแหล่งวัตถุดิบเพิ่มปริมาณการผลิตเยื่อให้เพียงพอต่อความต้องการเยื่อที่มีสูงขึ้น

จากการวิจัยเบื้องต้นพบว่า ลำต้นข้าวโพดมีศักยภาพสามารถนำมาผลิตเป็นเยื่อกระดาษได้ โดยการศึกษาก่อนหน้านี้ได้ทำการศึกษากการผลิตเยื่อวิธีโซดาจากส่วนต่างๆ ของลำต้นข้าวโพดพบว่า ลำต้นข้าวโพดทั้งต้นผลิตแผ่นทดสอบที่ให้ความแข็งแรงสูงกว่าส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพด และส่วนของแกนกลางของต้นข้าวโพด อย่างไรก็ตาม ในการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดานั้นเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินไป จะส่งผลให้ผลผลิตเยื่อลดลงเนื่องจากคาร์โบไฮเดรตถูกทำลาย (carbohydrate degradation) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะตัดแปรการผลิตเยื่อวิธีโซดาด้วยสารเคมีสองชนิด ได้แก่ แอนทราควิโนน (anthraquinone, AQ) และเมทานอล (methanol, MeOH) ศึกษาอิทธิพลของสารทั้งสองต่อประสิทธิภาพการต้มเยื่อข้าวโพดด้วยวิธีโซดา ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า แอนทราควิโนนช่วยเร่งการขจัดลิกนินออกจากชิ้นไม้ และลดการทำลายคาร์โบไฮเดรตของเส้นใยในพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้ เช่น ต้นทานตะวัน ต้นกก (reed

canary grass) และต้นอ้อ (*Arundo donax* L.) ในขณะที่เมทานอลเป็นตัวช่วยทำให้ลิกนินและสารแทรก (extractive) เกิดการละลาย รวมถึงช่วยลดการเกิดการรวมตัวกันของลิกนิน (lignin condensation) ส่งผลให้ได้ผลผลิตเยื่อสูงขึ้น ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ (kappa number) ต่ำลงและความแข็งแรงของกระดาษดีขึ้นด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ทำการผลิตเยื่อไซตาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพดด้วยแอนทราควิโนนและเมทานอล

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของแอนทราควิโนนและเมทานอลที่มีต่อการผลิตเยื่อแบบไซตาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพด

1.2.3 เปรียบเทียบการผลิตเยื่อแบบไซตาและการผลิตเยื่อแบบไซตาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพด

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ทำการผลิตเยื่อวิธีไซตา (soda pulping) จากลำต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพื่อใช้เป็นการทดลองควบคุม โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง (liquor to wood ratio, L:W) คือ 9 ต่อ 1 ต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 120 นาที นำเยื่อที่ผลิตได้มาทำการบดเยื่อ (beating) เป็นระยะเวลา 4 นาที จากนั้นนำเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและผ่านการบดเยื่อของแต่ละระดับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มาทำการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร ทำการทดสอบสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบต่างๆ เปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและผ่านการบดเยื่อ แล้วเลือกภาวะที่เหมาะสมมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

1.3.2 ทำการผลิตเยื่อวิธีไซตาตัดแปร (modified soda pulping) จากลำต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองตามข้อ 1.3.1 และเติมแอนทราควิโนนและ/หรือเมทานอลในปริมาณต่างๆ กัน ดังนี้ ทำการเติมแอนทราควิโนนในปริมาณ 0, 0.1, 0.2 และ 0.4% ของน้ำหนักข้าวโพดแห้ง และเติมเมทานอลในปริมาณ 0, 20 และ 40% ของปริมาณของเหลวทั้งหมดที่ใช้ในการต้มเยื่อ โดยในการต้มเยื่อนี้ใช้ภาวะในการต้มเยื่อคือ เวลาและอุณหภูมิรวมถึงอัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเดียวกับการทดลองตามข้อ 1.3.1 นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของแอนทราควิโนนและเมทานอลที่มีต่อสมบัติของ



เยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากวิธีโซดาตัดแปรร และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ การทดลองการผลิตเยื่อจากวิธีโซดาตามข้อ 1.3.1

#### 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากลำต้นข้าวโพดแบบวิธีโซดาและแบบวิธีโซดาตัดแปรร รวมถึงหาปริมาณการเติมแอนทราควิโนนและ/หรือเมทานอลที่เหมาะสม ในกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรร เปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบที่ผลิตได้จากวิธีโซดาและแบบวิธีโซดาตัดแปรร

#### 1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

โดยทั่วไปเกษตรกรจะปล่อยให้ฝักข้าวโพดเลี้ยงสัตว์แห้งก่อนจะทำการเก็บเกี่ยวผลผลิต ส่งผลให้ลำต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์แห้งไปด้วย ทำให้การตัดลำต้นเป็นท่อนยากลำบาก รวมถึงอาจมีเชื้อราและสิ่งเจือปนเกิดขึ้นได้ในระหว่างการตากลำต้นให้แห้ง ส่งผลต่อความผันแปรของลำต้นข้าวโพดที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบ อีกทั้งลำต้นข้าวโพดมีลักษณะเบาและฟูทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งมีราคาสูง การเตรียมวัตถุดิบรวมถึงเครื่องมือที่ใช้ยังไม่มีการพัฒนาเท่าที่ควรเนื่องจากอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ใช้ไม้ในการผลิตเยื่อ และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีฤดูกาลเก็บเกี่ยวผลผลิตปีละ 2 ครั้ง อาจไม่เพียงพอต่อความต้องการในระดับอุตสาหกรรม

#### 1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

กระบวนการผลิตเยื่อ (pulping) เป็นกระบวนการที่พยายามแยกเส้นใยออกจากชิ้นไม้ให้เป็นเส้นใยเดี่ยวๆ (individual fiber) ให้เหมาะสมต่อการผลิตกระดาษ การแยกเส้นใยให้เป็นเส้นใยเดี่ยวๆ อาจทำได้ 2 วิธี คือ การละลายลิกนินออกจากเนื้อไม้โดยใช้สารเคมี ซึ่งเรียกกระบวนการผลิตเยื่อแบบนี้ว่า การผลิตเยื่อแบบเคมี (chemical pulping) หรือการใช้แรงกลทำให้ลิกนินอ่อนตัวแล้วแยกเส้นใยออกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ซึ่งเรียกการผลิตเยื่อแบบนี้ว่า การผลิตเยื่อเชิงกล (mechanical pulping)

กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา (soda pulping) เป็นกระบวนการผลิตเยื่อแบบเคมีชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตเยื่อแบบดั้งเดิมโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีในการต้มเยื่อ ส่วนมากนิยมใช้ในการผลิตเยื่อจากพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้ (non wood plant)

กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรร (modified soda pulping) เป็นกระบวนการผลิตเยื่อแบบเคมี โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีหลักในการต้มเยื่อ แต่จะมีการเติมสารเคมีชนิดอื่นลงไปเพิ่มด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการผลิตเยื่อให้ดีขึ้นหรือลดต้นทุนการผลิตเยื่อ ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้เติม เช่น แอนทราควิโนน เมทานอล เป็นต้น

### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้ภาวะในการผลิตเยื่อแบบโซดาและแบบโซดาตัดแปรร จากส่วนของลำต้นข้าวโพดที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อและกระดาษ

1.7.2 ได้ข้อมูลอิทธิพลของแอนทราควิโนนและเมทานอลที่มีต่อการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรรจากต้นข้าวโพด

1.7.3 ได้เยื่อมีคุณภาพดีขึ้นและส่งผลให้เมื่อนำมาผลิตเป็นกระดาษได้คุณภาพดียิ่งขึ้น

1.7.4 สามารถนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์

### 1.8 วิธีดำเนินการวิจัย

1.8.1 ศึกษาค้นคว้ารวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.8.2 เตรียมวิธีการทดลอง อุปกรณ์และสารเคมี

1.8.3 ผลิตเยื่อแบบโซดาเพื่อเป็นตัวทดลองควบคุม

1.8.4 ผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรร

1.8.5 ทดสอบสมบัติของเยื่อและกระดาษ

1.8.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผลการทดลองและเรียบเรียงเนื้อหาเพื่อผลิตบทความวิจัย

1.8.7 เขียนวิทยานิพนธ์และส่งผลงานเผยแพร่

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

เยื่อกระดาษ คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแยกเส้นใยในไม้หรือพืชชนิดอื่นๆ ที่มีเส้นใยเพื่อเป็นวัตถุดิบไว้ใช้ในการผลิตกระดาษต่างๆ กระบวนการผลิตเยื่อนั้นอาจทำได้หลายวิธี คือ ผลิตโดยใช้แรงกล (mechanical pulping) ใช้สารเคมี (chemical pulping) หรืออาจใช้ทั้งสองวิธีร่วมกันในการผลิต ในการผลิตเยื่อแบบแรงกลนั้น องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง ส่วนการผลิตเยื่อแบบเคมีจุดประสงค์คือ ทำการกำจัดลิกนินออกจากเนื้อไม้ โดยพยายามให้มีความเสียหายแก่เซลลูโลสหรือเฮมิเซลลูโลสน้อยที่สุด ดังนั้นองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจึงมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

เส้นใย ในวงการอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ หมายถึงเซลล์ผนังที่มีความเรียวยาว (slenderness) และปลายเซลล์ทั้งสองข้างสอบปิดเข้าหากัน ซึ่งเซลล์ดังกล่าวได้มาจากส่วนประกอบของโครงสร้างต่างๆ ของพืชชั้นสูง (spermatophyte) เช่น ลำต้น ใบ ผล เป็นต้น

##### 2.1.1 ข้าวโพด

ข้าวโพดเป็นพืชไร่ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและเป็นธัญพืชที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้นานานับประการ ซึ่งอาจสรุปได้พอสังเขป ดังนี้ [1]

- ใช้เป็นอาหารสัตว์ ได้ทั้งเมล็ด ต้นสด ต้นแก่หลังการเก็บเกี่ยว ต้นสดหมัก กากน้ำตาล กากแป้งที่เหลือจากการสกัดน้ำมัน
- ใช้เป็นอาหารมนุษย์ ในอเมริกากลางและอเมริกาใต้บริโภคข้าวโพดเป็นอาหารหลัก โดยนำเมล็ดแก่มาบดให้เป็นแป้งเพื่อทำเป็นอาหาร สำหรับประเทศไทยนิยมนำฝักสดของข้าวโพดหวาน ข้าวโพดข้าวเหนียวมาต้มรับประทาน และนำฝักอ่อนของข้าวโพดมาประกอบอาหาร และบรรจุกระป๋องในระดับอุตสาหกรรมเพื่อส่งขายต่างประเทศอีกด้วย

- ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เมล็ดข้าวโพดนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำตาล น้ำเชื่อม น้ำมัน แอลกอฮอล์ ยารักษาโรค เป็นต้น ส่วนฝัก ใบ และลำต้นข้าวโพดนำไปทำผลิตภัณฑ์หลายชนิด ได้แก่ กระดาษ ปู่ยง หนวนไฟฟ้า เป็นต้น

ในประเทศไทยการปลูกข้าวโพดเป็นที่นิยมปลูกกันมากเพราะปลูกง่าย สามารถปลูกได้ตลอดปี ระยะเวลาเก็บเกี่ยวไม่ยาวนานและเหมาะสมกับสภาพดินฟ้าอากาศของประเทศไทย มูลค่าการส่งออกของข้าวโพดนั้นใกล้เคียงกับข้าวเจ้าและยางพารา นอกจากนี้ประเทศไทยยังเป็นประเทศอันดับ 4 ของโลก ที่ทำการส่งข้าวโพดเป็นสินค้าออก แหล่งที่มีการปลูกข้าวโพดในประเทศไทยมีดังนี้

- ภาคกลาง มีการปลูกในจังหวัดเพชรบูรณ์ ลพบุรี นครสวรรค์ สระบุรี พิษณุโลก พิจิตร และสุโขทัย

- ภาคเหนือ มีการปลูกในจังหวัดแพร่ น่าน เชียงราย และเชียงใหม่

- ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีการปลูกในจังหวัดนครราชสีมา อุบลราชธานี ชัยภูมิ ขอนแก่น และศรีสะเกษ

- ภาคใต้ มีการปลูกในจังหวัดสงขลา สุราษฎร์ธานี และนครศรีธรรมราช

#### 2.1.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของข้าวโพด

ข้าวโพดเป็นพืชตระกูลหญ้า ซึ่งอยู่ในวงศ์เดียวกับหญ้า ไม้ไผ่ และธัญพืชอื่นๆ คือ อยู่ในวงศ์ Gramineae มีลำต้นตั้งตรง มีปล้อง ใบเรียวยาวติดอยู่กับต้นบริเวณปล้อง ฝักจะออกบริเวณกลางลำต้นตรงข้อ มีช่อดอกที่ปลายยอด ข้าวโพดมีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Zea mays* Linn. มีลักษณะทางพฤกษศาสตร์ดังต่อไปนี้

2.1.1.1.1 ราก ข้าวโพดไม่มีรากแก้ว แต่มีรากเป็นระบบรากฝอย การเกิดรากของข้าวโพดจะมีลำดับการเจริญเติบโตเริ่มจากมีรากชั่วคราวซึ่งเป็นรากแรกเกิด อีก 7-10 วันก็จะเกิดรากถาวร [1-5] ซึ่งเป็นรากที่เจริญออกไปรอบๆ ต้นข้าวโพดและจะแทงลึกลงไปดินเพื่อหาอาหาร นอกจากนี้ ยังมีรากที่เกิดขึ้นที่รอบๆ ข้อใกล้กับพื้นดินอีกด้วย ซึ่งรากนี้จะช่วยในการพยุงลำต้นหรือยึดพื้นดิน

2.1.1.1.2 ลำต้น ข้าวโพดมีลำต้นแข็ง ใสนั่นไม่กลวงเหมือนพืชอื่น ความสูงของลำต้นมีตั้งแต่ 60 เซนติเมตร จนถึง 6 เมตร แล้วแต่ชนิดของพันธุ์ ข้อของข้าวโพด นอกจากเป็นข้อต่อของปล้องแล้วยังเป็นที่เกิดของราก ลำต้นใหม่และฝักอีกด้วย ปล้องที่โคนต้นจะสั้นและหนา และยาวขึ้นไปทางด้านปลาย ปล้องเหนือพื้นดินมีตั้งแต่ 8-20 ปล้อง เมื่อผ่าลำต้นดูตามขวางจะเห็นเปลือกอยู่รอบนอก ประกอบด้วยเซลล์ที่กันน้ำได้ ส่วนด้านในเป็นเซลล์ที่อ่อนนุ่ม และท่ออาหาร บริเวณใต้วงกลาง (pith) ของลำต้นมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ

2.1.1.1.3 ใบ ประกอบด้วยกาบใบและแผ่นใบ กาบใบจะหุ้มลำต้น ส่วนแผ่นใบจะกางออก ใบมีลักษณะเป็นเส้นตรงปลายแหลม ยาวประมาณ 30-100 เซนติเมตร เส้นกลางของใบจะเห็นได้ชัด ตรงขอบใบมีขนอ่อนๆ

2.1.1.1.4 ดอก ข้าวโพดมีดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่แยกกัน แต่อยู่ในต้นเดียวกัน ช่อดอกตัวผู้อยู่ส่วนยอดของลำต้น ส่วนช่อดอกตัวเมียอยู่ต่ำลงมาโดยอยู่ระหว่างกาบของใบและลำต้น ฝักเกิดจากดอกตัวเมียที่เจริญเติบโตแล้ว ฝักอ่อนจะมีสีเขียว พอแก่จะมีสีน้ำตาล

#### 2.1.1.2 การจำแนกชนิดของข้าวโพด

จำแนกตามคุณสมบัติของแป้งในเมล็ด ภายในเมล็ดข้าวโพด ประกอบด้วยแป้ง 2 ชนิดคือ แป้งแข็ง (hard starch) และแป้งอ่อน (soft starch) จึงสามารถจำแนกโดยอาศัยตำแหน่งของแป้งแต่ละชนิดและลักษณะของเปลือกหุ้มเมล็ด [1- 5] ได้เป็น 7 ชนิด คือ

2.1.1.2.1 ข้าวโพดไร่ชนิดหัวบุบ (dent corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays indentata* เป็นข้าวโพดที่เมล็ดตอนบนมีรอยบุบสีขาว เนื่องจากตอนบนเป็นแป้งชนิดอ่อน (soft starch) เมื่อตากให้แห้ง ส่วนที่เป็นแป้งอ่อนจึงหดยุบตัวและเกิดลักษณะหัวบุบดังกล่าว มีลำต้นสูงตั้งแต่ 2.5-4.5 เมตร ฝักยาวตั้งแต่ 15-30 เซนติเมตร และมีเมล็ดระหว่าง 8-24 แถว

2.1.1.2.2 ข้าวโพดไร่ชนิดหัวแข็ง (flint corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays indurata* เป็นข้าวโพดที่มีลักษณะเมล็ดค่อนข้างแข็งแรง กลม เรียบ หัวไม่บุบ เพราะมีแป้งชนิดอ่อนอยู่ตรงกลาง แต่ด้านนอกถูกห่อหุ้มด้วยแป้งชนิดแข็ง เมื่อตากให้แห้งจึงไม่หดตัว มีขนาดฝักและจำนวนแถวน้อยกว่าชนิดหัวบุบ

2.1.1.2.3 ข้าวโพดหวาน (sweet corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays saccharata* เป็นข้าวโพดปลูกรับประทานฝักสดโดยเฉพาะ เมล็ดเมื่ออ่อนจะมีลักษณะใส โปร่งแสง และมีรสหวานเนื่องจากมีน้ำตาลมาก เมื่อเมล็ดแก่จะหดตัวและเหี่ยวยุบ

2.1.1.2.4 ข้าวโพดคั่ว (pop corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays everta* เมล็ดมีขนาดค่อนข้างเล็ก มีแป้งประเภทแข็งอยู่ภายใน ภายนอกถูกห่อหุ้มด้วยสารที่ค่อนข้างเหนียวและยึดตัวได้ ฉะนั้นเมื่อเมล็ดที่มีความชื้นอยู่ภายในพอสมควรถูกความร้อน จะเกิดแรงดันภายในเมล็ดและเมื่อถึงขีดสุดก็จะระเบิดตัวออกมา

2.1.1.2.5 ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays certain* มีลักษณะเมล็ดเหนียวคล้ายขี้ผึ้ง ซึ่งเป็นแป้งที่มีลักษณะคล้ายแป้งมันสำปะหลัง ปลูกกันเล็กน้อยในสหรัฐอเมริกา เพื่อใช้ทำแป้งที่มีคุณภาพคล้ายแป้งมันดังกล่าว

2.1.1.2.6 ข้าวโพดแป้ง (flour corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays amylacea* เมล็ดประกอบด้วยแป้งชนิดอ่อนมาก มีรูปร่างและลักษณะเมล็ดคล้ายข้าวโพดไร่ชนิดหัวแข็ง แต่หัวไม่นุบหรือนุบเล็กน้อยโดยสม่ำเสมอทั่วเมล็ด มีเมล็ดประมาณ 8-12 แถว

2.1.1.2.7 ข้าวโพดป้า (pod corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays tunicate* เป็นข้าวโพดที่มีลักษณะแปลก ใกล้เคียงกับพืชป้า เมล็ดมีเปลือกหุ้มทุกเมล็ด และยังมีเปลือกฝักอีกชั้นหนึ่ง ส่วนเมล็ดมีลักษณะต่างๆ กัน คือมีทั้งพวกหัวนุบ หัวแข็ง ข้าวโพดแป้ง ข้าวโพดหวาน ข้าวโพดคั่ว

ข้าวโพดที่นำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นข้าวโพดไร่ชนิดหัวแข็ง ซึ่งเป็นชนิดที่มีการปลูกมาก เนื่องจากนำไปแปรรูปเป็นอาหารสัตว์

### 2.1.1.3 ลักษณะทั่วไปของเส้นใยและองค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพด

เส้นใยจากลำต้นข้าวโพดมีขนาดความยาวเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.0-1.5 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าเป็นเส้นใยที่มีขนาดสั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง พบว่า เส้นใยของลำต้นข้าวโพดมีความยาวเฉลี่ยใกล้เคียงกับเส้นใยจากไม้เนื้อแข็ง (hardwood fiber) แต่มีขนาดสั้นกว่าเส้นใยที่ได้จากไม้เนื้ออ่อน (softwood fiber) ส่วนความกว้างของเส้นใยจากลำต้นข้าวโพดมีความกว้างน้อยกว่าเส้นใยที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง ดังแสดงในตารางที่ 2-1 สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพด พบว่าข้าวโพดมีปริมาณ

เซลลูโลส (cellulose) และเพนโตซาน (pentosan) ในปริมาณมาก ส่วนปริมาณลิกนิน (lignin) มีน้อยเมื่อเทียบกับไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง ดังแสดงในตารางที่ 2-2 ฉะนั้นจึงเห็นได้ว่าลำต้นข้าวโพดมีความเหมาะสมที่จะนำมาทำการผลิตเยื่อกระดาษได้เช่นเดียวกับเนื้อไม้ [6]

**ตารางที่ 2-1** ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยจากแหล่งต่างๆ [6]

แหล่งที่มาของเส้นใย	ความยาวเฉลี่ยของเส้นใย (มิลลิเมตร)	ความกว้างของเส้นใย (ไมโครเมตร)
ไม้เนื้ออ่อน (softwood)	2.7-4.6	32-43
ไม้เนื้อแข็ง (hardwood)	0.7-1.6	20-40
ต้นข้าวโพด (cornstalk)	1.0-1.5	18-22

**ตารางที่ 2-2** องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากแหล่งต่างๆ [6]

แหล่งที่มาของเส้นใย	ปริมาณเซลลูโลส (%)	ปริมาณลิกนิน (%)	ปริมาณเพนโตซาน (%)
ไม้เนื้ออ่อน (softwood)	40-52	26-32	8-12
ไม้เนื้อแข็ง (hardwood)	38-50	18-28	15-25
ต้นข้าวโพด (cornstalk)	46-50	16-17	27-28

### 2.1.2 แหล่งที่มาของเส้นใยที่ใช้ในการผลิตเยื่อและกระดาษ

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษส่วนใหญ่ได้มาจากเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืช ทั้งที่เป็นไม้ยืนต้นและไม้ล้มลุก โดยแหล่งเส้นใยที่ได้ส่วนใหญ่มาจากเนื้อไม้ แต่บางส่วนอาจไม่ได้มาจากเนื้อไม้ เช่นจากส่วนของใบ ผล หรือจากลำต้นของพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้ได้เช่นกัน ดังนั้นอาจแบ่งเส้นใยที่ใช้ในการผลิตกระดาษออกเป็น 2 ประเภทคือ เส้นใยที่ได้มาจากเนื้อไม้ และเส้นใยที่ไม่ได้มาจากเนื้อไม้

### 2.1.2.1 เส้นใยที่มาจากเนื้อไม้ (wood fiber)

เป็นเส้นใยที่ได้มาจากเนื้อไม้ (wood) ของพืชเมล็ดเปลือย (gymnosperm) ในกลุ่มของพวกไม้สน (conifers) และเนื้อไม้ของพืชดอก (angiosperms) ในกลุ่มของพวกพืชใบเลี้ยงคู่ (dicotyledons) โดยที่เนื้อไม้คือส่วนของเนื้อเยื่อท่อลำเลียงน้ำ (xylem tissue) ซึ่งเกิดจากแคมเบียม (cambium) ที่พืชมีเนื้อไม้ (woody plant) สร้างขึ้นมาเป็นจำนวนมาก [7-9] ในทางอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษแบ่งประเภทเนื้อไม้ออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.1.2.1.1 ไม้เนื้ออ่อน (softwood) เป็นไม้ในกลุ่มของพืชเมล็ดเปลือยในกลุ่มของพวกไม้สน หรืออาจเรียกว่าเป็นไม้ใบแคบหรือไม้ไม่ผลัดใบก็ได้ เป็นต้นไม้ที่ลักษณะใบเหมือนรูปเข็ม เขียวตลอดทั้งปี เป็นไม้ที่ไม่มีการผลัดใบ มีมากในแถบประเทศเขตร้อน เซลล์ที่พบในเนื้อไม้ในกลุ่มของไม้เนื้ออ่อนซึ่งเป็นพวกสนนั้น คือ เทรคีด (tracheid, fiber tracheid) เซลล์พาเรนไคมา (parenchyma cell) และ เรซินเซลล์ (resin cell) โดยทั่วไปเทรคีดจะมีอยู่ประมาณร้อยละ 90-95 ของปริมาตรเนื้อไม้ มีหน้าที่ลำเลียงน้ำและให้ความแข็งแรงของต้นไม้ ลักษณะของเทรคีดมีลักษณะเซลล์ค่อนข้างผอม ยาว หัวท้ายเซลล์ไม่มีรูทะลุ มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 2.5-7 มิลลิเมตร มีความกว้างประมาณ 25-60 ไมโครเมตร ส่วนเซลล์พาเรนไคมาและเรซินเซลล์จะมีอยู่ประมาณร้อยละ 5-10 และร้อยละ 0.5-1 ของปริมาตรเนื้อไม้ ตามลำดับ เส้นใยที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนจะมีลักษณะของโครงสร้างที่สม่ำเสมอ เซลล์ในเนื้อไม้โดยภาพรวมส่วนใหญ่จะมีลักษณะของเซลล์ยาว ตรง ทำให้ขั้นตอนหรือกระบวนการจัดการต่างๆ เกี่ยวกับเนื้อไม้ทำได้ง่าย จึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

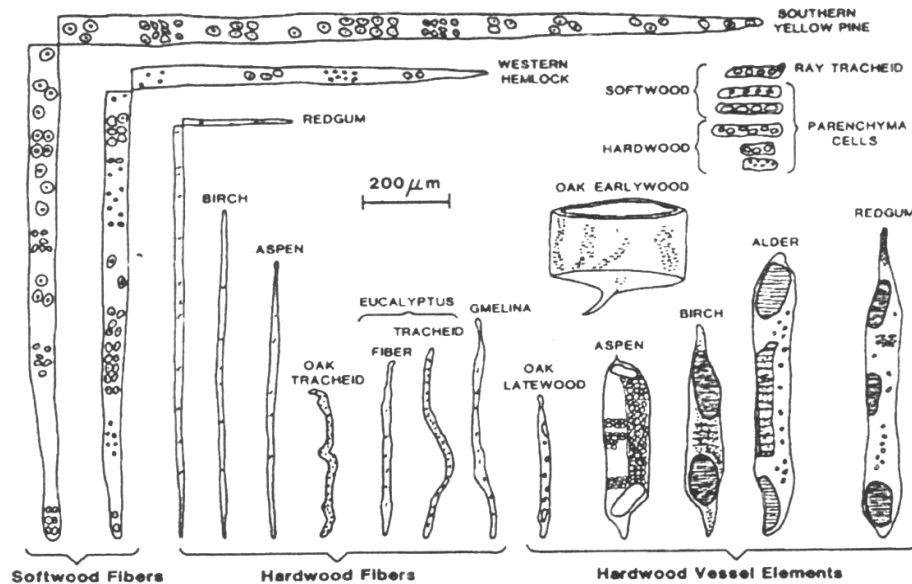
2.1.2.1.2 ไม้เนื้อแข็ง (hardwood) เป็นเนื้อไม้ของพืชดอกในกลุ่มของพวกพืชใบเลี้ยงคู่ หรืออาจเรียกว่าเป็นไม้ใบกว้าง (broadleaves) หรือไม้ผลัดใบก็ได้ ตัวอย่างของไม้เนื้อแข็ง เช่น ต้นยูคาลิปตัส ต้นกระถินเทพา ต้นกระถินณรงค์ เป็นต้น ต้นไม้พวกนี้จะมีลักษณะใบกว้างและมีการผลัดใบในฤดูใบไม้ร่วง ในกลุ่มของไม้เนื้อแข็งจะพบเซลล์หลายชนิดมากกว่าในไม้เนื้ออ่อน ดังแสดงในภาพที่ 2-1 ได้แก่ เซลล์เวสเซล (vessel element) ไฟเบอร์เทรคีด (fiber tracheid) ลิบริฟอร์มไฟเบอร์ (libriform fiber) เรย์เซลล์ (ray cell) และพาเรนไคมาเซลล์ (parenchyma cell) ในไม้เนื้อแข็งพวกเซลล์เส้นใยจะมีหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่ลำต้น ส่วนการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุจะเป็นหน้าที่ของเวสเซล ไม้เนื้อแข็งจะมีเส้นใยอยู่ประมาณร้อยละ 36-70 มีเวสเซลอยู่ร้อยละ 20-55 มีเรย์เซลล์อยู่ร้อยละ 6-20 และมีพาเรนไคมาอยู่ร้อยละ 2 ของปริมาตรเนื้อไม้ เส้นใยของไม้เนื้อแข็งจะมีความยาวประมาณ 0.9-1.5 มิลลิเมตร ส่งผลให้กระดาษที่ผลิต



ได้จากไม้เนื้อแข็งมีความแข็งแรงต่ำกว่าไม้เนื้ออ่อน แต่จะมีความเรียบเนียนมากกว่ากระดาษที่ผลิตได้จากเส้นใยของไม้เนื้ออ่อน

### 2.1.2.2 เส้นใยที่ไม่ได้มาจากเนื้อไม้ (non-wood fiber)

แม้ว่าไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งจะเป็นแหล่งเส้นใยที่ใช้ในการผลิตเยื่อและกระดาษเป็นส่วนใหญ่ แต่พืชที่ไม่ให้เนื้อไม้ยังมีส่วนสำคัญในการเป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตเยื่อและกระดาษในหลายๆ ประเทศที่ปริมาณการผลิตเยื่อไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้งาน ในอดีตการนำพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้มาทำการผลิตเยื่อไม่ค่อยมีความนิยมเหมือนพวกเนื้อไม้ เพราะการจัดการวัตถุดิบ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ รวมถึงกระบวนการผลิตยังไม่ค่อยได้มีการพัฒนา แต่ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเยื่อ การออกแบบเครื่องมือ และกระบวนการทางวิศวกรรมเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการผลิตเยื่อจากพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้เพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 2-1 ชนิดของเซลล์ในไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง [11]

สำหรับพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้ที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อ สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

- เศษเหลือจากการเกษตรและอุตสาหกรรมทางการเกษตร (agricultural and agro-industrial waste) ได้แก่ ฟางข้าว กากอ้อย เป็นต้น

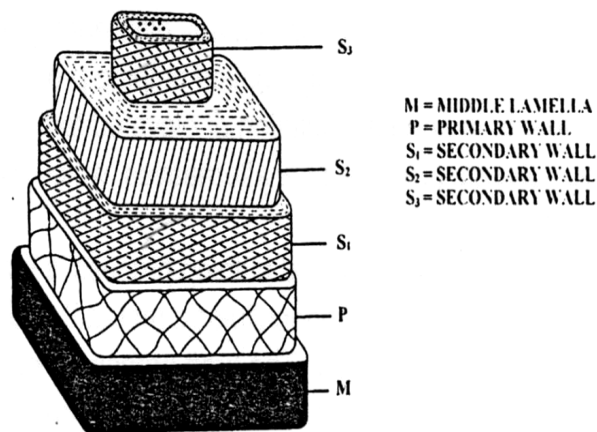
- พืชล้มลุกที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ได้แก่ ต้นไผ่ หญ้าต่างๆ เช่น ต้นกก ต้น  
 อ้อ เป็นต้น

- พืชล้มลุกที่มีการเพาะปลูก ได้แก่ ปอสา ลินิน ป่าน ปอกระเจา ฝ้าย  
 เป็นต้น

อ้อย ต้นไผ่ ฟางข้าว หญ้ากอกต่างๆ เป็นแหล่งวัตถุดิบหลักของพืชที่ไม่ให้  
 เนื้อที่ใช้เป็นเส้นใยในการผลิตเยื่อและกระดาษ เยื่อที่ได้จากพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้เหล่านี้จะนำไปผสม  
 กับเส้นใยที่ได้จากเนื้อไม้หรือเส้นใยรีไซเคิลเพื่อทำการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก กระดาษไลเนอร์  
 (linerboard) กระจกกระดาษ หรือหากมีการนำเยื่อที่ได้จากพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้เหล่านี้ไปทำการฟอกเยื่อ  
 ก่อน อาจนำไปผสมกับวัตถุดิบใช้ในการผลิตกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษส่งจดหมาย กระดาษ  
 ไปสเตอร์ หรือกระดาษชำระได้ ส่วนพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้อื่นอาจนำไปผลิตกระดาษชนิดพิเศษโดย  
 ขึ้นอยู่กับลักษณะของเส้นใยเป็นสำคัญ [7,11]

### 2.1.3 โครงสร้างของเส้นใย

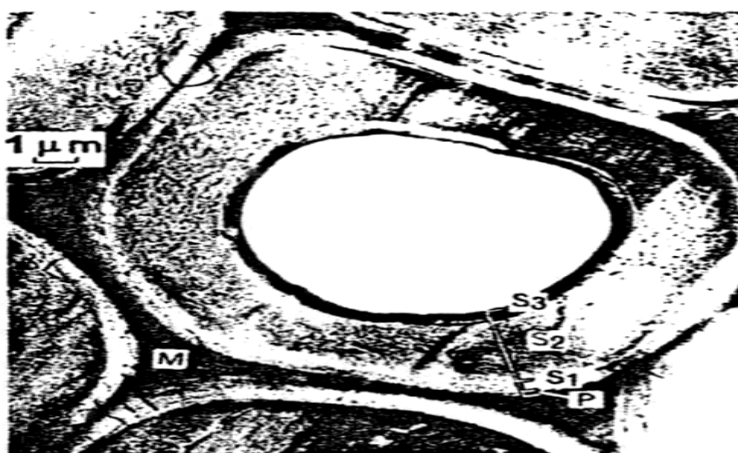
เส้นใยของพืชมีลักษณะเรียวยาวหัวท้ายปิด ลักษณะของเส้นใยมีการแปรผันตาม  
 อัตราการเจริญเติบโตและปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่างๆ โดยเส้นใยที่มีการเจริญเติบโตในช่วงฤดูฝน  
 ลักษณะของเส้นใยจะมีผนังเซลล์บางและลูเมนกว้าง ส่วนเส้นใยที่มีการเจริญเติบโตในฤดูแล้งนั้น  
 ผนังเซลล์ของเส้นใยจะหนาและลูเมนแคบ โครงสร้างของเส้นใยมีการแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้นหลักๆ  
 คือ ชั้นมิดเดิลลามেলা (middle lamella) ชั้นผนังเซลล์ (cell wall) และ ลูเมน (lumen) [7, 9, 12]  
 ดังแสดงในภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 โครงสร้างของเส้นใย [13]

### 2.1.3.1 ชั้นมิดเดิลลาเมลลา (middle lamella, M)

เป็นชั้นบริเวณนอกสุดของเส้นใยประกอบด้วยลิกนิน (lignin) มีหน้าที่เป็นตัวประสานให้เส้นใยแต่ละเส้นเชื่อมติดกันในเนื้อไม้ซึ่งไม่ได้เป็นส่วนของผนังเซลล์ มีขนาดบาง ดังแสดงในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 ชั้นมิดเดิลลาเมลลา (M) ของโครงสร้างเส้นใย [13]

### 2.1.3.2 ชั้นผนังเซลล์ของเส้นใย (cell wall)

ชั้นผนังเซลล์ของเส้นใยประกอบไปด้วย 2 ชั้นคือ ชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall) และ ชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell wall)

2.1.3.2.1 ชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall, P) เป็นชั้นที่มีลักษณะบางมากเกิดจากเส้นใยขนาดเล็ก (microfibril) เรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ (amorphous)

2.1.3.2.2 ชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell wall, S) เป็นชั้นที่ประกอบไปด้วยเส้นใยขนาดเล็ก (microfibril) เป็นหลักและยังสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชั้น คือ ชั้น  $S_1$  ชั้น  $S_2$  และ ชั้น  $S_3$  ตามการเรียงตัวของเส้นใยขนาดเล็ก โดยชั้น  $S_1$  และ  $S_3$  มีขนาดบางและการเรียงตัวของเส้นใยขนาดเล็กจะเรียงตัวตามแนวอนเมื่อเทียบกับแกนของเซลล์ ส่วนชั้น  $S_2$  เป็นชั้นที่มีความหนามากที่สุดส่วนการเรียงตัวของเส้นใยขนาดเล็กจะเฉียงทำมุมกับแกนของเซลล์

### 2.1.3.3 ลูเมน (lumen)

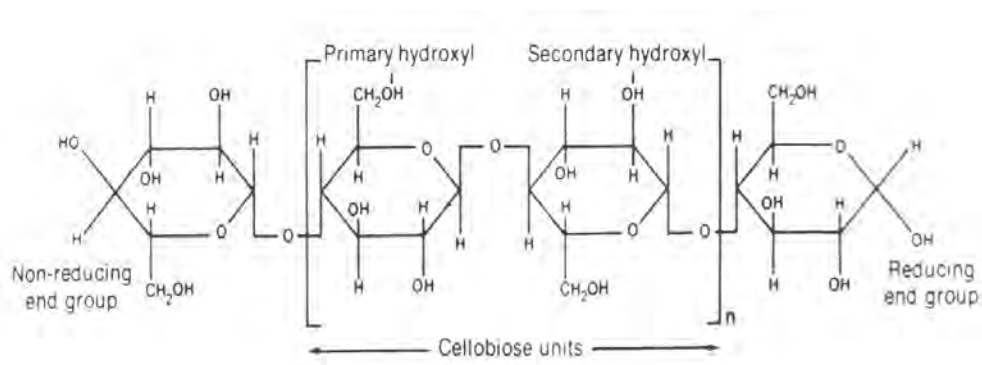
มีลักษณะเป็นท่ออยู่ใจกลางของเส้นใย อยู่ถัดจากผนังเซลล์เส้นใยชั้นที่ 2 หรือ 3 เข้าไป ลูเมนจะเป็นบริเวณที่ให้สารเคมีในกระบวนการต้มเยื่อซึมเข้ามา

### 2.1.4 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้

องค์ประกอบหลักทางเคมีของเนื้อไม้คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารแทรก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

#### 2.1.4.1 เซลลูโลส (cellulose)

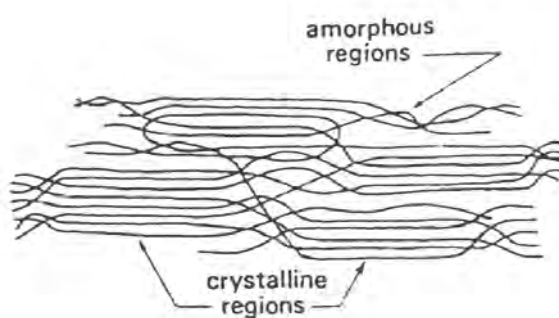
เซลลูโลส คือ คาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน และยังจัดเป็นพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) ชนิดหนึ่งด้วย เนื่องจากประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสจำนวนมากมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า-(1-4) ไกลโคซิดิก ( $\beta$ -1,4 glycosidic bond) มีสายโซ่เป็นเส้นตรง (linear chain) โมเลกุลของกลูโคสจะเชื่อมต่อกันที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 ของกลูโคสโมเลกุลหนึ่งกับคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสโมเลกุลถัดไป ดังแสดงในภาพที่ 2-4 สำหรับหน่วยย่อยพื้นฐานของเซลลูโลสจะเรียกว่า เซลโลไบโอส (cellobiose) ประกอบไปด้วยกลูโคส 2 โมเลกุลเชื่อมต่อกัน ความยาวของสายโซ่เซลลูโลส (degree of polymerization, DP) คือ จำนวนของหน่วยกลูโคสที่มาเชื่อมต่อกันเป็นพอลิเมอร์ พบว่าในเนื้อไม้ปกติมี DP ถึง 10,000 หน่วย [7-9]



ภาพที่ 2-4 โครงสร้างของเซลลูโลส [13]

ในไม้ส่วนใหญ่จะมีเซลลูโลสอยู่ร้อยละ 40-45 ของน้ำหนักเนื้อไม้แห้ง [8] โมเลกุลของเซลลูโลสจะมีการเรียงตัวรวมกลุ่มกันเป็นเส้นใยขนาดย่อย (microfibril) โดยบางส่วน

จะมีการเรียงตัวแบบเป็นผลึก (crystalline region) คือ โมเลกุลจะมีการจัดเรียงกันอย่างหนาแน่น เป็นระเบียบ ทำให้สารเคมีหรือตัวทำละลายเข้าทำปฏิกิริยาหรือซึมผ่านได้ยาก และบางส่วนของ โมเลกุลมีการเรียงตัวแบบอสัณฐาน (amorphous region) คือ มีลักษณะไม่เป็นระเบียบ เรียงตัว กันอย่างหลวมๆ ส่งผลให้เกิดการแทรกซึมของตัวทำละลายหรือสารเคมีได้ง่าย [13] ดังแสดงใน ภาพที่ 2-5



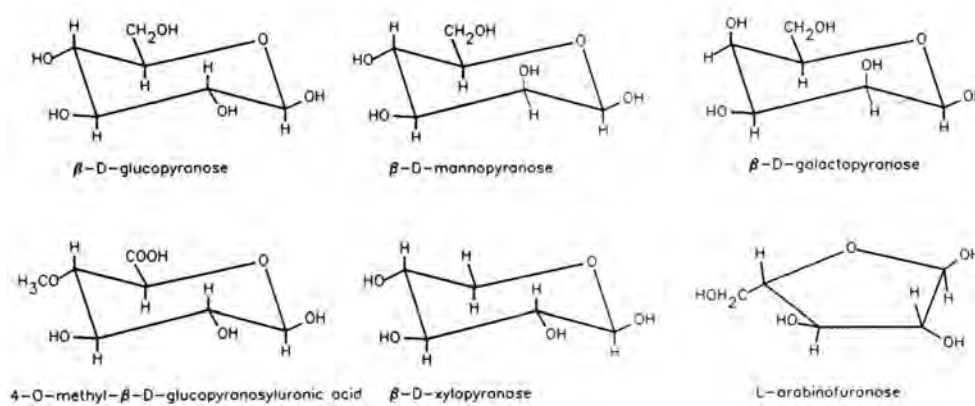
ภาพที่ 2-5 บริเวณส่วนที่เป็นผลึก (ส่วนที่เป็นระเบียบ) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (ไม่เป็นระเบียบ) ของเซลลูโลส [13]

#### 2.1.4.2 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์เช่นเดียวกับเซลลูโลส คือประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน แต่ต่างกับที่เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว หลายชนิด ได้แก่ กลูโคส (glucose) กาแลกโตส (galactose) แมนโนส (mannose) ซึ่งเป็นน้ำตาล โมเลกุลเดี่ยวที่มีคาร์บอน 6 อะตอม และไซโลส (xylose) กับอะราบิโนส (arabinose) ซึ่งเป็น น้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม และอาจมีกรดกลูคูโรนิก (glucuronic) เป็นองค์ประกอบได้เช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 2-6 เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นแบบกิ่งก้านไม่เหมือนกับเซลลูโลสที่มี โครงสร้างเป็นแบบเส้นตรง มีการเรียงตัวเป็นแบบผลึก (crystalline) น้อย ส่วนมากจะมีการเรียง ตัวเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous) ส่งผลให้สารเคมีในการต้มเยื่อแทรกซึมได้ง่าย ดังนั้นเฮมิ เซลลูโลสจึงถูกทำลาย (degradation) ได้ง่ายกว่าเซลลูโลส ส่วนความยาวสายไซโมเลกุล (DP) ของเฮมิเซลลูโลสจะอยู่ในช่วง 100-200 ต่อเฮมิเซลลูโลส 1 โมเลกุล [7]

เนื่องจากสายไซของเฮมิเซลลูโลสมีความเป็นกิ่งก้าน (branching chain) มาก ทำให้เกิดพันธะกับเส้นใยอื่นได้ดี ส่งผลให้เกิดการยึดเหนี่ยวของเส้นใยกันมากขึ้นในการขึ้น

แผ่นเป็นกระดาษ ดังนั้นเยื่อที่มีเฮมิเซลลูโลสสูงจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษโดยเฉพาะความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength) และความแข็งแรงต่อการหักพับของกระดาษ (folding endurance) และจะส่งผลผลิตเยื่อนั้นสูงขึ้นด้วยเนื่องจากเส้นใยไม่โดนทำลายมากในกระบวนการผลิตเยื่อแบบเคมี



ภาพที่ 2-6 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบในเฮมิเซลลูโลส [8]

ส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรตของเส้นใย คือ เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส จะถูกเรียกรวมกันว่าไฮโลเซลลูโลส (holocellulose) ซึ่งไฮโลเซลลูโลสสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ตามการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย ดังนี้

- แอลฟาเซลลูโลส ( $\alpha$ -cellulose) เป็นส่วนที่เรียกว่า เซลลูโลสที่แท้จริง ไม่สามารถละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้องได้ ในการผลิตเยื่อไม่สามารถแยกแอลฟาเซลลูโลสออกมาได้อย่างบริสุทธิ์ และมักจะมีน้ำตาลแมนแนน (mannan) และกลูโคแมนแนน (glucomannan) ปนด้วยเสมอ เนื่องจากทั้งสองตัวนี้ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 เช่นกัน โดยแอลฟาเซลลูโลสจะมีโมเลกุลของกลูโคสหรือ DP ตั้งแต่ 200 หน่วยขึ้นไป แอลฟาเซลลูโลสนั้นมีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

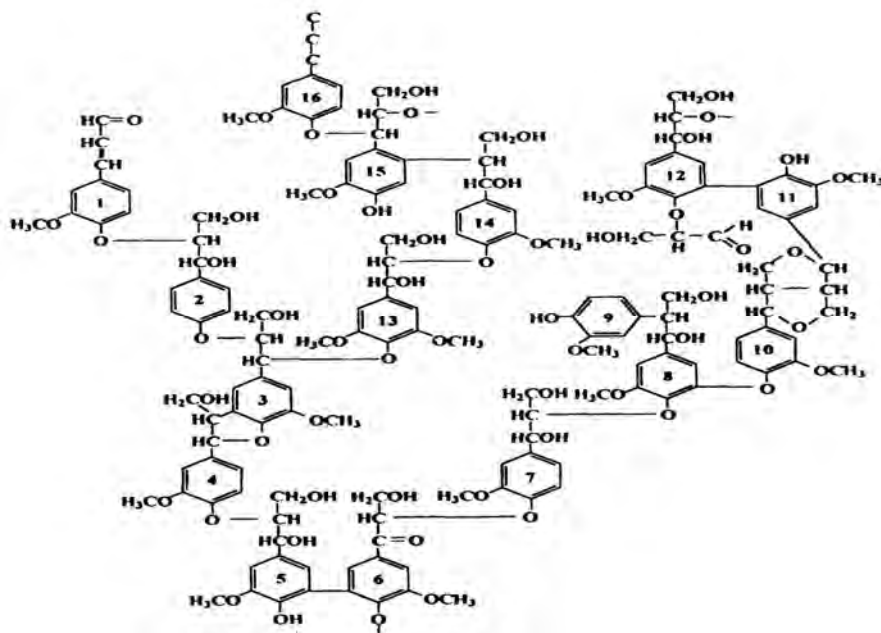
- เบต้าเซลลูโลส ( $\beta$ -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้อง และจะตกตะกอนในสารละลายที่มี

สภาพเป็นกรด เบต้าเซลลูโลสจึงแยกได้จากส่วนที่ตกตะกอนในต่าง ค่า DP ของเบต้าเซลลูโลสจะอยู่ระหว่าง 100-200 หน่วย

- แกมมาเซลลูโลส ( $\gamma$ -cellulose) เป็นเซลลูโลสซึ่งละลายในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้อง และละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรด แต่จะตกตะกอนได้โดยใช้แอลกอฮอล์ ดังนั้นแกมมาเซลลูโลสจึงแยกได้จากส่วนที่เป็นของเหลวในสารละลายต่าง ค่า DP ของแกมมาเซลลูโลสจะต่ำกว่า 10 หน่วย

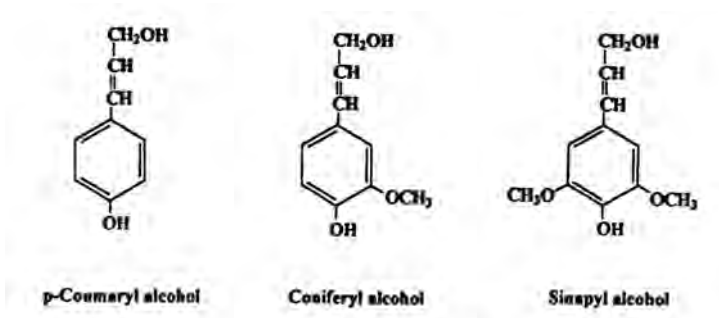
### 2.1.4.3 ลิกนิน (lignin)

ลิกนินเป็นองค์ประกอบของเนื้อไม้ประมาณร้อยละ 17-33 ของน้ำหนักเนื้อไม้แห้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของไม้ด้วย ลิกนินมีโครงสร้างที่ซับซ้อนดังแสดงในภาพที่ 2-7 ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่เนื้อไม้ คือ มีหน้าที่เหมือนกาวหรือตัวยึดทำให้เส้นใยแต่ละเส้นเชื่อมติดกันและช่วยต้านทานการทำลายจากพวกจุลินทรีย์ไม่ให้เนื้อไม้เกิดการเสื่อมสลาย ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนแบบสามมิติ ประกอบด้วยหน่วยของ เฟนิลโพรเพน (phenylpropane unit) มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบไม่เป็นระเบียบ (amorphous) มีความเข้มข้นมากบริเวณมิดเดิลแลเมลลา มีอุณหภูมิสภาพแก้ว (glass transition temperature) หรืออุณหภูมิที่เกิดการอ่อนตัว (softening temperature) ที่ประมาณ 130-150 องศาเซลเซียส [9]



ภาพที่ 2-7 โครงสร้างลิกนินที่พบในเนื้อไม้ spruce [9]

โมโนเมอร์ (monomer) พื้นฐานที่พบของลิกนินมี 3 รูปแบบคือ แบบ p-coumaryl alcohol แบบ coniferyl alcohol และแบบ sinapyl alcohol ดังแสดงในภาพที่ 2-8 โดยพวกหญ้าหรือลำต้นของพืชที่ไม่ให้เนื้อไม้ (non wood plant) จะพบโมโนเมอร์ทั้งสามแบบ ส่วนในไม้เนื้อแข็ง (hard wood) จะพบโมโนเมอร์แบบ coniferyl alcohol ร้อยละ 50-75 และแบบ sinapyl alcohol ร้อยละ 25-50 ส่วนไม้เนื้ออ่อนจะพบแบบ coniferyl alcohol เพียงอย่างเดียว [7, 9]

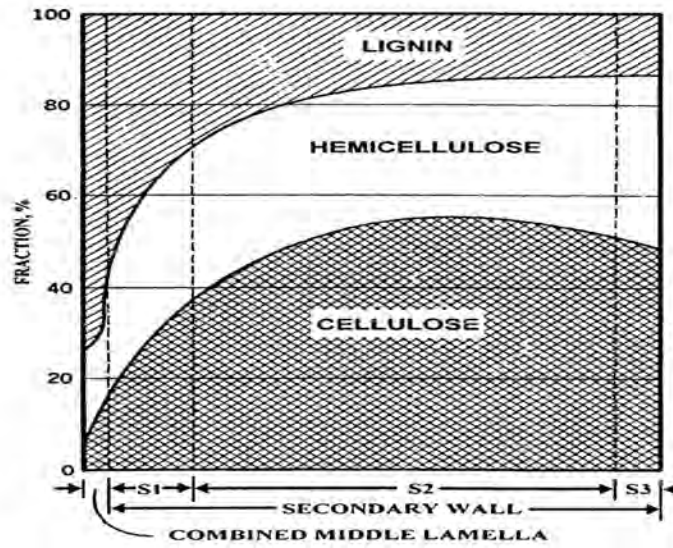


ภาพที่ 2-8 หน่วยโครงสร้างหลักของลิกนิน [9]

สำหรับการผลิตเยื่อแบบเคมีนั้น ลิกนินคือสิ่งที่ไม่ต้องการและจะมีการกำจัดลิกนิน (delignification) ออกจากไม้ เพราะลิกนินเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ไปขัดขวางการสร้างพันธะของเส้นใยในกระดาษ ส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงต่ำ และหากมีปริมาณสูงจะส่งผลให้กระดาษมีสีเหลือง [11]

ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของชั้นผนังเซลล์จะมีการแปรผันตามปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินดังแสดงในภาพที่ 2-9 โดยพบว่าปริมาณความเข้มข้นของลิกนินจะมีมากที่สุดที่ชั้นมิดเดิลลามลลา และต่ำสุดในชั้น S<sub>2</sub> และ S<sub>3</sub> ส่วนชั้น S<sub>2</sub> จะมีปริมาณเซลลูโลสสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากชั้น S<sub>2</sub> เป็นชั้นที่หนาที่สุดจึงมีปริมาณลิกนินอยู่มากที่สุด [7, 12]





ภาพที่ 2-9 องค์ประกอบทางเคมีของชั้นผนังเซลล์เส้นใย [12]

#### 2.1.4.4 สารแทรก (extractives)

สารแทรกเป็นสารที่มีความหลากหลาย แทรกอยู่เป็นองค์ประกอบของเนื้อไม้ เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดสี กลิ่น รส ในเนื้อไม้ และมีหน้าที่ตามแต่ชนิดของสารนั้นในเนื้อไม้ เช่น ทำหน้าที่ป้องกันการเสื่อมสลายของไม้ เป็นต้น ความหลากหลายของสารแทรกขึ้นอยู่กับชนิดของไม้หรือพืช ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารมอลิมเลกุลต่ำและอยู่ภายนอกเซลล์ สารแทรกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ สารแทรกที่ละลายน้ำได้กับสารแทรกที่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษ สารแทรกอาจส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษได้ เช่น ทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อหรือฟอกเยื่อมากขึ้น อาจทำให้เกิดตะกอนตามท่อหรืออุปกรณ์ในระบบการผลิต เกิดฟองมากขึ้นในระหว่างการล้างเยื่อทำให้เยื่อด่างสะอาดยากขึ้น และอาจทำให้เกิดพวดยางเหนียว (stickies) ทำให้กระดาษขาด กระทบการเดินกระดาษและทำให้กระดาษเสียหายได้

#### 2.1.5 กระบวนการผลิตเยื่อ (pulping process)

การผลิตเยื่อ คือ กระบวนการที่พยายามแยกเส้นใยจากชิ้นไม้ให้กลายเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ (individual fiber) โดยการแยกเส้นใยนั้นอาจมีการเอาลิกนินหรือไม่เอาลิกนินออกจากชิ้น

ไม้ก็ได้ ทั้งนี้เพื่อนำเส้นใยที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ [11] โดยกระบวนการผลิตเยื่อแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการใหญ่ๆ ดังนี้

#### 2.1.5.1 กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล

เป็นกระบวนการที่ใช้แรงกลในการแยกเส้นใยออกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ โดยอาจมีการใช้ความร้อน ความดันและอาจสารเคมีร่วมในกระบวนการด้วย การผลิตเยื่อเชิงกลให้ผลผลิตเยื่อ (pulp yield) สูงประมาณ 90-95% เนื่องจากไม่มีการเอาลิกนินออก ส่งผลให้การนำเยื่อที่ได้ไปฟอกต่อทำได้ยาก นอกจากนี้กระดาษที่ผลิตจากเยื่อเชิงกลเมื่อทิ้งไว้นานจะทำให้กระดาษกลับมามีสีเหลือง เนื่องจากลิกนินที่เหลืออยู่ทำปฏิกิริยากับแสง ความชื้น และความร้อนทำให้เกิดสีขึ้นนั่นเอง อย่างไรก็ตาม กระดาษที่ผลิตจากเยื่อเชิงกลจะมีค่าความทึบแสงสูง เนื่องจากเส้นใยมีขนาดสั้น ซึ่งเหมาะกับงานพิมพ์คุณภาพสูง [14]

#### 2.1.5.2 กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลกึ่งเคมี

เป็นการใช้วิธีการผลิตเยื่อเคมีร่วมกับการผลิตเยื่อเชิงกล โดยใช้สารเคมีเพื่อทำให้เส้นใยไม่มีการอ่อนตัวหรือละลายลิกนินบางส่วนออก แล้วทำการแยกเส้นใยโดยใช้แรงกล จึงทำให้ผลผลิตเยื่อและคุณสมบัติของเยื่อที่ได้อยู่ระหว่างเยื่อแบบเคมีและแบบเชิงกล โดยผลผลิตเยื่อกึ่งเคมีมีค่าประมาณร้อยละ 55-90 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง เส้นใยไม่มีความยืดหยุ่น (flexible) เท่ากับเยื่อเคมี แต่มีความยืดหยุ่นมากกว่าเยื่อเชิงกล ส่งผลให้เส้นใยมีการสร้างพันธะได้ดีกว่าจึงทำให้กระดาษที่ผลิตได้มีความแข็งแรงมากกว่าเยื่อเชิงกล การผลิตเยื่อเชิงกลกึ่งเคมีมีปริมาณลิกนินหลงเหลืออยู่ค่อนข้างมากและมักจะไม่นิยมนำมาฟอกเยื่อให้มีความขาวสว่างมากนัก เนื่องจากทำให้ขาวได้ยากและสิ้นเปลืองสารเคมี [12, 13]

#### 2.1.5.3 กระบวนการผลิตเยื่อเคมี

เป็นกระบวนการใช้สารเคมีละลายลิกนินภายในเนื้อไม้เพื่อทำให้เส้นใยแยกออกจากกัน อย่างไรก็ตามสารเคมีไม่เพียงแต่ละลายลิกนินเท่านั้น แต่ละลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสบางส่วนออกมาด้วย ส่งผลให้ผลผลิตเยื่อที่ได้จากวิธีนี้มีค่าประมาณ 40-50% เยื่อเคมีที่ผลิตได้ส่วนมากสามารถนำไปทำการฟอกเยื่อต่อได้ง่าย เนื่องจากปริมาณลิกนินหลงเหลืออยู่น้อย เยื่อที่ผลิตได้มีโอกาสกลับมาเป็นสีเหลือง (yellowing and brightness reversion) ต่ำกว่าเยื่อที่ผลิตจากเยื่อเชิงกล นอกจากนี้เยื่อเคมียังทำให้กระดาษมีความแข็งแรงสูง เนื่องจากความ

สมบูรณ์และความยาวของเส้นใยของเยื่อเคมีสูงกว่าเส้นใยของเยื่อเชิงกล โดยทั่วไปแล้ว กระบวนการผลิตเยื่อเคมียังสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

#### 2.1.5.3.1 กระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบบกรด (acidic pulping)

กระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบบกรดหรือเรียกว่ากระบวนการผลิตเยื่อแบบซัลไฟต์ (sulfite pulping) เนื่องจากใช้กรดซัลฟิวรัส ( $H_2SO_3$ ) และไฮออนไบซัลไฟต์ ( $HSO_3$ ) เป็นสารต้มเยื่อในการทำลายและละลายลิกนิน ข้อดีของการผลิตเยื่อแบบซัลไฟต์ คือ เยื่อที่ได้มีความขาวสว่างสูง จึงง่ายต่อการนำไปฟอกเยื่อต่อ ให้ผลผลิตเยื่อในการฟอกเยื่อสูงและการบดเยื่อทำได้ง่าย [12]

#### 2.1.5.3.2 กระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบบด่าง (alkaline pulping)

เป็นกระบวนการใช้ด่างในการต้มเยื่อ กลไกของการแพร่ของสารเคมีจะเริ่มต้นโดยสารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยาในเนื้อไม้ คือ การแทรกซึม (penetration) และการกระจายตัว โดยการแทรกซึมนี้ น้ำยาต้มเยื่อจะแทรกซึมผ่านรู (pore) เข้าไปในเนื้อไม้ ส่วนการกระจายตัวของสารเคมีที่ละลายได้เกิดขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของสารเคมีที่ต่างกัน โดยในการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดลิกนินออกจากเนื้อไม้ (delignification) เกิดขึ้นโดยน้ำยาต้มเยื่อจะกระจายตัวเข้าทำปฏิกิริยากับชิ้นไม้ โดยน้ำยาต้มเยื่อจะซึมผ่านผนังเซลล์และเข้าไปละลายลิกนินออกจากบริเวณมิดเดิลลามেলাที่จับยึดเส้นใยไว้ให้เส้นใยแตกออกจากกันกลายเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ จากนั้นสารเคมีจะทำปฏิกิริยากับลิกนิน สุกทำลิกนินและองค์ประกอบอื่นๆ ที่ทำปฏิกิริยาจะละลาย (dissolve) กลายเป็นของเหลวแล้วแยกตัวออกมาจากโครงสร้างเนื้อไม้ ซึ่งกระบวนการนี้เป็นที่นิยมเนื่องจากสามารถนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ทำได้ง่าย ตัวอย่างของกระบวนการนี้ได้แก่ กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา (soda pulping) และกระบวนการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ (kraft pulping) โดยในกระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดานั้น สารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นวิธีผลิตเยื่อแบบดั้งเดิม และนิยมใช้กับพืชที่ไม่ใช่เนื้อไม้ (non wood plant) ส่วนวิธีการผลิตเยื่อแบบคราฟต์นั้น พัฒนามาจากการผลิตเยื่อแบบโซดา โดยมีสารเคมีโซเดียมซัลไฟด์ ( $Na_2S$ ) ลงไปผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารต้มเยื่อ ทำให้เยื่อที่ผลิตจากวิธีคราฟต์มีความแข็งแรงสูง โดยการผลิตเยื่อแบบคราฟต์นี้สามารถใช้ผลิตเยื่อได้จากพืชหลายชนิด [12]

## 2.1.6 ปฏิกริยาขององค์ประกอบเคมีในเส้นใยในการผลิตเยื่อแบบต่าง

เนื่องจากลิกนินกับคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักของเส้นใย ดังนั้น ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตเยื่อเคมีแบบต่างเป็นดังนี้

### 2.1.6.1 ปฏิกริยาของลิกนิน

ปฏิกริยาของลิกนินในระหว่างการต้มเยื่อนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณการกระจายตัวของลิกนินในชั้นผนังเซลล์และชั้นมิดเดิลลาเมลลา ในชั้นของมิดเดิลลาเมลลานั้นส่วนใหญ่ประกอบด้วยลิกนินร้อยละ 70-80 แต่เนื่องจากความหนาของชั้นมิดเดิลลาเมลลาแคบกว่าชั้นทุติยภูมิของผนังเซลล์เส้นใย จึงทำให้มีปริมาณลิกนินอยู่ประมาณร้อยละ 20 ของลิกนินที่มีอยู่ทั้งหมดในเนื้อไม้ ส่วนในชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิจึงมีความหนาของชั้นที่มากกว่า จึงทำให้มีปริมาณลิกนินอยู่ประมาณร้อยละ 70-80 ของลิกนินในเนื้อไม้ทั้งหมด ฉะนั้นความแตกต่างของปริมาณลิกนินและตำแหน่งที่อยู่ของลิกนินนี้ ส่งผลให้มีความแตกต่างของการเกิดปฏิกริยาของลิกนิน [12]

ชิ้นไม้ต้องมีการถูกแช่ (impregnation) จนทั่วด้วยน้ำยาต้มเยื่อก่อนที่จะมีปฏิกริยาดึงเอาลิกนินออก (delignification) จากเนื้อไม้ ตามอุดมคติแล้วน้ำยาต้มเยื่อจะแทรกซึมไปตามรู (pore) ของผนังเซลล์เส้นใย ดังนั้นการที่น้ำยาต้มเยื่อจะแทรกซึมเข้าไปในชั้นมิดเดิลลาเมลลาได้ น้ำยาต้มเยื่อต้องไหลผ่านทางเซลล์ลูเมนและรูของผนังเส้นใย ทำให้ลิกนินที่อยู่ในชั้นของผนังเซลล์ทุติยภูมิถูกละลายก่อนลิกนินที่อยู่ในชั้นมิดเดิลลาเมลลา ส่งผลให้ลักษณะของชิ้นไม้หลังต้มยังมีลักษณะเป็นชิ้นไม้เหมือนเดิมแต่มีการละลายลิกนินออกไปแล้วร้อยละ 80 สาเหตุที่ชิ้นไม้ยังมีลักษณะเหมือนชิ้นไม้เหมือนเดิมนั้น เนื่องจากลิกนินตรงชั้นมิดเดิลลาเมลลาที่ยึดเส้นใยระหว่างกันไว้อยู่จนถึงการละลายลิกนินขั้นสุดท้าย ซึ่งการดึงเอาลิกนินออกจากเนื้อไม้ของการผลิตเยื่อแบบคราฟท์แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือ ช่วง initial delignification, bulk delignification และ residual delignification [12]

2.1.6.1.1 initial delignification เป็นช่วงของการที่ชิ้นไม้สับถูกแช่ด้วยน้ำยาต้มเยื่อก่อนที่จะถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อ ช่วงนี้จะมีการละลายลิกนินออกได้ประมาณร้อยละ 20-25 ของลิกนินทั้งหมด และเป็นช่วงที่ไอออนไฮโดรซัลไฟด์ ( $\text{SH}^-$ ) ของการผลิตเยื่อแบบคราฟท์ช่วยทำให้เกิดการแทรกซึมของสารเคมีได้ดีก่อนที่จะเข้าสู่ช่วง bulk delignification ส่งผลทำให้ช่วยป้องกันคาร์โบไฮเดรตสลายตัวและป้องกันลิกนินเกิด condensation ในช่วงนี้ลิกนินยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เพียงแต่ลิกนินเกิดการแตกย่อยเป็นชิ้นเล็กๆ

2.1.6.1.2 bulk delignification เป็นช่วงที่มีอัตราการละลายลิกนินออกเพิ่มขึ้น ทำให้มีการละลายลิกนินออกได้ประมาณร้อยละ 70-80 ของลิกนินทั้งหมด การละลายจะเริ่มละลายลิกนินในชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิไปยังลิกนินในชั้นมิดเดิลลาเมลลา การละลายลิกนินออกในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนไฮดรอกไซด์ ไอออนซัลไฟด์และอนุหนุมิ อัตราการละลายลิกนิน ออกจะสูงเมื่อมีความเข้มข้นของไอออนทั้งสองสูง แต่จะมีอัตราการละลายลิกนินออกต่ำเมื่อมีความเข้มข้นของการละลายลิกนินที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการละลายลิกนินออกจากชั้นไม้ที่ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นไม้ คือชั้นไม้ที่มีความหนามากกว่าจะส่งผลให้การละลายลิกนินออกจากชั้นไม้ได้ยากกว่าชั้นไม้ที่มีความหนาน้อยกว่า

2.1.6.1.3 residual delignification เป็นช่วงหลังจาก bulk delignification ที่มีการละลายลิกนินออกจากชั้นไม้ไปแล้วร้อยละ 90 ของลิกนินทั้งหมด ทำให้ช่วง residual delignification นี้มีอัตราการละลายลิกนินออกจากชั้นไม้ได้ช้าลง การใช้ปริมาณต่างจนหมดหลังจากการต้มเยื่อจะก่อให้เกิดลิกนิน condensation ดังนั้นการต้มเยื่อจะต้องมีปริมาณต่างหลงเหลือในน้ำยาต้มเยื่อหลังจากการต้มเยื่อ โดยปกติควรเหลือประมาณ 5-15 กรัมต่อลิตร

### 2.1.6.2 ปฏิกริยาของคาร์บอนไฮเดรต

ในระหว่างการต้มเยื่อแบบต่างไม่เพียงแต่จะเกิดปฏิกริยาการละลายลิกนิน ออกจากชั้นไม้ แต่ยังส่งผลให้คาร์บอนไฮเดรตถูกทำลายอีกด้วย โดยในช่วงของการละลายลิกนินช่วง initial delignification จะส่งผลให้กาแลคโตกลูโคแมนแนน (galactoglucomannan) ถูกละลายที่อุณหภูมิ 100-130 องศาเซลเซียส ส่วนไซแลน (xylan) จะถูกละลายที่อุณหภูมิสูงเช่นที่อุณหภูมิมากกว่า 140 องศาเซลเซียส ซึ่งส่วนใหญ่แล้วเฮมิเซลลูโลสเหล่านี้จะมีอัตราถูกทำลายในช่วง initial delignification แต่จะมีการถูกทำลายช้าลงในช่วงของ bulk delignification และจะมีอัตราการถูกทำลายมากขึ้นในช่วงของ residual delignification ส่วนเซลลูโลสจะถูกทำลายด้วยในระหว่างการต้มเยื่อแบบต่างประมาณร้อยละ 10-15 ส่วนใหญ่แล้วเซลลูโลสจะถูกทำลายในช่วง residual delignification ส่งผลให้ผลผลิตเยื่อมีแนวโน้มลดลง และส่งผลให้ DP ของสายโซ่เซลลูโลสลดลง ก่อให้เกิดเส้นใยมีความอ่อนแอที่ผลผลิตเยื่อต่ำ [12]

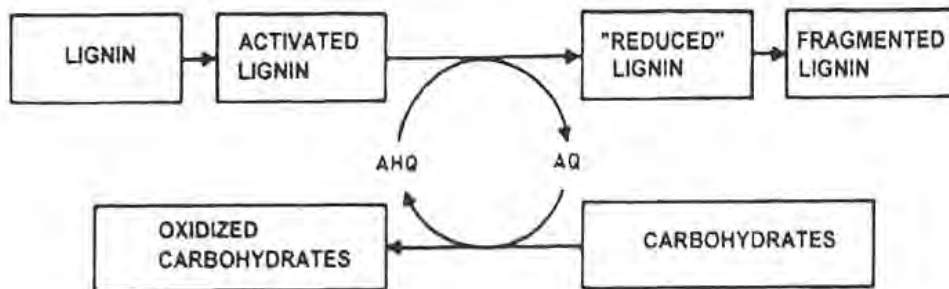
### 2.1.7 แอนทราควิโนน

แอนทราควิโนนถูกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในการผลิตเยื่อตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1972 แต่ไม่ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย จนกระทั่งปี ค.ศ. 1990 เป็นต้นมาเริ่มมีการนิยมนำมาใช้มากขึ้น

เนื่องจากแอนทราควิโนนทำหน้าที่เป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสารลิกนินออกจากเนื้อไม้ได้ดี นอกจากนี้แอนทราควิโนนยังทำหน้าที่ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาฟิลลิง (peeling reaction) ของคาร์โบไฮเดรตในระหว่างการผลิตเยื่อ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ตัดทอนหน่วยของน้ำตาลในเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสออก ซึ่งประโยชน์ที่ได้จากการใช้แอนทราควิโนน มีดังนี้ [15, 16]

- ช่วยลดปริมาณการใช้ต่าง ทำให้ลดพลังงานในการนำสารกลับมาใช้ใหม่ (Recovery)
- ลดการใช้ซัลไฟดิตี (sulfidity) ในการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ ทำให้มีกลิ่นเหม็นลดลง
- ช่วยประหยัดพลังงานเนื่องจากช่วยลดอุณหภูมิในการผลิตเยื่อ
- เพิ่มผลผลิตเยื่อและความแข็งแรงของเยื่อ
- ช่วยเพิ่มหน่วยการผลิตเนื่องจากช่วยลดเวลาในการผลิตเยื่อได้มากขึ้น
- ทำให้สามารถฟอกเยื่อได้ง่ายขึ้น ทำให้เยื่อมีความขาวสว่างมากขึ้น ลดต้นทุนของสารเคมีที่ใช้ฟอก

ส่วนการทำปฏิกิริยาของแอนทราควิโนนนั้น แอนทราควิโนนจะเริ่มทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับคาร์โบไฮเดรต ทำให้แอนทราควิโนนเปลี่ยนไปเป็นแอนไฮโดรแอนทราควิโนน จากนั้นแอนไฮโดรแอนทราควิโนนจะไปทำปฏิกิริยารีดักชันกับลิกนิน ทำให้ลิกนินแตกออกเป็นโมเลกุลย่อย แล้วแอนไฮโดรแอนทราควิโนนจะเปลี่ยนตัวเองกลับมาเป็นแอนทราควิโนนอีกครั้ง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สามารถลดการใช้แอนทราควิโนนได้ เนื่องจากแอนทราควิโนนมีการทำปฏิกิริยาหมุนเวียนกลับมาใหม่ในขณะที่ต้มเยื่อได้หลายครั้ง [12] ดังแสดงในภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 ลักษณะการทำปฏิกิริยาของแอนทราควิโนน [12]

### 2.1.8 เมทานอล

เมทานอลเป็นสารตัวทำละลายอินทรีย์ ส่วนมากใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อแบบใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ (organosolve pulping process) โดยที่ผ่านมานั้นมีจุดสนใจใช้เมทานอลร่วมกับการผลิตเยื่อแบบต่าง (alkaline pulping) และมีแนวโน้มที่จะมีการใช้เพิ่มขึ้นในอนาคต เนื่องจากกระบวนการนำเมทานอลกลับมาใช้ใหม่สามารถทำได้ง่ายโดยวิธีการกลั่น การใส่เมทานอลร่วมเป็นสารต้มเยื่อด้วยนั้นจะทำให้เยื่อที่ผลิตได้มีปริมาณลิกนินหลงเหลืออยู่น้อยลง เนื่องจากเมทานอลทำให้การแทรกซึมของสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อดีขึ้น นอกจากนี้เมทานอลยังช่วยป้องกันการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรตส่งผลให้มีผลผลิตเยื่อสูงขึ้น กระบวนการผลิตเยื่อที่มีการใช้ต่างร่วมกับเมทานอลและสารแอนทราควิโนนจะเรียกว่ากระบวนการผลิตเยื่อแบบออแกโนเซล (organocell pulping) [17-19]

### 2.1.9 การบดเยื่อ (beating)

การบดเยื่อเป็นการใช้แรงกลในการปรับสภาพเส้นใย ทำโดยให้น้ำเยื่อที่มีความเข้มข้นสูงไหลผ่านช่องแคบระหว่างตัวหมุน (rotor) กับตัวหยุดอยู่กับที่ (stator) ของเครื่องบดเยื่อ ทำให้เกิดแรงเชิงกลและแรงอัดส่งผลให้เส้นใยเกิดการเสียดสีกันระหว่างเส้นใยและตัวเครื่องบดเยื่อ ชั้นของผนังเซลล์เส้นใยจึงเกิดการปริแตกส่งผลให้การดูดซับน้ำของเส้นใยดีขึ้น เส้นใยพองตัวดีขึ้น เส้นใยจึงมีความยืดหยุ่นและนุ่มขึ้น ส่งผลให้เมื่อนำเยื่อที่ผ่านการบดเยื่อไปผลิตกระดาษกระดาษจึงมีความหนาแน่นสูงขึ้น เนื่องจากเส้นใยมีการยุบตัวแนบชิดกันได้ดีขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวของเส้นใยมีการปริแตกมากขึ้น ส่งผลให้มีพื้นที่สัมผัสระหว่างเส้นใยในการสานตัวในการขึ้นแผ่นกระดาษได้มากขึ้นอีกด้วย

อากัปริยาของเส้นใยในระหว่างการบดเยื่อแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้น คือ ชั้นแรกเส้นใยเปียกน้ำและดูดซับน้ำทำให้เกิดการบวมตัวของเส้นใย ส่วนที่เป็นผลึกของเส้นใย (crystalline region) โดนทำลาย ส่งผลให้น้ำสามารถเข้าไปด้านในและบวมตัวได้ดี ชั้นที่สองเกิดเส้นใยแตกแขนง (fibrillation) ทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวของเส้นใย ดังนั้นจึงช่วยปรับปรุงความแข็งแรงระหว่างพันธะของเส้นใยในกระดาษ ชั้นที่สามเกิดการแยกของชั้นผนังเซลล์ เช่นเกิดการแยกระหว่างชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิและชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิ ทำให้เส้นใยมีความยืดหยุ่น (flexible) ได้ดี

โดยทั่วไปแล้วการบดเยื่อลดค่าความเป็นอิสระของเยื่อ (freeness) ช่วยปรับปรุงพันธะเส้นใยให้ดีขึ้น ทำให้ความแข็งแรงของกระดาษที่ขึ้นอยู่กับพันธะของเส้นใยมีค่าสูงขึ้น เช่น

ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength) และความแข็งแรงต่อการหักพับ (folding endurance) แต่ทำให้ความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear strength) ลดลง เนื่องจากความแข็งแรงต่อแรงฉีกขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและความยาวของเส้นใย เป็นส่วนใหญ่ การบดเยื่อส่งผลให้เส้นใยมีขนาดสั้นลงจึงส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่าลดลง [7, 9, 13]

## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุพิตา สุขจำเริญ [20] ได้ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ (พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์) โดยนำต้นข้าวโพดแต่ละส่วน คือ ส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพด ส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพดและต้นข้าวโพดทั้งต้นมาผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา โดยต้มเยื่อโดยใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากัน ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต้นข้าวโพดทั้งต้นจะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ ส่วนเปลือกนอกและส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพด ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบสมบัติด้านความแข็งแรงของแผ่นทดสอบพบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากส่วนต้นข้าวโพดทั้งต้นและส่วนแกนกลางมีค่าสูงกว่าส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพด และเมื่อทำการศึกษากาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ทั้งต้นด้วยวิธีโซดา โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ถึง 30 ของน้ำหนักข้าวโพดแห้ง ทำการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากส่วนต้นข้าวโพดทั้งต้นจากพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ คือ การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 เนื่องจากแผ่นทดสอบมีความแข็งแรงสูงสุด โดยมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุของกระดาษสูงสุด

Ahmed และคณะ [21] ได้ศึกษาวิธีการผลิตเยื่อและกระดาษจากต้นข้าวโพดด้วยวิธีการต้มเยื่อแบบโซดา โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ระหว่าง 12-15% ของน้ำหนักข้าวโพดแห้ง ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 นาที จากการทดลองพบว่า ภาวะในการต้มเยื่อที่เหมาะสมคือ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ 14% ของน้ำหนักข้าวโพดแห้ง ซึ่งเป็นภาวะที่ทำให้กระดาษที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพดมีสมบัติด้านความแข็งแรงดีที่สุด

Khristova และคณะ [15] ได้ศึกษาการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นของต้นทานตะวัน โดยมีการเติมแอนทราควิโนนเป็นสารต้มเยื่อด้วย ภาวะที่ใช้ในการต้มเยื่อ คือ อุณหภูมิ 170 องศา



เซลเซียส ระยะเวลาในการต้มเยื่อ 3.5 ชั่วโมง อัตราส่วนของเหลวต่อน้ำหนักแห้งของต้นทานตะวัน 5:1 ใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ระหว่าง 14-16% ของน้ำหนักลำต้นทานตะวันแห้ง และใช้ปริมาณสารแอนทราควิโนน 0.13% ของน้ำหนักลำต้นทานตะวันแห้ง พบว่า การผลิตเยื่อแบบโซดาโดยเติมสารแอนทราควิโนนช่วยเพิ่มอัตราการกำจัดลิกนิน เพิ่มผลผลิตเยื่อที่ได้ รวมถึงช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษให้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการผลิตเยื่อแบบโซดาที่ใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากัน

Shatalov และ Pereira [18] ได้ศึกษาการผลิตเยื่อแบบใช้ตัวทำละลายในการต้มเยื่อจากต้นอ้อ (*Arundo donax* L.) พบว่า การต้มเยื่อแบบต่างที่มีการใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลร่วมเป็นสารต้มเยื่อด้วย (alkali-methanol-AQ pulping) ส่งผลให้เยื่อที่ได้มีผลผลิตเยื่อสูงขึ้น ค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ (คัปานัมเบอร์-kappa number) ลดลง เมื่อทำการเปรียบเทียบกับการผลิตเยื่อแบบคราฟต์

Nakano และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาการผลิตเยื่อแบบต่างเติมเมทานอล (alkali-methanol pulping) จากไม้เบิร์ช (birch) และบีช (beech) พบว่า ผลผลิตเยื่อที่ได้มีค่าสูงขึ้นร้อยละ 4-5 และที่ปริมาณลิกนินหลงเหลืออยู่ในเยื่อเท่ากันมีเพียงค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกเท่านั้นที่มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถล้างเมทานอลออกจากเยื่อได้ง่ายและสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่โดยการนำน้ำดำ (black liquor) มาเข้าสู่กระบวนการระเหย

Mogallon [23] ได้ทำการศึกษาการใช้เมทานอลเติมลงไปในการบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาจากกากอ้อย พบว่าสามารถผลิตเยื่อได้คุณภาพดีที่สุดในเมื่อใช้เมทานอลร้อยละ 30 ของน้ำยาต้มเยื่อและใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 12 ของน้ำหนักกากอ้อย โดยใช้อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 15 นาที

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.1.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1.1 ลำต้นข้าวโพดไร่ชนิดหัวแข็ง (flint corn, *Zea Mays indurata*) จากจังหวัดสระบุรี ซึ่งเก็บเกี่ยวผลผลิตช่วงเดือนเมษายน พ.ศ. 2552

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

3.1.1.3 แอนทราควิโนน ( $C_{14}H_8O_2$ ) เกรดห้องปฏิบัติการ ความบริสุทธิ์ 97% Sigma-Andrich, USA

3.1.1.4 เมทานอล ( $CH_3OH$ ) เกรดห้องปฏิบัติการ ความบริสุทธิ์ 99.95% Unicorn star, Thailand

3.1.1.5 กระดาษกรองเบอร์ 4; Whatman International Ltd., England

##### 3.1.2 เครื่องมือ

3.1.2.1 เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง (0.1-21 kg); รุ่น GX-20K, AND, Japan

3.1.2.2 เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (0.005-4,000 g); รุ่น TB-4002, Denver Instrument, Germany

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

3.1.2.4 ตู้อบ (hot air oven); Venticell, Germany

3.1.2.5 เครื่องต้มเยื่อ (autoclave digester); Universal Engineering, India

3.1.2.6 เครื่องตีกระจายเยื่อ (disintegrator); Adirondack Machine Corporation, USA

3.1.2.7 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (Fiber Quality Analyzer, FQA); Optest Equipment Inc., Canada

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

3.1.2.9 เครื่องวัดค่าการระบายน้ำ (freeness tester); รุ่น LTDA, Regmed Industria Technica de Frecisao, Brazil

3.1.2.10 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (sheet former); รุ่น Rapid-Köthen Blattbildner, PTI Laboratory Equipment, Austria

3.1.2.11 เครื่องคัดกรองเยื่อ

3.1.2.12 เครื่องวัดความหนาของกระดาษ (thickness tester); Frank, Germany

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

3.1.2.14 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีก (elmendorf tearing resistance tester); รุ่น Protear, Thwing-Albert Instrument, USA

3.1.2.15 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength tester); รุ่น Lorentzen & Wettre, Sweden

3.1.2.16 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง; รุ่น Color Touch PC, Technidyne Corporation, USA

3.1.2.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM); รุ่น JEOL JSM-5410LV, Japan

3.1.2.18 กระบอกลดขนาด 25, 100, 1000 มิลลิลิตร

3.1.2.19 ปีกเกอร์ขนาด 25, 50, 250, 500 มิลลิเมตร

3.1.2.20 เทอร์โมมิเตอร์

## 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพด โดยการเติมแอนทราควิโนนและ/หรือเมทานอล ศึกษาอิทธิพลของแอนทราควิโนนและเมทานอลที่มีต่อการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพด รวมถึงทำการเปรียบเทียบระหว่างการผลิตเยื่อแบบโซดากับการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพด ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดมีดังนี้

**3.2.1 การทดลองตอนที่ 1: ทำการผลิตเยื่อวิธีโซดาจากลำต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เพื่อใช้เป็นการทดลองควบคุม**

### 3.2.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

#### 3.2.1.1.1 การเตรียมต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ทำการตัดต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์หลังจากการเก็บเกี่ยวฝักข้าวโพดเรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในภาพที่ 3-1 โดยจะทำการตัดต้นข้าวโพดในส่วนของลำต้นตั้งแต่ส่วนที่พื้นดินขึ้นไปจนถึงความยาวประมาณ 60-90 เซนติเมตร จากนั้นทำการลอกเปลือกหุ้มลำต้นข้าวโพดออก แล้วนำไปทำความสะอาดดังแสดงในภาพที่ 3-2

#### 3.2.1.1.2 การเตรียมชิ้นไม้สำหรับการผลิตเยื่อ

นำต้นข้าวโพดที่ทำการลอกเปลือกและล้างทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วมาทำการตัดเป็นท่อนเล็กๆ ขนาดท่อนละประมาณ 2.5-4.0 เซนติเมตร โดยตัดส่วนที่เป็นข้อของลำต้นข้าวโพดทิ้ง ดังแสดงในภาพที่ 3-3 จากนั้นนำไปตากแดดให้แห้ง คำนวณหาความชื้นของชิ้นไม้ตามมาตรฐาน TAPPI T 258 om-02 [24] หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักชิ้นไม้ 150 กรัม น้ำหนักแห้งแล้วบรรจุใส่ถุง ปิดปากถุงเพื่อรอการผลิตเยื่อต่อไป



ภาพที่ 3-1 ลักษณะของลำต้นข้าวโพดที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 3-2 ลักษณะของลำต้นข้าวโพดที่ผ่านการลอกเปลือก



ภาพที่ 3-3 ลักษณะของชิ้นลำต้นข้าวโพดที่ผ่านการตัดเป็นท่อน

### 3.2.1.2 การผลิตเยื่อแบบโซดาเพื่อใช้ในการทดลองควบคุม

นำชิ้นไม้สับของลำต้นข้าวโพดมาทำการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา โดยใช้ภาวะในการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับร้อยละต่างๆ ดังนี้ 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ทำการทดลอง 2 ซ้ำ (replicate) โดยใช้ภาวะในการต้มเยื่อดังนี้ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 9 ต่อ 1 ใช้เวลาในการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 120 นาที โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.1.2.1 นำชิ้นไม้ข้าวโพดมาบรรจุลงในบอมบ์ (bomb) ที่จะใช้เป็นภาชนะในการต้มเยื่อดังแสดงในภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 บอมบ์ (bomb) สำหรับบรรจุท่อนข้าวโพดในการต้มเยื่อ

3.2.1.2.2 ทำการคำนวณปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพิ่ม ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก หลังจากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำที่คำนวณได้ลงในบอมบ์

3.2.1.2.3 ทำการปิดฝาบอมบ์ให้แน่นและนำบอมบ์เข้าเครื่องต้มเยื่อ (autoclave digester) ดังแสดงในภาพที่ 3-5 เปิดสวิตซ์ทำความร้อน (heater) และเริ่มทำการจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายในของหม้อต้มเยื่อเท่ากับ 120 องศาเซลเซียสจนกระทั่งครบเวลา 120 นาที หลังจากนั้นทำการปล่อยน้ำดำ (black liquor) ออกจากบอมบ์และเก็บตัวอย่างน้ำดำเพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณต่างที่หลงเหลือ (residual alkali) หลังจากการต้มเยื่อตามมาตรฐาน SCAN standard N33:94 นำบอมบ์ออกจากเครื่องต้มเยื่อ ให้น้ำหล่อให้บอมบ์เย็นและทำการเปิดฝาบอมบ์เอาเยื่อที่ต้มเสร็จออกจากบอมบ์



ภาพที่ 3-5 เครื่องต้มเยื่อ (autoclave digester)

3.2.1.2.4 ล้างเยื่อเพื่อเอาน้ำดำและสารเคมีออกจากเยื่อ และเนื่องจากการต้มเยื่อด้วยวิธีเคมี หลังจากการต้มเยื่อเสร็จแล้วเส้นใยยังไม่เป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ดังแสดงในภาพที่ 3-6 จึงต้องมีการใช้แรงกลช่วย ดังนั้นจึงนำเยื่อที่ล้างสะอาดแล้วมาทำการตีกระจายเยื่อด้วยเครื่องตีกระจายเยื่อ (disintegrator) ดังแสดงในภาพที่ 3-7 เพื่อให้กลายเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ที่ 5000 รอบ



ภาพที่ 3-6 ลักษณะเยื่อที่ออกจากบอมบ์หลังการต้มเยื่อ

3.2.1.2.5 นำเยื่อที่ผ่านการตีกระจายมาทำการคัดกรองขนาดด้วยเครื่องคัดกรองขนาด (screener) เพื่อทำการแยกส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ (reject) ออก นำส่วนที่เป็นเยื่อมาทำการปั่นแห้งให้เยื่อหมาด ซึ่งน้ำหนักเยื่อรวมที่ได้ทั้งหมดแล้วแบ่งเยื่อออกมาหาปริมาณความชื้นของเยื่อตามมาตรฐาน TAPPI T 258 om-02 [24] เพื่อนำมาคำนวณหาร้อยละผลผลิตของเยื่อ (% pulp yield) ทำการเก็บเยื่อใส่ถุงและปิดปากถุงแช่ตู้เย็นเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป เช่น การ



บดเยื่อ (beating) การวิเคราะห์หาค่าดัชนีเบตต้า (kappa number) และองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อหลังจากการต้มเยื่อ นำส่วนที่ไม่เป็นเยื่อทั้งหมดมาทำการอบที่อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงแล้วนำมาชั่งน้ำหนักแห้ง ทำการเปรียบเทียบกับน้ำหนักชิ้นไม้แห้งทั้งหมดที่ใส่ลงไปเพื่อคำนวณหาร้อยละส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ (% reject)



ภาพที่ 3-7 เครื่องตีกระจายเยื่อ (disintegrator)

### 3.2.1.3 การบดเยื่อ (beating)

นำเยื่อที่ผ่านการต้มเยื่อของแต่ละภาวะมาทำการบดเยื่อโดยใช้เครื่องบดเยื่อ (valley beater) ดังแสดงในภาพที่ 3-8 โดยวิธีการบดเยื่อจะทำตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-01 [24] โดยใช้ระยะเวลาในการบดเยื่อ 4 นาที เพื่อให้ได้ค่าความเป็นอิสระของเยื่อ (freeness) ข้าวโพดที่ออกมาในช่วง  $250 \pm 20$  มิลลิลิตร

3.2.1.3.1 ทำการคำนวณซึ่งเยื่อข้าวโพด 360 กรัม น้ำหนักแห้ง ใส่ลงเครื่องบดเยื่อ ปริมาณน้ำที่ต้องเติมให้มีปริมาตรรวมทั้งหมด 23 ลิตร โดยร้อยละความเข้มข้นของเยื่อ (% consistency) จะเท่ากับ 1.56 ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก ทำการเปิดเครื่องโดยไม่แขวนตุ้มน้ำหนัก (ถือว่ายังไม่ได้เป็นการบดเยื่อ) ให้เยื่อกระจายเป็นระยะเวลา 5 นาที พอดครบ 5 นาทีแล้ว จะทำการเก็บน้ำเยื่อก่อนการบดเยื่อไว้ชิ้นแผ่นและวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใย (fiber morphology) 2500 มิลลิลิตร และทำการหาค่าความเป็นอิสระของเยื่อ (freeness) ก่อนการบดเยื่อตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-94 [24]





ภาพที่ 3-8 เครื่องบดเยื่อ (valley beater)

3.2.1.3.2 ทำการบดเยื่อโดยแขวนลูกตุ้มน้ำหนักของเครื่องบดเยื่อ โดยใช้ เวลา 4 นาที หลังจากนั้นทำการเก็บน้ำเยื่อไว้ขึ้นแผ่นและวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใยหลังการบด เยื่อ และหาค่าความเป็นอิสระของเยื่อหลังการบดเยื่อตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-94 [24]

#### 3.2.1.4 การทดสอบสมบัติของเยื่อ

3.2.1.4.1 คัปปานัมเบอร์ (kappa number) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณ ลิกนินที่หลงเหลืออยู่ในเยื่อ หรือเป็นความสามารถในการฟอกเยื่อของการผลิตเยื่อ โดยวิธีการ วิเคราะห์ในการทดลองนี้ใช้มาตรฐาน TAPPI T 236 om-99 [24] ในการวิเคราะห์หาค่าคัปปานอร์ ทำการทดสอบอย่างละ 2 ซ้ำต่อ 1 ภาวะการทดลอง โดยถ้าค่าคัปปานัมเบอร์มีค่าน้อยแสดงว่าเยื่อ ที่ผลิตได้มีลิกนินหลงเหลืออยู่ในเยื่อน้อย เยื่อที่ได้จะมีความขาวสว่างสูง ในทางตรงกันข้ามถ้าเยื่อ มีค่าคัปปานัมเบอร์สูงแสดงว่ามีลิกนินหลงเหลืออยู่ในเยื่อสูง เยื่อที่ได้จะมีความขาวสว่างต่ำ

3.2.1.4.2 ความเป็นอิสระของเยื่อ (freeness) คือ ความสามารถในการ ระบายน้ำ (drainage) ของเส้นใย หรือการอุ้มน้ำของเส้นใย โดยการทดสอบจะทำตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-04 [24] มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร ทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดความเป็นอิสระของ เยื่อ (freeness tester) แสดงในภาพที่ 3-9 โดยนำน้ำเยื่อจากข้อ 3.2.1.3.1 และข้อ 3.2.1.3.2 มา ทำการหาค่าความเป็นอิสระของเยื่อ ถ้าค่าความเป็นอิสระของเยื่อสูงแสดงว่าการระบายน้ำของ เยื่อเร็ว การอุ้มน้ำของเส้นใยมีน้อย แต่ถ้าค่าความเป็นอิสระของเยื่อต่ำแสดงว่าการระบายน้ำของ เยื่อช้า การอุ้มน้ำของเส้นใยสูง



ภาพที่ 3-9 เครื่องวัดความเป็นอิสระของเยื่อ (freeness tester)

3.2.1.4.3 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ เป็นการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อที่ผลิตได้จากภาวะต่างๆ รวมถึงวัตถุดิบเริ่มต้นด้วย โดยจะวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลสและลิกนินที่เหลือในเยื่อตามมาตรฐานดังนี้ คือ

- ไฮโดรเซลลูโลส ตามวิธี Acid chlorite ของ Browing [25]
- แอลฟาเซลลูโลส ตามมาตรฐาน TAPPI T222 om-88 [24]
- ลิกนิน ตามมาตรฐาน TAPPI T222 om-88 [24]

3.2.1.4.4 ปริมาณด่างที่หลงเหลือ (residual alkali) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณด่างที่หลงเหลือของน้ำดำ (black liquor) หลังจากการต้มเยื่อ โดยใช้มาตรฐานของ SCAN standard N33:94 ในการวิเคราะห์และทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้งของแต่ละภาวะ

3.2.1.4.5 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย (fiber morphology) นำน้ำเยื่อที่ยังไม่ผ่านการบดเยื่อและผ่านการบดเยื่อจากข้อ 3.2.1.3.1 และข้อ 3.2.1.3.2 มาวัดค่าความยาวของเส้นใย ความกว้างของเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (fines) ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (curl index) และดัชนีความหักงอของเส้นใย (kink index) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใย (FQA) ดังแสดงในภาพที่ 3-10 ตามมาตรฐาน ISO 16065 โดยจะทำการวัดเส้นใยแต่ละครั้งเป็นจำนวน 5000 เส้น และทำการทดสอบซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละภาวะ



ภาพที่ 3-10 เครื่องวัดสัดส่วนฐานวิทยาของเส้นใย (FQA)

เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์เส้นใยสามารถวัดเส้นใยที่มีความยาวตั้งแต่ 0.07 มิลลิเมตรขึ้นไป ดังนั้นการรายงานผลความยาวของเส้นใยในการทดลองนี้จะรายงานผลความยาวของเส้นใยเฉลี่ยที่ได้เป็นแบบ LWW (mean length-weight weighted, LWW) คือเป็นความยาวเฉลี่ยของเส้นใยที่ไม่นำความยาวของพวกเส้นใยขนาดเล็ก (fine) มาคิดเฉลี่ยด้วย ฉะนั้นค่าที่ได้จึงเป็นค่าความยาวเฉลี่ยที่เป็นเส้นใยโดยเฉพาะที่ได้จากการผลิตเยื่อจากลำต้นข้าวโพดที่ภาวะต่างๆ ส่วนค่าความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยเป็นลักษณะที่สำคัญของเส้นใยซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษได้ โดยเส้นใยที่มีการโค้งงอและหักงอเพิ่มมากขึ้นทำให้ส่งผลดีและผลเสียต่อสมบัติกระดาษดังต่อไปนี้ ผลดีคือ ทำให้กระดาษมีความฟู ความแข็งแรงต่อแรงฉีกเพิ่มขึ้น มีความยืดหยุ่นเปื่อย มีความพรุนและการดูดซับดีขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของพวกกระดาษชำระ ส่วนผลเสียคือ ทำให้กระดาษมีความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความแข็งตึงลดลง ซึ่งเป็นสมบัติที่ไม่เป็นที่ต้องการในการผลิตกระดาษที่ใช้ความเร็วในการเดินกระดาษสูง

#### 3.2.1.5 การขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ (handsheet)

การขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบจะนำเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและผ่านการบดเยื่อจากขั้นตอนที่ 3.2.1.3.1 และ 3.2.1.3.2 มาทำการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบให้มีน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร เพื่อนำแผ่นขึ้นทดสอบไปทดสอบสมบัติในด้านต่างๆ โดยใช้เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid-Kothen (Rapid-Kothen sheet former) ตามมาตรฐานการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ ISO 5269-2 โดยที่ตัวเครื่องของขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในภาพที่

3-11 คือส่วนขึ้นแผ่นกระดาษ (sheet forming) และส่วนอบแห้ง (dryer) โดยมีขั้นตอนการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบดังนี้

3.2.1.5.1 ปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อจากร้อยละ 1.56 จากน้ำเยื่อข้อ 3.2.1.3.1 และข้อ 3.2.1.3.2 ให้เป็นความเข้มข้นของน้ำเยื่อร้อยละ 0.3 เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่น

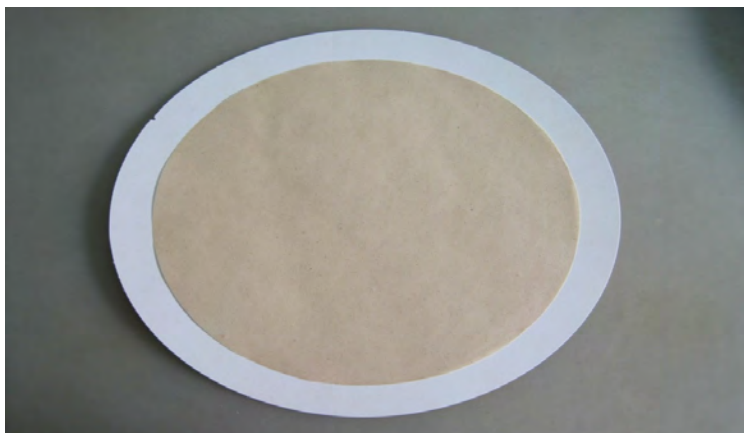
3.2.1.5.2 คำนวณปริมาณน้ำเยื่อที่ต้องใช้ในการขึ้นแผ่นให้ได้แผ่นขึ้นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร ดังแสดงไว้ในภาคผนวก

3.2.1.5.3 เทน้ำเยื่อที่คำนวณได้จากข้อ 3.2.1.5.2 ลงในส่วนขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ แล้วทำการระบายน้ำ (drainage) ออก ซึ่งจะส่งผลให้เส้นใยเกิดการสานตัวกันกลายเป็นแผ่นขึ้นทดสอบ โดยจะมีลักษณะเป็นแผ่นกระดาษวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3-12

3.2.1.5.4 นำแผ่นขึ้นตัวอย่างที่ขึ้นแผ่นเรียบร้อยแล้วมาปิดประกบด้วยกระดาษที่ใช้ขึ้นแผ่นแล้วนำมาอบแห้งในส่วนอบแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 3-13 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 นาที



ภาพที่ 3-11 เครื่องขึ้นแผ่นทดสอบ



ภาพที่ 3-12 ลักษณะของชิ้นแผ่นทดสอบ

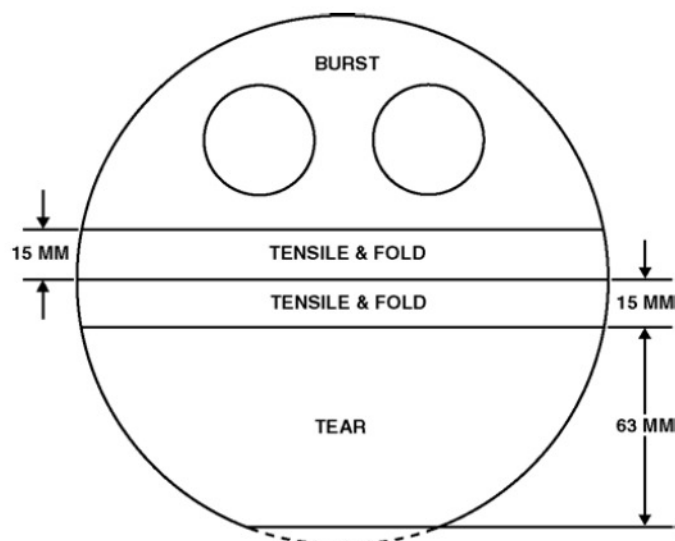


ภาพที่ 3-13 ส่วนอบแห้งของเครื่องขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ

### 3.2.1.6 การทดสอบสมบัติของแผ่นขึ้นทดสอบ

นำแผ่นขึ้นทดสอบแต่ละภาวะมาทำการปรับสภาพในห้องควบคุมภาวะ หลังจากนั้นเริ่มทำการทดสอบสมบัติของแผ่นขึ้นทดสอบโดยไม่ทำให้แผ่นขึ้นทดสอบเสียหาย (non-destructive test) ก่อน คือสมบัติทั่วไปของกระดาษ (basic properties) เช่น น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) ความหนา (thickness) และความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) รวมถึงสมบัติด้านทัศนศาสตร์ (optical properties) คือ ความขาวสว่าง (brightness) และความทึบแสง (opacity) หลังจากนั้นเริ่มทำการทดสอบสมบัติของแผ่นขึ้นตัวอย่างที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อแผ่นขึ้นทดสอบ (destructive test) คือสมบัติในด้านความแข็งแรง (strength

properties) ต่างๆ ดังนี้ ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength) และความต้านทานต่อแรงฉีก (tear resistance) โดยทำการตัดแผ่นขึ้นทดสอบเพื่อทดสอบความแข็งแรงต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 3-14 หลังจากนั้นนำค่าความแข็งแรงต่างๆ ไปคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงโดยนำความแข็งแรงนั้นหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน



ภาพที่ 3-14 ลักษณะของการตัดแผ่นขึ้นทดสอบเพื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงต่างๆ

### 3.2.1.6.1 สมบัติทั่วไปของกระดาษ (basic properties) ได้แก่

3.2.1.6.1.1 น้ำหนักมาตรฐาน คือ น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ส่วนมากมีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเมตร หรืออาจเรียกว่าแกรม ทำการวัดโดยนำแผ่นขึ้นทดสอบมาชั่งน้ำหนักแล้วนำค่าน้ำหนักที่ได้มาหารพื้นที่ของแผ่นขึ้นทดสอบ

3.2.1.6.1.2 ความหนา คือระยะห่างในแนวตั้งฉากระหว่างผิวหน้าทั้ง 2 ด้านของแผ่นทดสอบภายใต้ภาวะที่กำหนด โดยทำการวัดด้วยเครื่องวัดความหนาหน่วยที่วัดได้เป็นมิลลิเมตร

3.2.1.6.1.3 ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) เป็นค่าที่คำนวณได้จากน้ำหนักมาตรฐานจากข้อ 3.2.1.6.1.1 หารด้วยความหนาจากข้อ 3.2.1.6.1.2 ของแผ่นขึ้นทดสอบ

### 3.2.1.6.2 สมบัติด้านทัศนศาสตร์ (optical properties) ได้แก่

3.2.1.6.2.1 ความขาวสว่าง (brightness) เป็นการวัดค่าการสะท้อนแสงที่ 457 นาโนเมตร ของแผ่นขึ้นทดสอบ ซึ่งการสะท้อนแสงนี้จะอยู่ในช่วงของการสะท้อนแสงสีน้ำเงิน ทำการวัดด้วยเครื่องวัดสมบัติเชิงแสงดังแสดงในภาพที่ 3-15 ตามมาตรฐาน TAPPI T 525 om-02 [24] โดยทำการวัดแผ่นขึ้นทดสอบของแต่ละภาวะจำนวน 5 แผ่น โดยในแต่ละแผ่นจะวัด 5 ตำแหน่ง

3.2.1.6.2.2 ความทึบแสง (opacity) เป็นการวัดความสามารถในการให้แสงทะลุของแผ่นขึ้นทดสอบ แผ่นขึ้นทดสอบที่มีความทึบแสงสูงจะมีการทะลุผ่านของแสงน้อย การวัดความทึบแสงสามารถทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดสมบัติเชิงแสงเครื่องเดียวกับการวัดค่าความขาวสว่าง โดยทำการวัดตามมาตรฐาน TAPPI T 519 om-02 [24] วัดแผ่นขึ้นทดสอบของแต่ละภาวะจำนวน 5 แผ่น โดยในแต่ละแผ่นจะวัด 5 ตำแหน่ง



ภาพที่ 3-15 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสงของแผ่นขึ้นทดสอบ (Color Touch PC)

### 3.2.1.6.3 สมบัติด้านความแข็งแรง (strength properties) ได้แก่

3.2.1.6.3.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) คือ ค่าแรงสูงสุดที่แผ่นขึ้นทดสอบจะทนได้ก่อนที่แผ่นขึ้นทดสอบจะขาดออกจากกันเมื่อถูกดึง ทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 3-16 ตามมาตรฐานของ TAPPI T 494 om-01 [24] โดยในแต่ละภาวะจะทำการทดสอบแผ่นขึ้นทดสอบจำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 2 ครั้ง จากนั้นนำค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน





ภาพที่ 3-16 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง

3.2.1.6.3.2 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength) เป็นการทดสอบความต้านทานต่อแรงที่กระทำกับพื้นที่ของกระดาษในแนวตั้งฉากก่อนที่แผ่นขึ้นทดสอบจะเกิดการขาดทะลุจากลูกยางที่พุ่งตัวขึ้นมา ทำการวัดด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ดังแสดงในภาพที่ 3-17 ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 403 om-97 [24] โดยในแต่ละภาวะทำการทดสอบแผ่นขึ้นทดสอบจำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 2 จุด จุดหนึ่งทำการวัดขึ้นทดสอบด้านตะแกงลวดขึ้นแผ่น (wire size) อีกจุดหนึ่งทำการวัดด้านผ้าสักกะหลาด (felt size) มีหน่วยเป็นกิโลปาสคาล (kPa) จากนั้นนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมาหารด้วยน้ำหนักมาตรฐานได้เป็นค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index)

3.2.1.6.3.3 ความต้านทานแรงฉีก (tear resistance) เป็นความสามารถของแผ่นขึ้นทดสอบที่จะต้านแรงที่ใช้ในการฉีกแผ่นขึ้นทดสอบต่อจากแนวตัดเริ่มต้น หน่วยที่วัดได้มีหน่วยเป็นมิลลินิวตัน (mN) วัดโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีกดังแสดงในภาพที่ 3-18 โดยใช้วิธีแบบ Elmendorf internal tearing resistance test ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98 [24] ในแต่ละภาวะจะทำการทดสอบแผ่นขึ้นทดสอบจำนวน 5 แผ่น แต่ละแผ่นสามารถนำมาหาค่าความต้านทานแรงฉีกได้ 2 ครั้ง ในแต่ละครั้งจะทำการวัด 1 จุด จากนั้นนำค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index) โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกมาหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน





ภาพที่ 3-17 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ



ภาพที่ 3-18 เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก

3.2.1.7 ศึกษาลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยในแผ่นขึ้นทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

เป็นการศึกษาลักษณะการแนบชิดหรือการแนบตัวของเส้นใยที่ขึ้นเป็นแผ่นขึ้นทดสอบของแต่ละภาวะตามแนวภาคตัดขวาง (cross-section) และพื้นผิว (surface section) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในภาพที่ 3-19



ภาพที่ 3-19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

### 3.2.1.8 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำผลการทดลองของการผลิตเยื่อแบบโซดา ได้แก่ ค่าร้อยละผลผลิตเยื่อ ค่าร้อยละส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ ค่าคัปปานัมเบอร์ ริงค์ประกอบทางเคมี ค่าปริมาณต่างที่หลงเหลือจากการต้มเยื่อ และค่าความเป็นอิสระของเยื่อก่อนการบดเยื่อ มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA แบบ single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อดูว่าระดับของการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ หลังจากนั้นจะนำผลของค่าความแข็งแรงต่างๆ รวมทั้งค่าสมบัติทางด้านการมองเห็นของแผ่นขึ้นทดสอบและสัญญาณวิทยาของเส้นใย มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค Two-way ANOVA with replication ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อดูว่าการบดเยื่อและการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นมีผลต่อคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ และใช้เทคนิค ANOVA แบบ single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อดูว่าระดับของการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อที่ผ่านการบดเยื่อและไม่ผ่านการบดเยื่ออย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

## 3.2.2 การทดลองตอนที่ 2: ทำการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพด

3.2.2.1 ใช้วัตถุดิบต้นข้าวโพดที่เตรียมไว้จากขั้นตอนที่ 3.2.1.1 ในขั้นตอนที่ 1

3.2.2.2 ทำการเลือกปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1 มาทำการเติมแอนทราควิโนนและ/หรือเมทานอลเพื่อทำการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปร โดยมีการเติมปริมาณแอนทราควิโนนที่ระดับร้อยละต่างๆ ดังนี้ 0, 0.1, 0.2 และ 0.4 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง และเติมปริมาณเมทานอลที่ระดับร้อยละต่างๆ ดังนี้ 0, 20 และ 40 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมดที่ใช้

ในการต้มเยื่อ ทำให้ได้ภาวะที่ใช้ในการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 3-1  
ทำการต้มเยื่อโดยใช้ภาวะการต้มเยื่อและวิธีการตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.2.1 - 3.2.1.2.3

**ตารางที่ 3-1** ภาวะการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปร

สภาวะที่	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ)	ปริมาณแอนทราควิโนน (ร้อยละ)	ปริมาณเมทานอล (ร้อยละ)
1	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0	0
2	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0	20
3	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0	40
4	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0.1	0
5	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0.1	20
6	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0.1	40
7	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0.2	0
8	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0.2	20
9	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0.2	40
10	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0.4	0
11	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0.4	20
12	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0.4	40

3.2.2.3 นำเยื่อที่ต้มเสร็จแล้วมาทำการล้างเยื่อและตีกระจายเยื่อตามการทดลอง  
ตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.2.4

3.2.2.4 นำเยื่อที่ผ่านการตีกระจายเยื่อมาทำการคัดกรองเยื่อ หากร้อยละผลผลิต  
เยื่อ หากร้อยละผลที่ไม่เป็นเยื่อ และเก็บเยื่อตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.2.5

3.2.2.5 ทำการทดสอบสมบัติของเยื่อได้แก่ คัปปานัมเบอร์ ความเป็นอิสระของ  
เยื่อ องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยและปริมาณต่างที่หลงเหลือ  
จากการต้มเยื่อตามขั้นตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.4

3.2.2.6 ทำการบดเยื่อ เพื่อให้ได้ค่าความเป็นอิสระของเยื่อ (freeness) ข้าวโพดที่ออกมาในช่วง  $250 \pm 20$  มิลลิลิตร หาค่าความเป็นอิสระของเยื่อ เก็บน้ำเยื่อหลังจากการบดไว้ขึ้นแผ่นและวิเคราะห์ลักษณะของเส้นใย ตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.3.1-3.2.1.3.2

3.2.2.7 ทำการขึ้นแผ่นทดสอบตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.5

3.2.2.8 ทำการทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ ได้แก่ สมบัติทั่วไปของกระดาษ คือ นำหนักมาตรฐาน ความหนาและความหนาแน่นปรากฏ สมบัติด้านทัศนศาสตร์ คือ ความขาวสว่างและความทึบแสง รวมถึงสมบัติด้านความแข็งแรง คือ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุและความต้านทานแรงฉีก ตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.6

3.2.2.9 ศึกษาลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยที่ถูกขึ้นแผ่นเป็นแผ่นทดสอบจากภาวะต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ตามข้อ 3.2.1.7

3.2.2.10 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ นำค่าสมบัติของเยื่อและสมบัติของแผ่นทดสอบต่างๆ มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค Two-way ANOVA with replication ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อดูว่าการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอล มีผลต่อคุณสมบัติของเยื่อและสมบัติของแผ่นทดสอบเหล่านั้นอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ และนำมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค Anova แบบ single factor เพื่อดูปริมาณการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลที่ระดับต่างๆ นั้น ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติของเยื่อและสมบัติของแผ่นทดสอบหรือไม่ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อวิธีโซดาจากลำต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพื่อใช้ในการทดลองควบคุม

ผลการทดลองที่แสดงภายใต้หัวข้อ 4.1 นี้เป็นผลของการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งเป็นการทดลองหาภาวะการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพดที่เหมาะสม เพื่อนำปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปทำการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรในการทดลองตอนที่ 2 และใช้เป็นการทดลองควบคุมเพื่อเปรียบเทียบกับการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรในตอนี่ 2 โดยการทดลองตอนที่ 1 จะมีการแปรผันปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักลำต้นข้าวโพดแห้ง ทำการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเยื่อ หลังจากนั้นทำการบดเยื่อ แล้วทำการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบของเยื่อที่ผ่านการบดเยื่อและไม่ผ่านการบดเยื่อของแต่ละภาวะ เพื่อทดสอบสมบัติของเยื่อที่ขึ้นเป็นแผ่นกระดาษและนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับ โดยผลการทดลองที่ได้มีดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 ผลผลิตเยื่อ (pulp yield) และส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ (reject)

ผลของการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดาจากลำต้นข้าวโพดที่ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4-1 พบว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อส่งผลต่อผลผลิตเยื่อและส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ โดยเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ผลผลิตเยื่อจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงที่ระดับโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 มีค่าผลผลิตเยื่อสูงสุดหลังจากนั้นค่าผลผลิตเยื่อมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ส่วนที่ไม่เป็นเยื่อมีค่าลดลงเมื่อมีการใช้ปริมาณต่างเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4-1 อย่างไรก็ตาม การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับร้อยละ 10 ให้ผลการต้มเยื่อไม่สุก (un cooking) จะเห็นได้จากมีปริมาณส่วนที่ไม่เป็นเยื่อมาก เยื่อที่ผ่านการต้มเยื่อออกมาจะมีลักษณะเป็นชิ้น ไม่เป็นเส้นใยเดี่ยวๆ เนื่องจากปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไม่เพียงพอต่อการละลายลิกนินในชิ้นไม้ จึงทำให้การแยกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ออกไม่ได้มาก และเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นจากร้อยละ 15 ถึง ร้อยละ 30 ผลผลิตเยื่อมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการต้มเยื่อมีการละลายลิกนินออกจากชิ้นไม้ได้มากขึ้น และอาจละลายพวกคาร์โบไฮเดรตที่อยู่ในชิ้นไม้ด้วย ดังนั้นปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไป อาจส่งผลให้สมบัติเชิงกลและเชิงเคมีถูกทำลายมากขึ้น [11] จึงทำให้ผลผลิตเยื่อมีค่าลดลง นอกจากนี้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้ปริมาณส่วนที่ไม่เป็นเยื่อมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ช่วยให้เกิดการแทรกซึมของสารเคมีและเข้าทำปฏิกิริยาในชิ้นไม้

สูงขึ้น ละลายลิกนินออกได้มากขึ้น เส้นใยจึงแยกตัวกลายเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ดีขึ้น ปริมาณส่วนที่ไม่เป็นเยื่อจึงมีแนวโน้มลดลง

จากการวิเคราะห์สถิติพบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลผลิตเยื่อและส่วนที่ไม่เป็นเยื่อของการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพดที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-5 หน้า 66 ซึ่งเป็นตารางแสดงผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ต่อสมบัติเยื่อข้าวโพดโดยใช้วิธี Anova แบบ single factor เนื่องจากค่า P-value ของผลผลิตเยื่อ (0.00003143) และ P-value ของส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ (0.0000008404) ต่างมีค่าน้อยกว่า 0.05

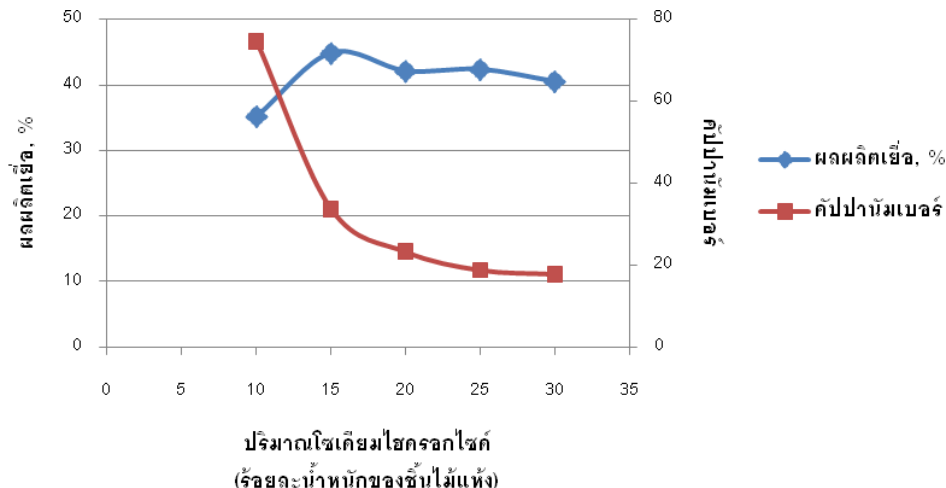
**ตารางที่ 4-1** สมบัติของเยื่อข้าวโพดที่ผลิตได้จากวิธีโซดา

ปริมาณ NaOH (%)	ผลผลิตเยื่อ (% ± SD)	ส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ (% ± SD)	คัปปานัมเบอร์
10	35.24±0.45	19.54±0.71	74.58±1.32
15	44.93±0.83	4.33±0.44	33.75±0.68
20	42.19±0.13	1.99±0.66	23.30±0.30
25	42.44±0.09	1.12±0.04	18.82±0.25
30	40.60±0.30	0.58±0.04	17.82±0.25

#### 4.1.2 คัปปานัมเบอร์ (kappa number)

คัปปานัมเบอร์ คือ ค่าสมมุติที่บ่งบอกถึงปริมาณลิกนินที่หลงเหลืออยู่ในเยื่อหลังจากการต้มเยื่อ และเนื่องจากมีวิธีการทางง่ายกว่าการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ การหาค่าคัปปานัมเบอร์จึงเป็นที่นิยมใช้วัดหาปริมาณลิกนินที่หลงเหลืออยู่จากกระบวนการผลิตเยื่อ จากตารางที่ 4-1 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น คัปปานัมเบอร์มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าไปละลายลิกนินและดีกลิกนิน (delignification) ที่อยู่ในชั้นไม้ออกมาได้มากขึ้น จึงทำให้ค่าคัปปานัมเบอร์มีค่าลดลง และพบว่าเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 25 เป็น ร้อยละ 30 ค่าคัปปานัมเบอร์มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อเทียบกับต้นทุนการใช้ปริมาณสารเคมีแล้วพบว่า ไม่คุ้มทุนเนื่องจากมีการละลายลิกนินออกได้น้อยนอกจากนี้การใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มาก ยังส่งผลให้ผลผลิตเยื่อมีแนวโน้มลดลงอีกด้วย ดังแสดงในภาพที่ 4-1 และจากการวิเคราะห์ด้วยสถิติดังแสดงไว้ในตาราง

ที่ 4-5 หน้า 66 พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลต่อค่าคัปปานัมเบอร์อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P-value มีค่าเพียง 0.000000235



ภาพที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตเยื่อและค่าคัปปานัมเบอร์ของการผลิตเยื่อแบบโซดาที่ระดับโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ

#### 4.1.3 ความเป็นอิสระของเยื่อ (freeness) ก่อนบดเยื่อ

ค่าความเป็นอิสระของเยื่อเป็นค่าที่บ่งบอกถึงสภาพการระบายน้ำ (drainage) ของเยื่อผ่านรูตะแกรง จากผลการทดลองที่แสดงไว้ในตารางที่ 4-2 พบว่า การผลิตเยื่อแบบโซดาโดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลต่อค่าความเป็นอิสระของเยื่อก่อนบดเยื่อ กล่าวคือ เมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อเพิ่มมากขึ้น ค่าความเป็นอิสระของเยื่อมีแนวโน้มลดลงจนถึงระดับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 25 และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 30 เนื่องจากการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นส่งผลให้เส้นใยเกิดการแยกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ มากขึ้น อีกทั้งยังทำให้เกิดเส้นใยขนาดเล็ก (fines) เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งเส้นใยขนาดเล็กๆ เหล่านี้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมาก การอุ้มน้ำของเยื่อที่มีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กนั้นมากจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความเป็นอิสระของเยื่อลดลง คือมีสภาพการระบายของน้ำต่ำลงนั่นเอง แต่เป็นที่น่าแปลกใจเมื่อมีการใช้ระดับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 30 กลับมีค่าความเป็นอิสระของเยื่อเพิ่มขึ้น ซึ่งทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าที่ระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 30 นี้ อาจมีส่วนของเส้นใยขนาดเล็กอยู่มาก เส้นใยขนาดเล็กเหล่านี้อาจมีส่วนที่ลอดผ่านตะแกรงในช่วงการระบายน้ำของช่วงแรก ส่งผลให้เหลือแต่เส้นใยยาวค้างอยู่มาก จึงทำให้ค่าความเป็นอิสระของเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และจากการวิเคราะห์ด้วยสถิติดังแสดงไว้ใน

ตารางที่ 4-5 หน้า 66 พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลต่อค่าความเป็นอิสระของเยื่อก่อนบดเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P-value มีค่าเพียง 0.000006337

**ตารางที่ 4-2** ความเป็นอิสระของเยื่อก่อนบดเยื่อและปริมาณต่างหลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อแบบวิธีโซดา

ปริมาณ NaOH (%)	ความเป็นอิสระของเยื่อก่อนบดเยื่อ (มิลลิลิตร ± SD)	ปริมาณต่างหลงเหลือหลังจากต้มเยื่อ (กรัม/ลิตร ± SD)
10	492±11	0.00±0.00
15	378±4	0.55±0.07
20	361±4	4.20±0.28
25	319±2	8.66±0.37
30	354±6	13.07±0.09

#### 4.1.4 ปริมาณต่างที่หลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อ (residual alkali)

จากตารางที่ 4.2 พบว่า การใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลต่อปริมาณต่างหลงเหลือจากการต้มเยื่อ คือ ปริมาณต่างที่หลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น โดยที่ระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 10 ไม่มีปริมาณต่างที่หลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อ แสดงว่ามีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการทำปฏิกิริยาจนหมดและปริมาณที่ใช้ยังไม่เพียงพอ โดยจะเห็นได้จากมีปริมาณส่วนที่ไม่เป็นเยื่อสูงมากจากตารางที่ 4.1 ปริมาณต่างที่หลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อมีความสำคัญมาก เนื่องจากถ้ามีปริมาณต่างไม่เหมาะสมหรือไม่เพียงพอในระหว่างการต้มเยื่อ จะส่งผลให้ลิกนินที่ถูกละลายไปมีการกลับมารวมตัวกันได้อีก เรียกว่าการเกิด lignin condensation ทำให้ลิกนินกลับมาตกค้างในเยื่ออีก ซึ่งการละลายลิกนินพวกนี้ออกในขั้นตอนการฟอกเยื่อทำได้ยากและสิ้นเปลืองสารเคมีในการฟอกเยื่อเป็นอย่างมาก lignin condensation นี้จะเกิดจากน้ำยาต้มเยื่อมีค่า pH ต่ำกว่า 12 และจะเกิดอย่างต่อเนื่องและรุนแรงขึ้นเมื่อค่า pH เริ่มต่ำกว่า 6 ดังนั้นปริมาณต่างหลังจากการต้มเยื่อควรมีหลงเหลือมากเกินพอที่จะป้องกันการเกิด lignin condensation [11] และจากการวิเคราะห์ด้วยสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-5 หน้า 66 พบว่าค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.00000009633 นั้นแสดงว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลต่อปริมาณต่างที่หลงเหลือหลังจากการต้มเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ



#### 4.1.5 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ

จากตารางที่ 4-3 ซึ่งแสดงผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ไฮโดรเจนเซลลูโลส แอลฟาเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และปริมาณสารอื่นๆ ของเยื่อที่ผลิตจากวิธีโซดา จากลำดับข่าวโพดของแต่ละระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะเห็นได้ว่า เนื่องจากที่ระดับโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ทำการต้มเยื่อไม่สุกจึงทำให้องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อส่วนใหญ่มีความแตกต่างจากภาวะอื่นๆ โดยที่จริงแล้วควรมีปริมาณไฮโดรเจนเซลลูโลส แอลฟาเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสมากกว่าภาวะที่มีการต้มเยื่อดัวยระดับโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 แต่ที่ผลการทดลองออกมาปริมาณน้อยกว่าเนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนเซลลูโลส แอลฟาเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสเหล่านี้ส่วนใหญ่อยู่ในส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ เมื่อนำส่วนที่เป็นเยื่อมาวิเคราะห์องค์ประกอบจึงส่งผลให้มีปริมาณเหล่านี้น้อยกว่าที่ภาวะโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 และเมื่อทำการพิจารณาเยื่อที่ภาวะโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15, 20, 25 และ 30 ส่วนที่มีการต้มเยื่อสุก พบว่าเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อมากขึ้นปริมาณไฮโดรเจนเซลลูโลส แอลฟาเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน รวมถึงสารอื่นๆ ที่มีอยู่ในเยื่อมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น ไม่เพียงแต่โซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับลิกนิน ละลายลิกนินออกจากชิ้นไม้ แต่โซเดียมไฮดรอกไซด์ยังเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์โบไฮเดรตในเส้นใยอีกด้วย จึงส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนเซลลูโลส แอลฟาเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสมีแนวโน้มลดลง ซึ่งส่งผลให้ผลผลิตเยื่อมีแนวโน้มลดลงนั่นเอง และจากการวิเคราะห์ด้วยสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-5 หน้า 66 พบว่าค่า P-value ของปริมาณไฮโดรเจนเซลลูโลส ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ปริมาณเฮมิเซลลูโลส ปริมาณลิกนิน และปริมาณสารอื่นๆ มีค่าเท่ากับ 0.0000000735, 0.0000000236, 0.0000276, 0.000000635 และ 0.001698 ตามลำดับ ซึ่งทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า 0.05 นั้นแสดงว่า การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลต่อปริมาณต่างๆ ที่หลงเหลือหลังจากการต้มเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4-3 องค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพดและเยื่อข้าวโพดที่ผลิตจากวิธีไฮดา

ภาวะ	องค์ประกอบทางเคมีส่วนที่เป็นเยื่อ (ร้อยละเทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้น)					ส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ (ร้อยละเทียบกับวัตถุดิบเริ่มต้น)		ผลรวม
	ไฮโดเซลลูโลส	แอลฟาเซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	อื่นๆ	กระจุกเส้นใย (shives)	ส่วนที่ละลายอยู่ในน้ำดำ	
ข้าวโพด (วัตถุดิบเริ่มต้น)	74.55±0.42	57.88±0.21	16.66±0.63	21.35±0.15	4.10±0.28	ไม่ได้ทำการต้มเยื่อ		100
1. 10% NaOH	28.70±0.03	23.92±0.06	4.78±0.04	5.24±0.09	1.30±0.06	19.54	45.23	100
2. 15% NaOH	39.16±0.09	30.69±0.14	8.47±0.05	2.89±0.01	2.88±0.10	4.33	50.74	100
3. 20% NaOH	37.81±0.12	29.32±0.07	8.48±0.20	2.48±0.07	1.90±0.06	1.99	55.83	100
4. 25% NaOH	38.39±0.20	30.40±0.01	7.99±0.21	2.32±0.10	1.72±0.11	1.12	56.45	100
5. 30% NaOH	37.03±0.24	29.22±0.06	7.81±0.30	1.78±0.08	1.79±0.33	0.59	58.81	100

หมายเหตุ ไฮโดเซลลูโลสคือผลรวมของแอลฟาเซลลูโลสกับเฮมิเซลลูโลส

#### 4.1.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย

จากการทดลองได้ทำการบดเยื่อให้มีค่าความเป็นอิสระของเยื่อให้ใกล้เคียงกันก่อนทำการขึ้นแผ่น และศึกษาความยาวเส้นใยและลักษณะของเส้นใยที่ได้จากการไม่บดเยื่อและบดเยื่อดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่า ในเยื่อที่ไม่ได้ผ่านการบดนั้น เส้นใยมีขนาดสั้นลงและปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปอาจเข้าทำปฏิกิริยากับเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้ระดับความเป็นพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) ของสายโซ่เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของเส้นใยลดลง จึงทำให้เส้นใยมีขนาดสั้นลง ขณะเดียวกันปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงส่งผลให้ละลายลิกนินได้ดี จึงทำให้มีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้น และบางทีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่เกิดขึ้นอาจมาจากเส้นใยโดนทำลายในระหว่างการต้มเยื่อ การคัดกรองส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ และการล้างทำความสะอาดด้วยเช่นกัน จากผลการทดลองที่ได้ยังพบว่า ความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย ส่วนความกว้างของเส้นใยที่โซเดียมไฮดรอกไซด์ระดับต่างๆ นั้นมีค่าอยู่ในช่วง 21-22 ไมโครเมตรซึ่งถือว่าไม่แตกต่างกันมากนัก

เนื่องจากการต้มเยื่อแบบโซดาที่ระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ให้การต้มเยื่อที่ไม่สุกจึงไม่นำมาบดเยื่อ และเมื่อนำเยื่อแต่ละระดับของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มาทำการบดเยื่อพบว่า เส้นใยมีขนาดสั้นลง ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยเพิ่มขึ้น ส่วนความกว้างของเส้นใยมีขนาดลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการบดเยื่อจะทำให้เกิดการตัดของเส้นใย เส้นใยจึงมีขนาดสั้นลง (fiber shortening) และในระหว่างการบดเยื่อจะเกิดการแยกชั้นของผนังเซลล์และเกิดแรงเฉือนขึ้น ส่งผลให้เศษชิ้นของผนังเซลล์หลุดแยกออกจากกันกลายเป็นเส้นใยขนาดเล็ก จึงส่งผลให้มีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กในระบบเพิ่มขึ้น เส้นใยมีการโค้งงอเกิดขึ้นเมื่อมีแรงเฉือนสูงและความเข้มข้นของเยื่อสูงซึ่งเกิดในระหว่างการบดเยื่อ เมื่อเส้นใยเกิดการโค้งงอมากขึ้นลักษณะของแผ่นกระดาษที่ผลิตได้จะมีความฟู (bulky) สูงขึ้นและความหนาแน่นต่ำ การต้านทานต่อแรงฉีกจะมีค่าสูงขึ้นแต่ความแข็งแรงต่อแรงดึงจะมีค่าต่ำลง [9]

ตารางที่ 4-4 ลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใยเยื่อข้าวโพดที่ผ่านการบดเยื่อและไม่ผ่านการบดเยื่อที่ผลิตได้จากวิธีโซดา

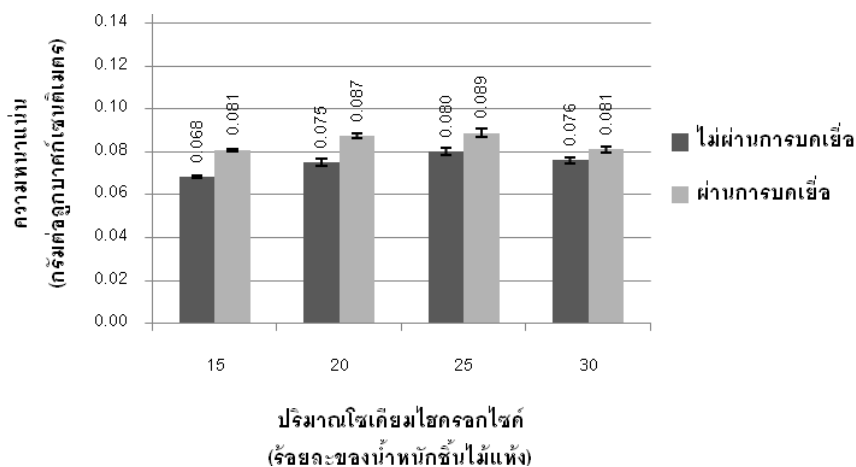
NaOH (%)	ไม่ผ่านการบดเยื่อ					ผ่านการบดเยื่อ				
	ความยาวเส้นใยแบบ LWW (มิลลิเมตร±SD)	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%±SD)	ดัชนีความโค้งของเส้นใย	ดัชนีความหักงอของเส้นใย	ความกว้างของเส้นใย (ไมโครเมตร±SD)	ความยาวเส้นใยแบบ LWW (มิลลิเมตร±SD)	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%±SD)	ดัชนีความโค้งของเส้นใย	ดัชนีความหักงอของเส้นใย	ความกว้างของเส้นใย (ไมโครเมตร±SD)
10	1.595±0.006	32.27±0.10	0.113±0.007	1.231±0.037	22.14±0.05	ไม่ได้นำมาบดเยื่อ				
15	1.564±0.005	35.10±0.29	0.103±0.009	1.182±0.027	21.82±0.14	1.308±0.049	36.90±2.68	0.115±0.007	1.482±0.003	21.10±0.23
20	1.561±0.020	36.24±1.14	0.088±0.001	1.122±0.042	21.76±0.22	1.411±0.037	37.12±0.83	0.111±0.002	1.458±0.001	20.92±0.11
25	1.515±0.003	36.77±0.81	0.099±0.002	1.153±0.032	21.44±0.11	1.219±0.068	38.71±0.01	0.110±0.002	1.385±0.006	21.17±0.26
30	1.509±0.113	37.11±3.00	0.099±0.000	1.107±0.088	21.37±0.08	1.330±0.031	36.01±0.93	0.109±0.001	1.465±0.001	20.84±0.33

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-6 หน้า 68 พบว่า การบดเยื่อข้าวโพดที่ผลิตได้จากวิธีโซดาส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความยาวเส้นใยแบบ LWW (ค่า P-value เท่ากับ 0.00003455) ความโค้งงอของเส้นใย (ค่า P-value เท่ากับ 0.0001905) ความหักงอของเส้นใย (ค่า P-value เท่ากับ 0.0000001996) และความกว้างของเส้นใย (ค่า P-value เท่ากับ 0.000401) แต่การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างการบดเยื่อและการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อนั้น พบว่าไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสัณฐานวิทยาของเส้นใย และเมื่อนำลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยทำการวิเคราะห์การใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 หน้า 69 พบว่าการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยของเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและผ่านการบดเยื่อ มีเพียงความหักงอของเส้นใยหลังการบดเยื่อเท่านั้นที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ เนื่องจากมีค่า P-value เพียง 0.0000367

#### 4.1.7 ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นขึ้นทดสอบ (apparent density)

ความหนาแน่นปรากฏของกระดาษ เป็นค่าที่ได้มาจากการนำน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษหารด้วยความหนาของกระดาษ ซึ่งความหนาแน่นของกระดาษมีความสัมพันธ์กับการสร้างพันธะหรือการแนบตัวของเส้นใยในกระดาษ หากความหนาแน่นของกระดาษมีค่ามาก แสดงว่าเส้นใยมีการแนบตัวกันได้ดี ส่งผลให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยทำได้ดีขึ้น ความแข็งแรงของกระดาษจะมีค่าสูง อย่างไรก็ตามกระดาษที่มีความหนาแน่นสูงจะส่งผลให้มีรูพรุนภายในเนื้อกระดาษลดลง เป็นผลให้ความทึบแสงของกระดาษมีค่าลดลง ซึ่งจากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4-2 พบว่าความหนาแน่นของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการบดเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น เนื่องมาจากการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณสูงขึ้น จะมีการละลายลิกนินออกจากเส้นใยได้มากขึ้นในระหว่างการต้มเยื่อ เส้นใยที่ได้จึงมีความยืดหยุ่น ผนึ่งของเส้นใยอ่อนนุ่มขึ้น เมื่อนำเส้นใยที่ได้มาขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบจึงส่งผลให้เส้นใยแนบชิดตัวกันได้ดี กระดาษที่ผลิตได้จึงมีความหนาแน่นสูงขึ้น ส่วนการบดเยื่อส่งผลให้กระดาษมีความหนาแน่นสูงขึ้น เนื่องจากการบดเยื่อนั้นช่วยทำให้เส้นใยเกิดการบวมน้ำ (swelling) การยุบตัว (collapse) และเกิดเส้นใยแยกย่อย (fibrillation) ได้ดี จึงทำให้เส้นใยแนบชิดกันดียิ่งขึ้น จึงทำให้แผ่นขึ้นทดสอบมีความหนาแน่นมากกว่าเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อ และเมื่อนำแผ่นขึ้นทดสอบไปทำการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) พบว่าเยื่อ

ที่ผ่านการบดเยื่อเส้นใยมีการสานตัว แนบชิดระหว่างกันได้ดีและเส้นใยมีการแยกย่อยเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้มีช่องว่างระหว่างเส้นใยลดลง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4-8 หน้า 64 และ 4-9 หน้า 65



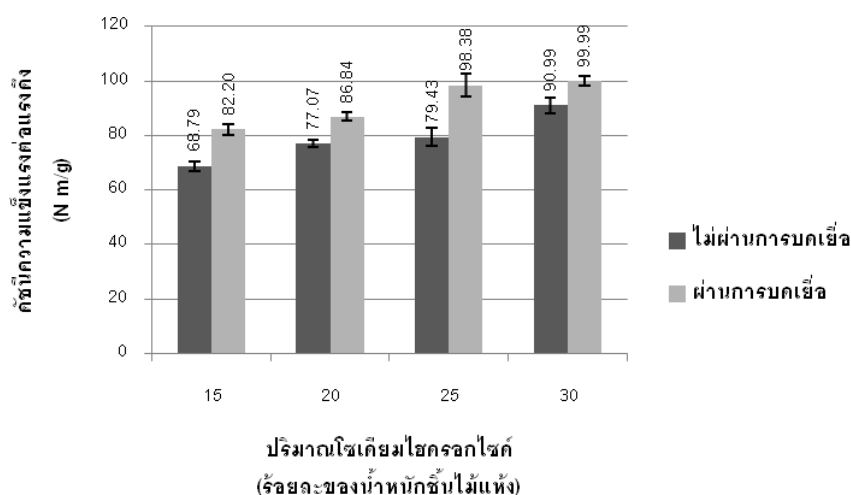
**ภาพที่ 4-2** ผลของปริมาณ NaOH ต่อความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อ ลำต้นข้าวโพดที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและที่ผ่านการบดเยื่อ

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-6 หน้า 68 พบว่า การบดเยื่อและการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาแน่นของแผ่นขึ้นทดสอบ เนื่องจากมีค่า P-value เท่ากับ 0.000006527 และ 0.0004401 ตามลำดับ หากแต่พบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างการบดเยื่อและการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อนั้นไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อนำค่าความหนาแน่นของแผ่นขึ้นทดสอบมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อดูว่าการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ต่อเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและเยื่อที่ผ่านการบดเยื่อ จากผลที่ได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 หน้า 69 พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาแน่นของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อ (ค่า P-value เท่ากับ 0.0026824) หากแต่ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาแน่นของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการบดเยื่อ

#### 4.1.8 สมบัติด้านความแข็งแรง

##### 4.1.8.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

ความแข็งแรงต่อแรงดึงขึ้นอยู่กับพันธะของเส้นใย เส้นใยที่มีการสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีจะส่งผลให้แผ่นขึ้นตัวอย่างมีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูง จากภาพที่ 4-3 พบว่า เยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อมีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงขึ้นเมื่อมีการใช้ระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น และเมื่อนำเยื่อแต่ละระดับโซเดียมไฮดรอกไซด์มาทำการบดเยื่อแล้วขึ้นแผ่นทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงพบว่า เยื่อที่ผ่านการบดเยื่อมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อที่ระดับโซเดียมไฮดรอกไซด์เดียวกัน เนื่องมาจากเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น มีการละลายลิกนินออกจากเส้นใยได้มากขึ้น ส่งผลให้เส้นใยมีความยืดหยุ่นและมีความอ่อนตัวได้มากขึ้น เมื่อนำมาขึ้นเป็นแผ่นกระดาษเส้นใยจึงมีการแนบชิดระหว่างกันได้ดีขึ้น สามารถสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีขึ้น ส่วนการนำเยื่อที่ได้แต่ละภาวะมาทำการบดเยื่อนั้น เป็นการเพิ่มการแยกย่อยของเส้นใย ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่และบริเวณในการสร้างพันธะให้มากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงที่ได้มีค่าสูงขึ้น



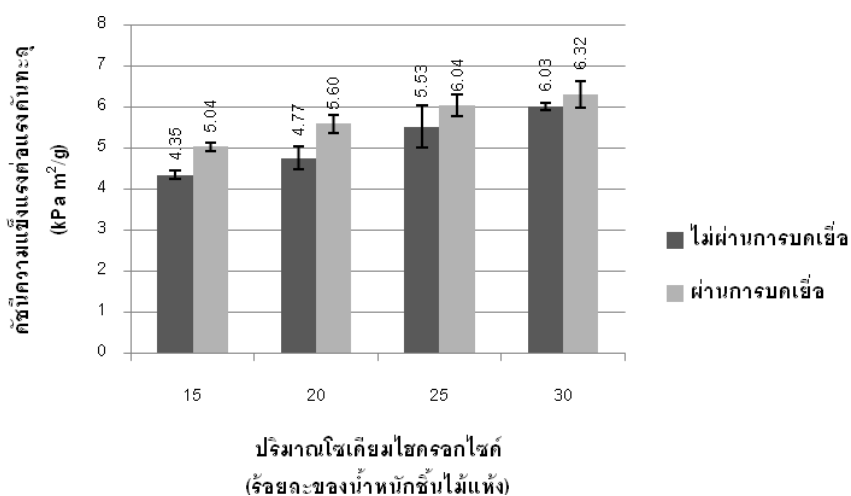
ภาพที่ 4-3 ผลของปริมาณ NaOH ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อลำตันข้าวโพดที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและที่ผ่านการบดเยื่อ

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-6 หน้า 68 พบว่า การบดเยื่อและการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อแบบโซดาส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นขึ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value เท่ากับ 0.000008098 และ 0.00002122

ตามลำดับ ส่วนผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างการบดเยื่อและการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อต่อความแข็งแรงต่อน้ำดึงพบว่าไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อดูผลของการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แตกต่างกันต่อความแข็งแรงต่อน้ำดึงของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและผ่านการบดเยื่อ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 หน้า 69 พบว่า การใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ นั้นส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงต่อน้ำดึงของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและผ่านการบดเยื่อ เนื่องจากค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.0078225 สำหรับเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อ และมีค่าเท่ากับ 0.002261 สำหรับเยื่อที่ผ่านการบดเยื่อ

#### 4.1.8.2 ความแข็งแรงต่อน้ำดึง

ความแข็งแรงต่อน้ำดึงขึ้นอยู่กับพันธะของเส้นใยเช่นเดียวกับความแข็งแรงต่อน้ำดึง จากภาพที่ 4-4 แสดงถึงผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพดที่ระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อน้ำดึงของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและที่ผ่านการบดเยื่อ พบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อน้ำดึงของเยื่อทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการบดเยื่อมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น การบดเยื่อทำให้ค่าความแข็งแรงต่อน้ำดึงมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการที่ไม่ผ่านการบดเยื่อ เนื่องด้วยเหตุผลเดียวกับในกรณีของความแข็งแรงต่อน้ำดึง



ภาพที่ 4-4 ผลของปริมาณ NaOH ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อน้ำดึงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อลำต้นข้าวโพดที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและที่ผ่านการบดเยื่อ



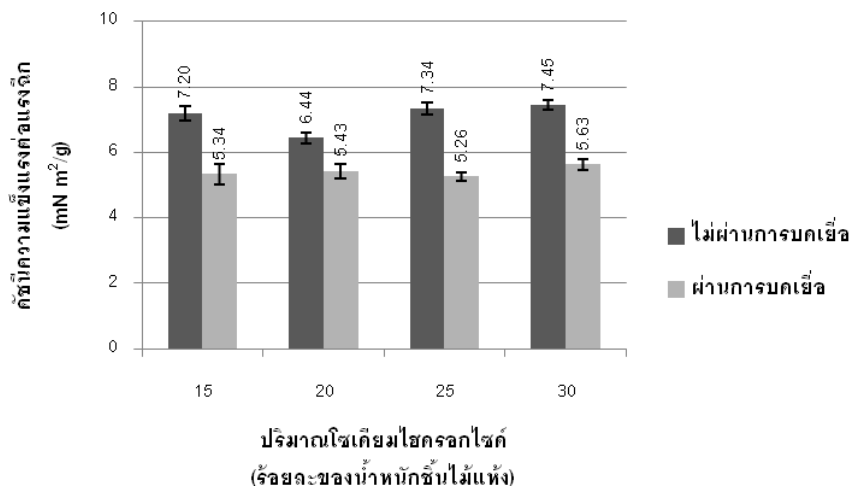
จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่แสดงไว้ในตารางที่ 4-6 หน้า 68 พบว่า ทั้งการบดเยื่อและการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อแบบโซดาส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นขึ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P-value ของการบดเยื่อเท่ากับ 0.0002699 ในขณะที่ค่า P-value ของการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.00001839 ส่วนผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างการบดเยื่อและการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อต่อความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุพบว่าไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่แสดงไว้ในตารางที่ 4-7 หน้า 69 พบว่า การใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ นั้นส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและผ่านการบดเยื่อ โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.0063624 สำหรับเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อ และค่า P-value เท่ากับ 0.002416 สำหรับเยื่อที่ผ่านการบดเยื่อ

#### 4.1.8.3 ความแข็งแรงต่อแรงฉีก

ภาพที่ 4-5 แสดงถึงผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพดที่ระดับปริมาณ NaOH ต่างๆ ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อฉีกของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อที่ไม่ผ่านการบดและที่ผ่านการบด โดยปกติความแข็งแรงต่อแรงฉีกขึ้นอยู่กับความยาวและความแข็งแรงของเส้นใยมากกว่าพันธะของเส้นใย ดังนั้นเยื่อที่มีความยาวของเส้นใยสูงและเส้นใยมีความแข็งแรงมากก็จะผลิตกระดาษที่ทนต่อแรงฉีกได้สูง จากผลการทดลองพบว่าแผ่นขึ้นทดสอบมีค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อนำเยื่อมาผ่านการบดเยื่อพบว่าค่าความแข็งแรงของแต่ละระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อ เนื่องมาจากการบดเยื่อส่งผลให้ความยาวของเส้นใยมีขนาดสั้นลงดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-4 หน้า 54 จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่าลดลงนั่นเอง

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติที่แสดงไว้ในตารางที่ 4-6 หน้า 68 พบว่าการบดเยื่อส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงฉีกของแผ่นขึ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.000007095) ส่วนผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างการบดเยื่อและการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อต่อความแข็งแรงต่อแรงฉีกพบว่าไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่แสดงไว้ในตารางที่ 4-7 หน้า 69 เพื่อศึกษาถึงผลของระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้พบว่าการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ นั้นไม่ส่งผลอย่างมี

นัยสำคัญต่อความแข็งแรงต่อแรงฉีกของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อทั้งที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและผ่านการบดเยื่อ



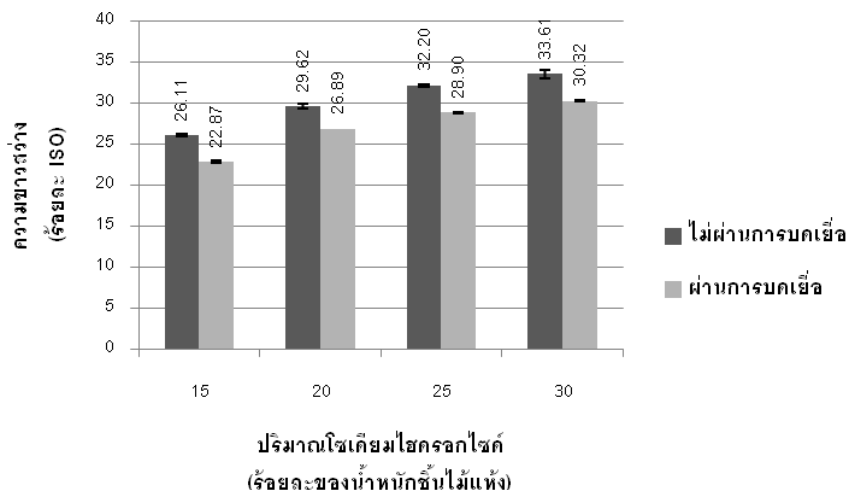
**ภาพที่ 4-5** ผลของปริมาณ NaOH ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อลำต้นข้าวโพดที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและที่ผ่านการบดเยื่อ

#### 4.1.9 สมบัติด้านทัศนศาสตร์

##### 4.1.9.1 ความขาวสว่าง

การวัดค่าความขาวสว่างของแผ่นขึ้นทดสอบนั้นสามารถวัดได้โดยการสะท้อนช่วงคลื่นแสงสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร ภาพที่ 4-6 แสดงค่าความขาวสว่างของแผ่นขึ้นทดสอบที่ได้ พบว่า เมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ค่าความขาวสว่างของเยื่อทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการบดเยื่อมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากกลไกหนึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นขึ้นทดสอบได้มีการถูกดึงออกจากการต้มเยื่อได้มากขึ้น ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-1 หน้า 48 และเมื่อนำเยื่อของแต่ละระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มาทำการบดเยื่อแล้วขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ พบว่า ค่าความขาวสว่างของแผ่นขึ้นทดสอบมีค่าลดลง ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากการบดเยื่อนั้นส่งผลให้กระดาษมีความหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งเป็นการลดพื้นที่ผิวสัมผัส (interface) ระหว่างเส้นใยกับช่องว่างภายในเนื้อกระดาษให้น้อยลง เมื่อแสงตกกระทบผิวสัมผัสดังกล่าว การกระเจิงของแสงเนื่องจากความแตกต่างระหว่างดัชนีหักเหของแสงของเส้นใยและดัชนีหักเหของแสงของช่องว่างภายในเนื้อแผ่นขึ้นทดสอบลดน้อยลง แสงสะท้อนกลับที่เกิด

จากการกระเจิงแสงของแสง (diffusely reflected light) น้อยลง จึงส่งผลให้กระดาษมีค่าความขาวสว่างลดลงนั่นเอง [26]



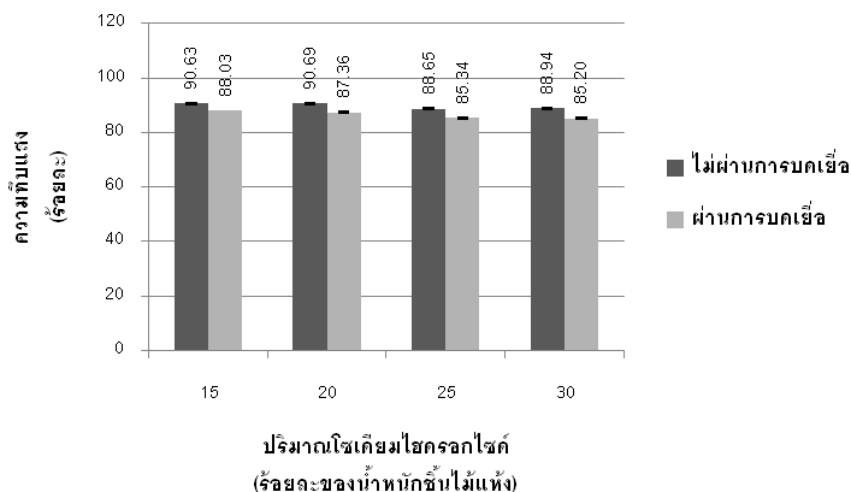
**ภาพที่ 4-6** ผลของปริมาณ NaOH ต่อความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อลำต้นข้าวโพดที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและที่ผ่านการบดเยื่อ

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-6 หน้า 68 พบว่า การบดเยื่อและการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อแบบโซดาส่งผลต่อความขาวสว่างของแผ่นขึ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value เกือบเท่า 0 โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.0000000003478 และ 0.0000000002876 ตามลำดับ ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างการบดเยื่อและการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อกลับไม่ส่งผลต่อความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 หน้า 69 เพื่อดูถึงอิทธิพลของระดับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ พบว่า การใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ นั้นส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความขาวสว่างของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อทั้งที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและผ่านการบดเยื่อ โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.000008697 สำหรับเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อ และค่า P-value เท่ากับ 0.00000437 สำหรับเยื่อที่ผ่านการบดเยื่อ

#### 4.1.9.2 ความทึบแสง

ความทึบแสงของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตได้จากวิธีโซดาจากส่วนลำต้นข้าวโพดที่ระดับปริมาณการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4-7 พบว่า เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อจากลำต้นข้าวโพดเพิ่มขึ้น ความทึบแสงของเยื่อทั้งที่ผ่านและไม่

ผ่านการอบมีแนวโน้มลดลง และเมื่อมีการอบเยื่อ ความทึบแสงของแต่ละระดับไซเดียมไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน การวัดค่าความทึบแสงของกระดาษเป็นการวัดความสามารถของแผ่นขึ้นทดสอบในการขัดขวางการเคลื่อนที่ผ่านของแสง การใช้ปริมาณไซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้นจะส่งผลให้มีการละลายลิกนินออกจากเยื่อได้มากขึ้น เส้นใยของแผ่นขึ้นทดสอบสามารถแนบตัวกันได้ดี นอกจากนี้การอบเยื่อยังส่งผลให้การแนบชิดตัวของเส้นใยในแต่ละภาวะดียิ่งขึ้น จึงเกิดการกระเจิงแสงของแผ่นขึ้นทดสอบได้น้อยลง เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสำหรับการหักเหของแสงอันเนื่องมาจกดัชนีหักเหของแสงที่ต่างกันระหว่างเส้นใยและช่องว่างน้อยลง [26] แผ่นทดสอบที่ผลิตได้จึงมีความทึบแสงลดลง



**ภาพที่ 4-7** ผลของปริมาณ NaOH ต่อความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อลำต้นข้าวโพดที่ไม่ผ่านการอบเยื่อและที่ผ่านการอบเยื่อ

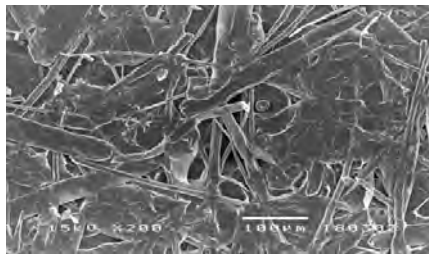
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-6 หน้า 68 พบว่า การอบเยื่อและการใช้ไซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อแบบโซดาส่งผลต่อความทึบแสงของแผ่นขึ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.00000002944 และ 0.000006262 ตามลำดับ ส่วนผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างการอบเยื่อและการใช้ไซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อต่อความทึบแสงพบว่าไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 หน้า 69 เพื่อดูผลของระดับปริมาณไซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ พบว่า การใช้ปริมาณไซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ นั้นส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความทึบแสงของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อที่ไม่ผ่านการอบเยื่อและผ่านการอบเยื่อ โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.0012767 และ 0.003874 ตามลำดับ

#### 4.1.10 ลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยที่ถูกขึ้นแผ่นเป็นแผ่นขึ้นทดสอบจากภาวะต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

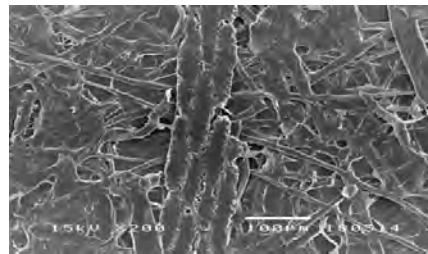
ภาพที่ 4-8 และ 4-9 แสดงลักษณะการสานตัวของเส้นใยที่ผ่านการบดเยื่อและไม่ผ่านการบดเยื่อของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตด้วยเยื่อแบบโซดาที่ระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ ทางด้านพื้นผิวและด้านตัดขวาง ตามลำดับ

จากภาพที่ 4-8 (ก)-(ข) เป็นภาพแสดงด้านพื้นผิวของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อโซดาที่ระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ ทั้งผ่านและไม่ผ่านการบดเยื่อ ที่กำลังขยาย 200 เท่า จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เส้นใยมีการสานตัวและแผ่ขยายออกได้มากขึ้น ทำให้รูช่องว่างระหว่างเส้นใยลดลง และเมื่อพิจารณาผลของการบดเยื่อของแต่ละระดับโซเดียมไฮดรอกไซด์ สังเกตได้ว่า การบดเยื่อนั้นส่งผลให้รูช่องว่างมีขนาดเล็กลง การสร้างพันธะของเส้นใยทำได้มากขึ้น พื้นผิวของแผ่นขึ้นทดสอบมีลักษณะสม่ำเสมอมากกว่าแผ่นขึ้นทดสอบที่ไม่ผ่านการบดเยื่อ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น ทำให้มีการละลายลิกนินออกจากเส้นใยได้มากขึ้น เส้นใยมีการยึดหยุ่นได้ดีส่งผลให้เวลาขึ้นเป็นแผ่นขึ้นทดสอบเส้นใยมีการแนบชิดระหว่างกันได้ดี และเมื่อทำการบดเยื่อ เส้นใยจะเกิดการแยกย่อยของเส้นใยมากขึ้น ส่งผลให้มีพื้นที่สานตัวระหว่างกันมากขึ้นและรูช่องว่างเส้นใยลดน้อยลง

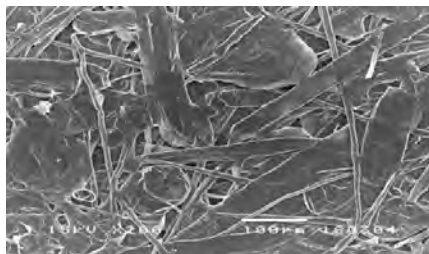
จากภาพที่ 4-9 (ก)-(ข) เป็นภาพแสดงด้านตัดขวางของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อโซดาที่ระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ ทั้งผ่านและไม่ผ่านการบดเยื่อ ที่กำลังขยาย 500 เท่า จากทฤษฎีเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้นจะทำให้มีการละลายลิกนินออกจากเส้นใยได้มากขึ้น เส้นใยจะมีความยึดหยุ่นและอ่อนนุ่มมากขึ้น ทำให้เมื่อนำเส้นใยมาทำการขึ้นแผ่นกระดาษ เส้นใยจะมีการยุบตัวและแนบชิดกันได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม จากภาพจะเห็นได้ว่าการยุบตัวและการแนบชิดกันของเส้นใยเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นและการบดเยื่อของแต่ละภาวะไม่ค่อยมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเจน



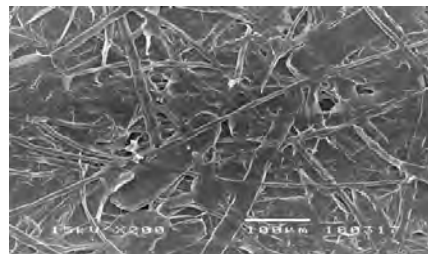
(ก) NaOH 15%+ไม่ผ่านการบดเยื่อ



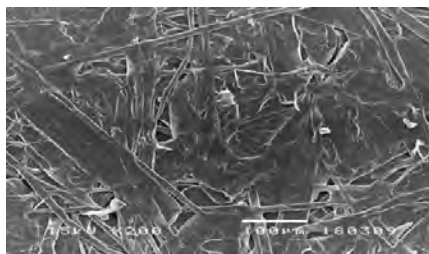
(ข) NaOH 15%+ผ่านการบดเยื่อ



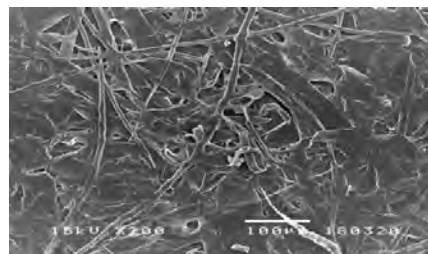
(ค) NaOH 20%+ไม่ผ่านการบดเยื่อ



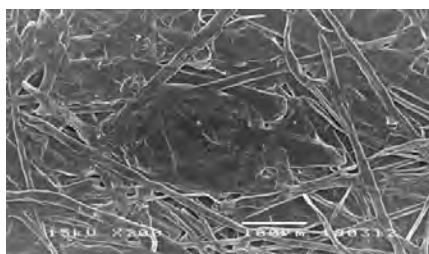
(ง) NaOH 20%+ผ่านการบดเยื่อ



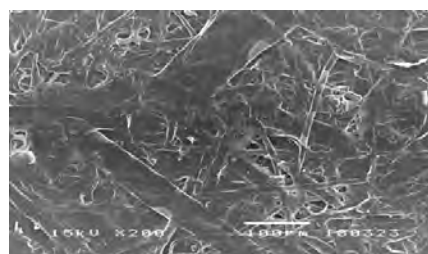
(จ) NaOH 25%+ไม่ผ่านการบดเยื่อ



(ฉ) NaOH 25%+ผ่านการบดเยื่อ

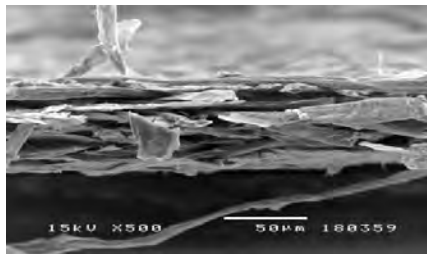


(ช) NaOH 30%+ไม่ผ่านการบดเยื่อ

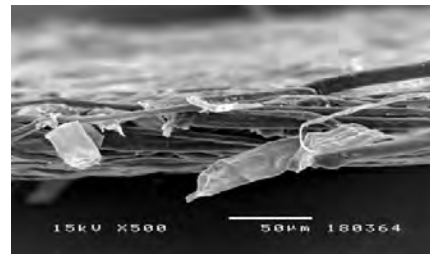


(ซ) NaOH 30%+ผ่านการบดเยื่อ

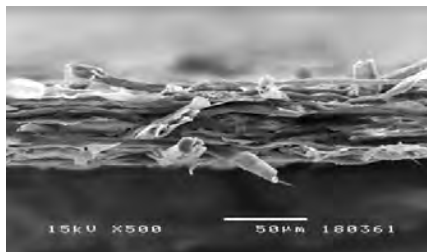
ภาพที่ 4-8 ลักษณะพื้นผิวของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อลำต้นข้าวโพดด้วยวิธีโซดา ที่ปริมาณ NaOH ต่างๆ จากเยื่อที่ไม่ผ่านการบดและที่ผ่านการบด ที่กำลังขยาย 200 เท่า



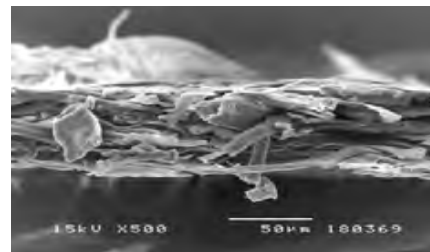
(ก) NaOH 15%+ไม่ผ่านการบดเยื่อ



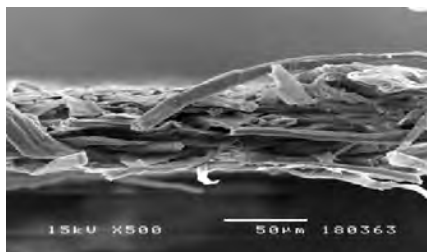
(ข) NaOH 15%+ผ่านการบดเยื่อ



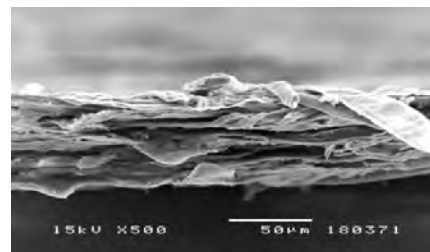
(ค) NaOH 20%+ไม่ผ่านการบดเยื่อ



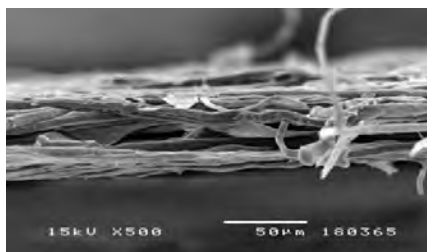
(ง) NaOH 20%+ผ่านการบดเยื่อ



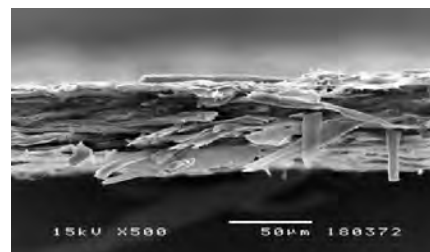
(จ) NaOH 25%+ไม่ผ่านการบดเยื่อ



(ฉ) NaOH 25%+ผ่านการบดเยื่อ



(ช) NaOH 30%+ไม่ผ่านการบดเยื่อ



(ซ) NaOH 30%+ผ่านการบดเยื่อ

ภาพที่ 4-9 ลักษณะภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อลำต้นข้าวโพดแบบไฮดา ที่ปริมาณ NaOH ต่างๆ จากเยื่อที่ไม่ผ่านการบดและที่ผ่านการบด ที่กำลังขยาย 500 เท่า

#### 4.1.11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางที่ 4-5 แสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Anova แบบ single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) ของสมบัติต่างๆ ของเยื่อข้าวโพดที่ผลิตแบบโซดาโดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ กัน ในการพิจารณานั้น สามารถพิจารณาได้จากค่า P-value และ ค่า  $F_{cal}$  กล่าวคือ ถ้าค่า P-value นั้นมีค่าต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าผลของสมบัติของเยื่อมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หรือปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้มีผลต่อสมบัติของเยื่อนั้นๆ อย่างมีนัยสำคัญ และหากค่า  $F_{cal}$  นั้นมีมากกว่าค่า  $F_{crit}$  แสดงว่าผลของสมบัติของเยื่อมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หรือปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้มีผลต่อสมบัติของเยื่อนั้นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากการทดลองพบว่า การใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อที่ระดับต่างๆ มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยดูได้จากค่า P-value ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ทุกกรณี รวมถึงดูได้จากค่า F ซึ่งค่า  $F_{cal}$  มีค่ามากกว่าค่า  $F_{crit}$  ทุกกรณี

**ตารางที่ 4-5** ผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆ ต่อสมบัติเยื่อข้าวโพด

สมบัติต่างๆ ของเยื่อ	P-value	$F_{cal}$	$F_{crit}$
1. ผลผลิตเยื่อ	3.143E-05*	128.894	5.192
2. ส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ	8.404E-07*	553.955	5.192
3. คับปานัมเบอร์	2.350E-08*	2321.888	5.192
4. ความเป็นอิสระของเยื่อก่อนการบดเยื่อ	6.337E-06*	246.007	5.192
5. ปริมาณด่างที่หลงเหลือจากการต้มเยื่อ	9.633E-08*	1319.804	5.192
6. ปริมาณไฮโดเซลลูโลส	7.350E-08*	1470.475	5.192
7. ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส	2.360E-08*	2319.173	5.192
8. ปริมาณเฮมิเซลลูโลส	2.760E-05*	135.948	5.192
9. ปริมาณลิกนิน	6.350E-07*	619.988	5.192
10. ปริมาณสารอื่นๆ	0.001698*	24.845	5.192

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



ตารางที่ 4-6 แสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติของการบดเยื่อและการใช้ไซเตียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของแผ่นขึ้นทดสอบและลักษณะของเส้นใยซึ่งเป็นการวิเคราะห์สถิติโดยใช้วิธี Anova แบบ Two factor with replication ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยพิจารณาจากค่า P-value และค่า F พบว่า การบดเยื่อนั้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อลักษณะของแผ่นขึ้นทดสอบและลักษณะของเส้นใยแทบทุกรายการ ยกเว้นปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่การบดเยื่อไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาต่อสมบัติของแผ่นขึ้นทดสอบและลักษณะของเส้นใย พบว่า การผลิตเยื่อแบบโซดามีผลต่อ ความหนาแน่น ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ความขาวสว่าง และความทึบแสง อย่างมีนัยสำคัญต่างสถิติ

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยดูปริมาณไซเตียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่างๆว่าส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติของแผ่นขึ้นทดสอบและเส้นใยจากเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่อและผ่านการบดเยื่อหรือไม่ โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor ในการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 4-7 พบว่า การใช้ปริมาณไซเตียมไฮดรอกไซด์ระดับต่างๆในการต้มเยื่อ ส่งผลต่อความหนาแน่น ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ความขาวสว่างและความทึบแสงของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อที่ไม่ผ่านการบดเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ความขาวสว่าง ความทึบแสง รวมถึง ความหักงของเส้นใยของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการบดเยื่อ ด้วยระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากผลการศึกษานหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อวิธีโซดาจากลำต้นข้าวโพดที่ระดับปริมาณไซเตียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ เพื่อนำภาวะที่ได้ไปใช้ในการทดลองการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรในการทดลองตอนที่ 2 นั้น จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้พบว่า จะทำการเลือกภาวะการต้มเยื่อที่ใช้ระดับไซเตียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักต้นข้าวโพดแห้งและมีการบดเยื่อก่อนนำไปทำการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบมาเป็นภาวะควบคุม เนื่องจากการต้มเยื่อที่ระดับปริมาณไซเตียมไฮดรอกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 20 พบว่ายังมีปริมาณส่วนที่ไม่เป็นเยื่ออยู่สูงและความแข็งแรงของแผ่นขึ้นทดสอบมีค่าต่ำ ส่วนการต้มเยื่อที่ระดับปริมาณไซเตียมไฮดรอกไซด์สูงกว่าร้อยละ 20 เริ่มทำให้ผลผลิตเยื่อมีแนวโน้มลดลงและเริ่มมีปริมาณต่างหลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อที่มากเกินไป ทำให้สิ้นเปลืองสารเคมี และในการบดเยื่อก่อนการขึ้นแผ่นทดสอบนั้นช่วยปรับปรุงสมบัติทางด้านความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุของแผ่นขึ้นทดสอบให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย ดังนั้นจึงควรมีการบดเยื่อก่อนการขึ้นแผ่นทดสอบของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปร

ตารางที่ 4-6 ผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้ปริมาณไซโตเดียมไฮดรอกไซด์และการบดเยื่อที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของแผ่นขึ้นทอสอบและเส้นใย

สมบัติต่างๆ ของแผ่นขึ้นทอสอบและเส้นใย	A			B			A*B		
	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>
1. ความหนาแน่น	6.527E-06*	107.274	5.318	4.401E-04*	20.112	4.066	0.06945	3.501	4.066
2. ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	8.098E-06*	101.268	5.318	2.122E-05*	46.273	4.066	0.08398	3.194	4.066
3. ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	2.699E-04*	37.993	5.318	1.839E-05*	48.065	4.066	0.26536	1.595	4.066
4. ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก	7.095E-06*	104.913	5.318	0.154552	2.295	4.066	0.19388	1.992	4.066
5. ความขาวสว่าง	3.478E-10*	1332.429	5.318	2.876E-11*	1439.292	4.066	0.12309	2.616	4.066
6. ความทึบแสง	2.944E-08*	434.460	5.318	6.262E-06*	63.830	4.066	0.1511	2.326	4.066
7. ความยาวเส้นใยแบบ LWW	3.455E-05*	68.290	5.318	0.073833	3.401	4.066	0.26395	1.601	4.066
8. ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก	0.296007	1.250	5.318	0.504234	0.851	4.066	0.53231	0.791	4.066
9. ความโค้งงอของเส้นใย	1.905E-04*	42.092	5.318	0.094315	3.013	4.066	0.25271	1.655	4.066
10. ความหักงอของเส้นใย	1.996E-07*	266.495	5.318	0.186438	2.043	4.066	0.1731	2.142	4.066
11. ความกว้างของเส้นใย	4.010E-04*	33.744	5.318	0.174217	2.133	4.066	0.27735	1.541	4.066

หมายเหตุ A คือ ผลของการบดเยื่อ B คือ ผลของการผลิตเยื่อแบบไซตา A\*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างการบดเยื่อและการผลิตเยื่อแบบไซตา

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

ตารางที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์สถิติการใช้ปริมาณ NaOH ที่ระดับต่างๆ ต่อสมบัติของแผ่นขึ้นทดสอบและเส้นใย

สมบัติต่างๆ ของแผ่นขึ้นทดสอบและเส้นใย	ไม่ผ่านการบดเยื่อ			ผ่านการบดเยื่อ		
	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>
1. ความหนาแน่น	0.0026824*	33.692	6.591	0.055555	6.171	6.591
2. ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	0.0078225*	19.080	6.591	0.002261*	36.840	6.591
3. ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	0.0063624*	21.328	6.591	0.002416*	35.586	6.591
4. ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก	0.1300975	3.474	6.591	0.695438	0.512	6.591
5. ความขาวสว่าง	8.697E-06*	617.521	6.591	4.37E-06*	871.929	6.591
6. ความทึบแสง	0.0012767*	49.538	6.591	0.003874*	27.772	6.591
7. ความยาวเส้นใยแบบ LWW	0.6917656	0.518	6.591	0.070789	5.284	6.591
8. ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก	0.6705804	0.557	6.591	0.429816	1.154	6.591
9. ความโค้งงอของเส้นใย	0.1268418	3.539	6.591	0.603399	0.691	6.591
10. ความหักงอของเส้นใย	0.5581510	0.792	6.591	3.67E-05*	299.626	6.591
11. ความกว้างของเส้นใย	0.0859934	4.645	6.591	0.554976	0.800	6.591

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

## 4.2 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพด

ผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 นี้เป็นผลการทดลองที่ได้จากการทดลองตอนที่ 2 ซึ่งเป็นการตัดแปรการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพด โดยการเติมสารแอนทราควิโนน (anthraquinone, AQ) และ/หรือ เมทานอล (methanol, MeOH) โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมจากตอนที่ 1 ซึ่งคือ ปริมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักลำต้นข้าวโพดแห้ง มาทำการเติมแอนทราควิโนนร้อยละ 0, 0.1, 0.2 และ 0.4 ของน้ำหนักลำต้นข้าวโพดแห้ง และ/หรือ เติมนเมทานอลร้อยละ 0, 20 และ 40 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด โดยต้มเยื่อที่ภาวะเดิมคือ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที จากนั้นทำการทดสอบสมบัติของเยื่อและปริมาณต่างที่หลงเหลือจากการต้มเยื่อ นำเยื่อที่ได้มาทำการบดเยื่อก่อนขึ้นแผ่นทดสอบแล้วทำการทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ ได้ผลการทดลองดังนี้

### 4.2.1 ผลผลิตเยื่อและส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ

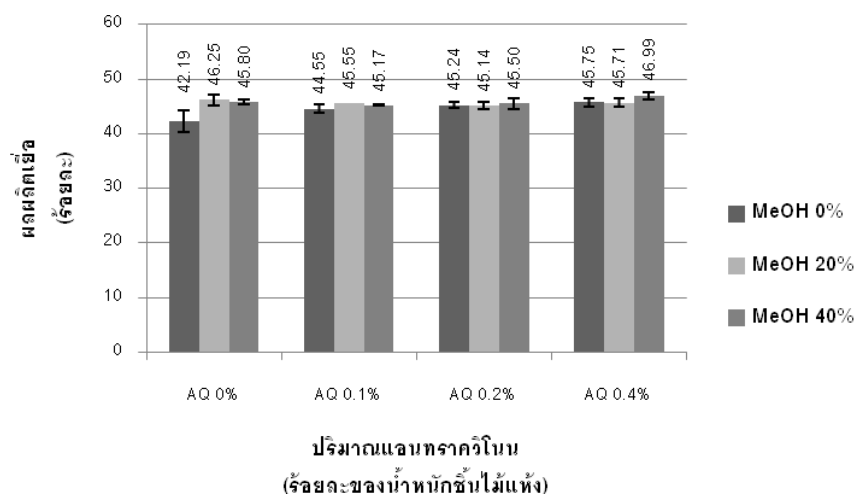
การผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรเมื่อมีการเติมแอนทราควิโนน และ/หรือเมทานอลพบว่า ให้ผลผลิตเยื่อสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการผลิตเยื่อแบบโซดา และเมื่อทำการเปรียบเทียบเป็นร้อยละพบว่า มีผลผลิตเยื่อเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 7 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-8 ทั้งนี้เนื่องจากแอนทราควิโนนและเมทานอลต่างช่วยกันป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรต โดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลสในเส้นใย จึงส่งผลทำให้การผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรนั้นมีผลผลิตเยื่อที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณการเติมแอนทราควิโนนและ/หรือ เมทานอลลงไปในการบดเยื่อ พบว่าเมื่อทำการใส่แอนทราควิโนนเพียงอย่างเดียวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.1 เป็น 0.2 และ 0.4 ของน้ำหนักลำต้นข้าวโพดแห้ง ส่งผลให้ผลผลิตเยื่อมีค่าเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อทำการใส่เมทานอลเพียงอย่างเดียวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20 เป็น 40 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด กลับพบว่าผลผลิตเยื่อเริ่มมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่การใส่แอนทราควิโนนร่วมกับเมทานอลในระดับต่างๆ ในการต้มเยื่อ จากการทดลองพบว่าให้ผลผลิตเยื่อมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยภาวะที่มีการเติมแอนทราควิโนนร้อยละ 0.4 และเมทานอลร้อยละ 40 ให้ผลผลิตเยื่อสูงสุดดังแสดงไว้ในภาพที่ 4-10

เมื่อนำผลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อวิเคราะห์ผลของการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลในการต้มเยื่อดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-11 หน้า 96 พบว่า การเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลในการต้มเยื่อส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลผลิตเยื่อที่ได้ โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.020182 สำหรับการเติมแอนทราควิโนน และมีค่าเท่ากับ 0.002089 สำหรับการ

เติมเมทานอล และปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลร่วมกันมีผลต่อผลผลิตเชื้อที่ได้อย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.008647 เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติถึงผลของปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ต่อผลผลิตเชื้อซึ่งแสดงในตารางที่ 4-14 หน้า 99 พบว่าการใส่ปริมาณแอนทราควิโนนเพียงอย่างเดียวในปริมาณต่างๆ ส่งผลต่อผลผลิตเชื้ออย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.015793) ส่วนการใส่แอนทราควิโนนในปริมาณต่างๆ ร่วมกับเมทานอลที่ระดับร้อยละ 20 กับ 40 ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลผลิตเชื้อ เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติถึงผลของปริมาณเมทานอลที่ใช้ต่อผลผลิตเชื้อซึ่งแสดงดังตารางที่ 4-17 หน้า 102 พบว่าการใส่เมทานอลเพียงอย่างเดียวในปริมาณต่างๆ ส่งผลต่อผลผลิตเชื้ออย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.013920) แต่การใส่เมทานอลในปริมาณต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนที่ระดับร้อยละ 0.1, 0.2 และ 0.4 ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลผลิตเชื้อ

**ตารางที่ 4-8** สมบัติของเชื้อข้าวโพดที่ผลิตได้จากวิธีโซดาตัดแปร

ภาวะ	ผลผลิตเชื้อ (% ± SD)	ส่วนที่ไม่เป็นเชื้อ (% ± SD)	ค่าค้ำป่านัมเบอร์
1. AQ 0% MeOH 0%	42.19±0.13	1.99±0.66	23.30±0.30
2. AQ 0% MeOH 20%	46.24±1.00	1.90±0.13	18.81±0.51
3. AQ 0% MeOH 40%	45.80±0.45	2.32±0.62	17.78±0.60
4. AQ 0.1% MeOH 0%	44.54±0.78	2.42±0.37	19.87±0.05
5. AQ 0.1% MeOH 20%	45.54±0.01	2.34±0.39	16.00±0.10
6. AQ 0.1% MeOH 40%	45.16±0.11	2.32±0.31	14.19±0.22
7. AQ 0.2% MeOH 0%	45.24±0.60	1.79±0.24	19.58±0.45
8. AQ 0.2% MeOH 20%	45.14±0.67	1.99±0.06	14.44±0.33
9. AQ 0.2% MeOH 40%	45.50±1.05	2.42±0.21	14.27±0.36
10. AQ 0.4% MeOH 0%	45.74±0.73	2.01±0.31	19.05±0.22
11. AQ 0.4% MeOH 20%	45.71±0.76	2.20±0.44	14.76±0.05
12. AQ 0.4% MeOH 40%	46.99±0.71	2.16±0.01	13.72±0.23



ภาพที่ 4-10 ผลของการผลิตเชื้อแบบไซตาตัดแปรต่อผลผลิตเชื้อ

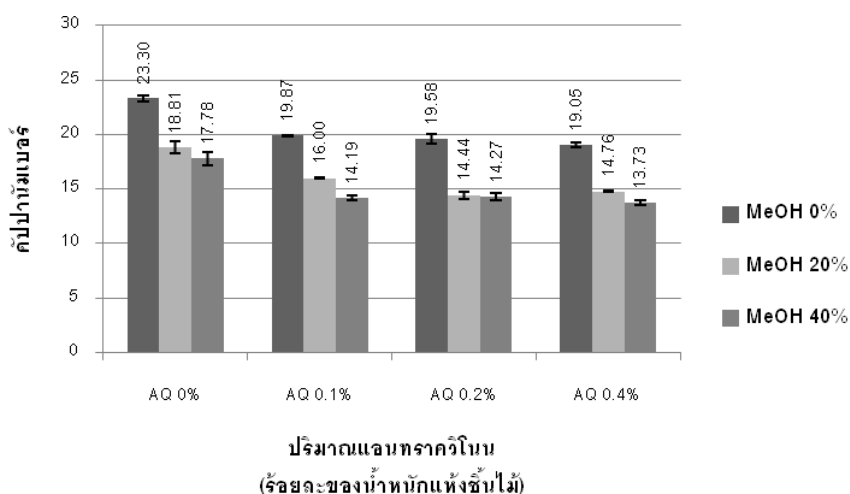
ส่วนที่ไม่เป็นเชื้อเมื่อมีการผลิตเชื้อแบบไซตาตัดแปรพบว่ามียุทธปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 1.9-2.4 (ตารางที่ 4-8) ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-11 หน้า 96 แล้วพบว่าการผลิตเชื้อแบบไซตาตัดแปรไม่ส่งผลต่อส่วนที่ไม่เป็นเชื้ออย่างมีนัยสำคัญ ผลของปริมาณแอนทราควิโนนและปริมาณเมทานอลที่ใช้ก็ไม่ส่งผลต่อส่วนที่เป็นเชื้ออย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกัน ดังแสดงไว้ในแสดงตารางที่ 4-14 หน้า 99 และตารางที่ 4-17 หน้า 102 ตามลำดับ

ฉะนั้นจากการทดลองการผลิตเชื้อแบบไซตาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพดโดยการเติมแอนทราควิโนน และ/หรือ เมทานอล จะเห็นได้ว่า การเติมแอนทราควิโนน และ/หรือ เมทานอล ให้ผลผลิตเชื้อเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้ค่อนข้างไปในทิศทางเดียวกับการทดลองการผลิตเชื้อแบบไซตาเติมสารแอนทราควิโนนและเมทานอลจากต้นอ้อย ที่พบว่า การเติมแอนทราควิโนนร่วมกับเมทานอลในการผลิตเชื้อจากต้นอ้อยนั้นช่วยส่งผลให้มีผลผลิตเชื้อที่เพิ่มขึ้น [17] และให้ผลการทดลองไปในทางเดียวกับการผลิตเชื้อแบบไซตาโดยเติมสารแอนทราควิโนนจากลำต้นทานตะวัน ที่พบว่า การเติมแอนทราควิโนนในการต้มเยื่อนั้นช่วยส่งผลให้มีผลผลิตเชื้อเพิ่มขึ้น [20]

#### 4.2.2 คัปปานัมเบอร์

จากตารางที่ 4-8 หน้า 71 การผลิตเชื้อแบบไซตาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพดโดยการเติมสารแอนทราควิโนน และ/หรือ เมทานอล ส่งผลให้ค่าคัปปานัมเบอร์ลดลงมากเมื่อเทียบกับการผลิตเชื้อแบบไซตา เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลในกระบวนการผลิตเชื้อแบบไซตาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพดดังภาพที่ 4-11 พบว่าเมื่อทำการเติม

ปริมาณแอนทราควิโนนอย่างเดียวนั้นปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.1 เป็น 0.2 และ 0.4 ค่าค่าดัชนีเบอร์มีแนวโน้มลดลง แต่ลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น คือลดลงจาก 19.87 เป็น 19.58 และ 19.05 ตามลำดับ เช่นเดียวกับการเติมเมทานอลเพียงอย่างเดียวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20 เป็น 40 ค่าดัชนีเบอร์มีแนวโน้มลดลง จาก 18.81 เป็น 17.78 หากแต่เมื่อทำการเติมสารแอนทราควิโนนร่วมกับเมทานอล พบว่า ค่าดัชนีเบอร์มีค่าลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับการผลิตเยื่อแบบโซดาหรือภาวะที่มีการใส่แอนทราควิโนนหรือเมทานอลเพียงอย่างเดียว โดยการเติมปริมาณแอนทราควิโนนที่ร้อยละ 0.4 ร่วมกับเมทานอลร้อยละ 40 มีค่าดัชนีเบอร์ต่ำสุด



ภาพที่ 4-11 ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อค่าดัชนีเบอร์

ทั้งนี้อาจเนื่องจากแอนทราควิโนนเป็นสารที่ช่วยเร่งการตัดพันธะเบต้าเอริลอีเทอร์ ( $\beta$ -aryl ether) ในลิกนินจึงส่งผลให้มีปฏิกิริยาการละลายลิกนินออกจากเยื่อได้ดีขึ้น ในขณะที่ช่วยป้องกันการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรต จึงส่งผลให้ค่าดัชนีเบอร์ลดลง [27] ส่วนเมทานอลเป็นสารที่ช่วยให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ มีการแทรกซึมเข้าไปในชิ้นไม้ได้ดี ช่วยทำให้ลิกนินที่อยู่ในเนื้อไม้ต่างๆ เกิดการแยกเป็นโมเลกุลเล็กๆ จึงทำให้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับลิกนินได้ดี และยังช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยา lignin condensation ในกระบวนการผลิตเยื่ออีกด้วยจึงส่งผลให้การผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรมีค่าดัชนีเบอร์ที่ลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับการผลิตเยื่อแบบโซดา และเมื่อมีการใส่แอนทราควิโนนร่วมกับเมทานอลส่งผลให้มีการละลายลิกนินออกจากชิ้นไม้ได้ดียิ่งขึ้น และจากภาพที่ 4-11 จะสังเกตเห็นได้ว่าการเติมเยื่อที่ได้มีค่าดัชนีเบอร์ลดลงได้ไม่มากจากนี้แล้ว ต้องอาศัยกระบวนการอย่างอื่นเพื่อลดค่า

ค่าปฏิกิริยาเบอริแทน เช่น กระบวนการใช้ออกซิเจนในการละลายลิกนินออก (oxygen delignification) หรือการฟอกเยื่อ เป็นต้น

การวิเคราะห์ผลทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-11 หน้า 96 แสดงให้เห็นว่าการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลในการต้มเยื่อส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าคัปานัมเบอริ โดยมีความ P-value เท่ากับ 0.0000000001725 สำหรับการเติมแอนทราควิโนน และค่า P-value เท่ากับ 0.000000000008339 สำหรับการเติมเมทานอล และจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติถึงผลของระดับปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ซึ่งแสดงในตารางที่ 4-14 หน้า 99 แสดงให้เห็นว่าการใส่ปริมาณแอนทราควิโนนในปริมาณต่างๆ ร่วมกับเมทานอลที่ระดับร้อยละ 0, 20 กับ 40 ส่งผลต่อค่าคัปานัมเบอริอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีความ P-value เท่ากับ 0.000431, 0.000458 และ 0.001425 ตามลำดับ ส่วนการวิเคราะห์ผลทางสถิติถึงผลของระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ซึ่งแสดงในตารางที่ 4-17 หน้า 102 พบว่า การใส่เมทานอลในปริมาณต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนที่ระดับร้อยละ 0, 0.1, 0.2 และ 0.4 ส่งผลต่อค่าคัปานัมเบอริอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน โดยมีความ P-value เท่ากับ 0.002880, 0.0000791, 0.001311 และ 0.000192 ตามลำดับ

#### 4.2.3 ค่าความเป็นอิสระของเยื่อก่อนการบดเยื่อ

จากตารางที่ 4-9 พบว่า ค่าความเป็นอิสระของเยื่อที่ผลิตแบบโซดาและผลิตแบบโซดาตัดแปรมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-11 หน้า 96 โดยใช้วิธี Anova แบบ Two factor with replication ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า การเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลไม่มีผลต่อค่าความเป็นอิสระของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติถึงผลของระดับปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ซึ่งแสดงในตารางที่ 4-14 หน้า 99 แสดงให้เห็นว่าการใส่ปริมาณแอนทราควิโนนในปริมาณต่างๆ ร่วมกับเมทานอลที่ระดับร้อยละ 0, 20 กับ 40 ไม่มีผลต่อค่าความเป็นอิสระของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการวิเคราะห์ผลทางสถิติถึงผลของระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ซึ่งแสดงในตารางที่ 4-17 หน้า 102 พบว่า การใส่เมทานอลในปริมาณต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนที่ระดับร้อยละ 0, 0.1, 0.2 และ 0.4 ไม่มีผลต่อค่าความเป็นอิสระของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน



**ตารางที่ 4-9** ความเป็นอิสระของเยื่อก่อนบดเยื่อและปริมาณต่างหลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อแบบวิธีโซดาตัดแปร

ภาวะ	ความเป็นอิสระของเยื่อ ก่อนบดเยื่อ (มิลลิลิตร ± SD)	ปริมาณต่างหลงเหลือ หลังจากการต้มเยื่อ (กรัม/ลิตร ± SD)
1. AQ 0% MeOH 0%	361±4	4.20±0.28
2. AQ 0% MeOH 20%	336±12	3.90±0.42
3. AQ 0% MeOH 40%	362±7	3.70±0.14
4. AQ 0.1% MeOH 0%	344±24	3.60±0.00
5. AQ 0.1% MeOH 20%	350±2	3.60±0.00
6. AQ 0.1% MeOH 40%	354±16	4.10±0.14
7. AQ 0.2% MeOH 0%	335±2	3.40±0.28
8. AQ 0.2% MeOH 20%	344±25	4.00±0.00
9. AQ 0.2% MeOH 40%	361±16	2.60±0.28
10. AQ 0.4% MeOH 0%	348±6	3.20±0.00
11. AQ 0.4% MeOH 20%	363±18	3.60±0.00
12. AQ 0.4% MeOH 40%	363±15	4.00±0.57

#### 4.2.4 ปริมาณต่างที่หลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อ

จากตารางที่ 4-9 พบว่าการต้มเยื่อที่ผลิตโดยวิธีโซดาตัดแปรมีปริมาณต่างหลงเหลืออยู่น้อยกว่าการผลิตเยื่อแบบโซดา โดยพบว่าเมื่อมีการใช้แอนทราควิโนนเพียงอย่างเดียวในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณต่างที่หลงเหลือจากการต้มเยื่อมีค่าลดลง และเมื่อมีการใช้เมทานอลเพียงอย่างเดียวในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณต่างหลงเหลือจากการต้มเยื่อมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้แอนทราควิโนนและเมทานอลช่วยทำให้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับลิกนินได้ดี จึงส่งผลให้ปริมาณต่างที่หลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อมีแนวโน้มลดลง การวิเคราะห์ผลทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-11 หน้า 96 พบว่าการเติมแอนทราควิโนนในการต้มเยื่อส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณต่างหลงเหลือจากการต้มเยื่อ (ค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.009495) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเติมแอนทราควิโนนและการเติมเมทานอลส่งผลต่อปริมาณต่างหลงเหลือจากการต้มเยื่ออย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน (ค่า P-value

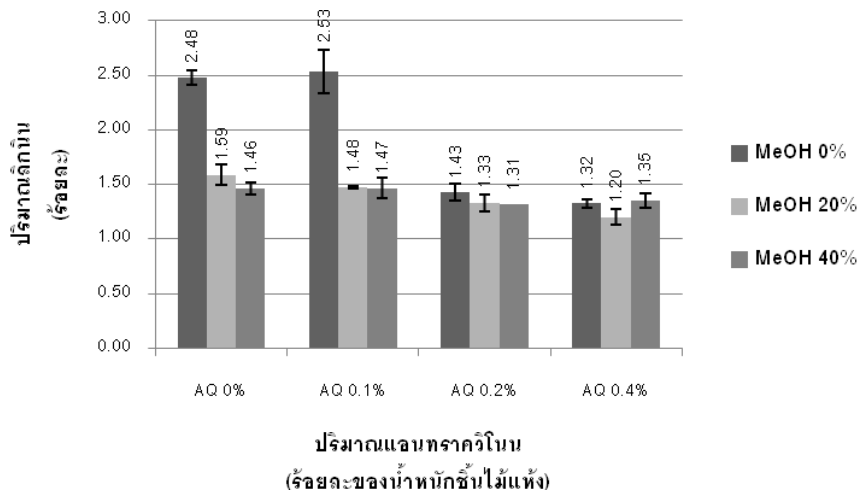
เท่ากับ 0.001389) จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติซึ่งแสดงดังตารางที่ 4-14 หน้า 99 พบว่าระดับปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้มีผลต่อปริมาณต่างหลงเหลือจากการต้มเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ เฉพาะในกรณีของใช้ร่วมกับเมทานอลที่ระดับร้อยละ 0 กับ 40 เท่านั้น ดังจะเห็นได้จากค่า P-value ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.028046 สำหรับเมทานอลที่ระดับร้อยละ 0 และค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.032192 สำหรับเมทานอลที่ระดับร้อยละ 40 และจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติซึ่งแสดงดังตารางที่ 4-17 หน้า 102 พบว่าการใส่เมทานอลในปริมาณต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนที่ระดับร้อยละ 0.1 และ 0.2 ส่งผลต่อปริมาณต่างหลงเหลืออย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.013467 และ 0.020540 ตามลำดับ

#### 4.2.5 องค์ประกอบทางเคมี

เมื่อนำเยื่อข้าวโพดที่ผลิตจากวิธีโซดาตัดแปรมาทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีได้แก่ ปริมาณลิกนิน ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ปริมาณเฮมิเซลลูโลส และปริมาณสารแทรกหรือสารเจือปนอื่นๆ เนื่องจากการทดลองในภาวะที่ใส่ปริมาณแอนทราควิโนนที่ร้อยละ 0.1 ทำการทดลองที่หลังและมีการส่งตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีคนละชุดกับการทดลองอื่นๆ ซึ่งส่งผลให้อาจมีความแปรปรวนบ้าง แต่แนวโน้มที่ได้ยังเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

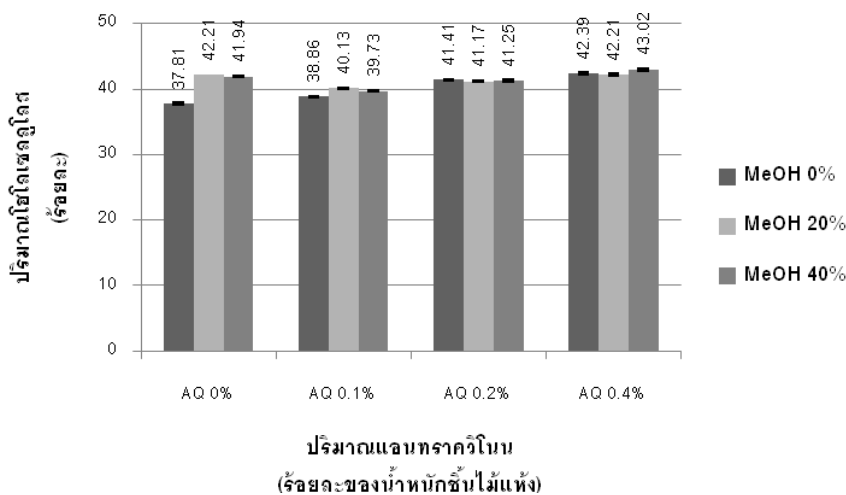
การผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรส่งผลให้ปริมาณลิกนินในเยื่อมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับการผลิตเยื่อแบบโซดาดังแสดงในภาพที่ 4-12 เมื่อพิจารณาถึงการเติมแอนทราควิโนนเพียงอย่างเดียว พบว่า เมื่อมีการเติมแอนทราควิโนนในระดับเพิ่มขึ้น ระดับปริมาณลิกนินในเยื่อมีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาถึงการเติมเมทานอลเพียงอย่างเดียว พบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณการเติมเมทานอล ปริมาณลิกนินในเยื่อจะมีแนวโน้มลดลง ส่วนการใช้แอนทราควิโนนร่วมกับเมทานอลช่วยส่งผลให้ปริมาณลิกนินในเยื่อมีแนวโน้มลดลงซึ่งสอดคล้องกับค่าดับปานัมเบอร์ โดยเมื่อทำการพิจารณาการใส่แอนทราควิโนนที่ระดับคงที่แต่มีการเพิ่มปริมาณการใส่เมทานอลพบว่าปริมาณลิกนินในเยื่อมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2.2 ว่า แอนทราควิโนนเป็นสารช่วยเร่งการตัดพันธะเบต้าเอริลอีเทอร์ ( $\beta$ -aryl ether bond) ในลิกนิน จึงส่งผลให้มีการละลายลิกนินออกจากเยื่อได้ดีขึ้น ในขณะที่เมทานอลเป็นสารที่ช่วยให้โซเดียมไฮดรอกไซด์มีการแทรกซึมเข้าไปในชั้นไม้ได้ดี โดยช่วยทำให้ลิกนินที่อยู่ในเนื้อไม้ต่างๆ เกิดการแยกเป็นโมเลกุลเล็กๆ จึงทำให้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าทำปฏิกิริยาและละลายลิกนินออกจากเส้นใยได้มากขึ้น นอกจากนี้เมทานอลยังช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยา lignin condensation ใน

ระหว่างการผลิตเยื่อ จึงทำให้มีปริมาณลิกนินหลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อน้อยลง และเมื่อมีการใส่แอนทราควิโนนร่วมด้วย จึงยิ่งส่งผลให้มีอัตราการละลายลิกนินออกจากชิ้นไม้ได้ดียิ่งขึ้นนั่นเอง

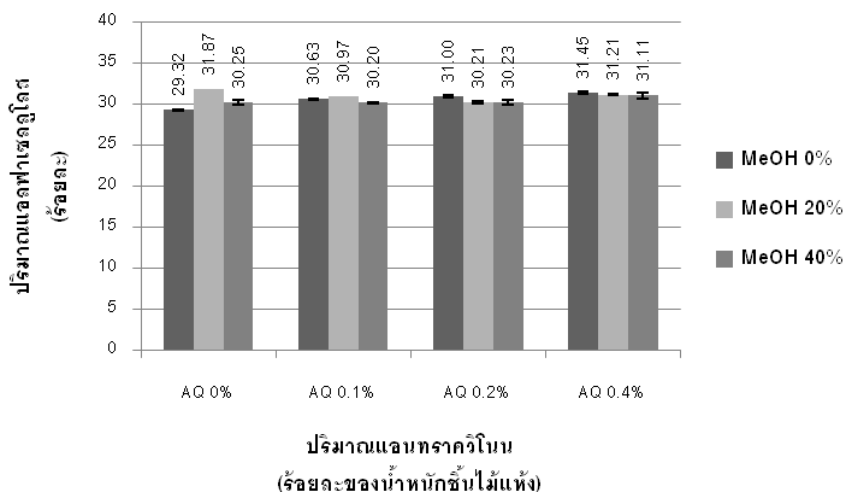


ภาพที่ 4-12 ผลของการผลิตเยื่อแบบไซตาตัดแปรต่อปริมาณลิกนิน

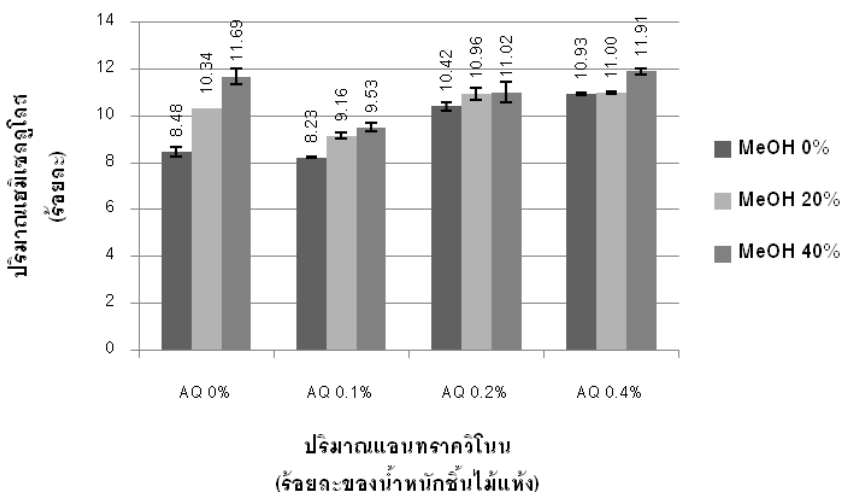
ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส และปริมาณเฮมิเซลลูโลส เมื่อมีการผลิตเยื่อแบบไซตาตัดแปรพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4-13, 4-14 และ 4-15 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-13 ผลของการผลิตเยื่อแบบไซตาตัดแปรต่อปริมาณไฮโดรเซลลูโลส



ภาพที่ 4-14 ผลของการผลิตเยื่อแบบไซตาตัดแปรต่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลส

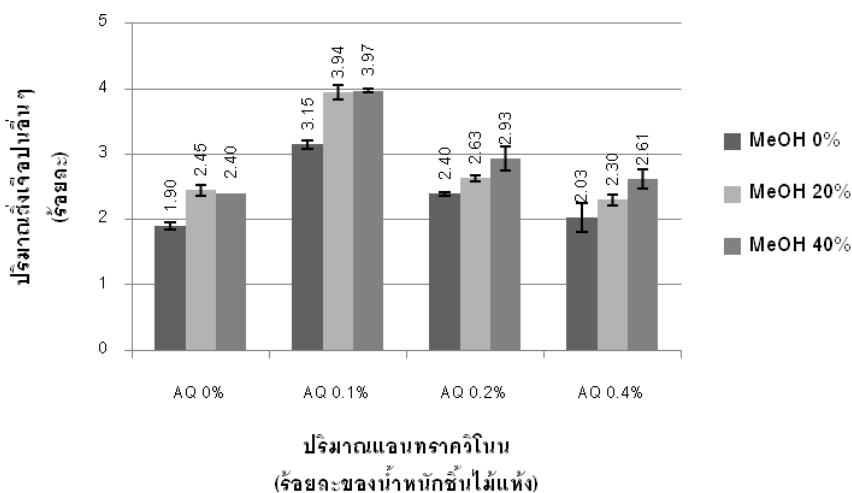


ภาพที่ 4-15 ผลของการผลิตเยื่อแบบไซตาตัดแปรต่อปริมาณเฮมิเซลลูโลส

ในการผลิตเยื่อแบบไซตาตัดแปรเมื่อมีการเติมแอนทราควิโนนเพิ่มขึ้น การเติมเมทานอลเพิ่มขึ้น และการเติมทั้งแอนทราควิโนนและเมทานอลเพิ่มขึ้น พบว่ามีปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส และปริมาณเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้น นั่นคือแอนทราควิโนนและเมทานอลต่างช่วยกันเร่งอัตราการละลายลิกนินออกจากชิ้นไม้ ดังเห็นได้จากมีค่าคัปปานัมเบอร์ต่ำ และมีปริมาณลิกนินต่ำ และจากทฤษฎีถ้ามีอัตราเร่งการละลายลิกนินออกจากไม้สูงจะส่งผลให้คาร์บอไฮเดรตโดนทำลายลดน้อยลง [11] ดังนั้นการเติมแอนทราควิโนนและ/หรือ เมทานอลส่งผล

ให้คาร์บอไฮเดรตโดนทำลายน้อยลง โดยเฉพาะส่วนของเฮมิเซลลูโลสและแอลฟาเซลลูโลส ส่งผลทำให้ปริมาณไฮโดรเซลลูโลสที่พบในเยื่อจึงมีปริมาณที่สูงขึ้น และในกรณีที่มีการใช้แอนทราควิโนนร่วมกับเมทานอลนั้น เป็นการช่วยส่งเสริมให้มีอัตราการละลายลิกนินออกได้เร็วและมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น จึงส่งผลให้มีปริมาณไฮโดรเซลลูโลสที่สูงขึ้น และการที่มีปริมาณไฮโดรเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นนี้เอง จึงส่งผลให้ปริมาณผลผลิตเยื่อเพิ่มขึ้นในการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรร

ปริมาณสารแทรกหรือสารเจือปนอื่นๆ ของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรรพบว่ามีความมากกว่าการผลิตเยื่อแบบโซดาแสดงดังภาพที่ 4-16 เมื่อพิจารณาการเติมแอนทราควิโนนอย่างเดียว พบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณแอนทราควิโนน ปริมาณสารแทรกมีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาการเติมเมทานอลอย่างเดียว พบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณการเติมเมทานอล ปริมาณสารเจือปนอื่นๆ มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน และเมื่อทำการพิจารณาการเติมแอนทราควิโนนร่วมกับเมทานอล พบว่า เมื่อทำการเติมปริมาณแอนทราควิโนนในระดับคงที่แต่มีการแปรผันปริมาณเมทานอลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สารแทรกมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-16 ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรรต่อปริมาณสิ่งเจือปนอื่นๆ

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-11 หน้า 96 พบว่า การเติมเมทานอลและการเติมแอนทราควิโนนในการต้มเยื่อแบบโซดาตัดแปรรส่งผลต่อปริมาณลิกนิน ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ปริมาณเฮมิเซลลูโลส และปริมาณสารเจือปนอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลในการต้มเยื่อนั้นพบว่าส่งผลปริมาณลิกนิน ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส และปริมาณเฮมิเซลลูโลสอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน ยกเว้น

ปริมาณสารเชื้อปนอื่นๆ ที่ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ

จากการวิเคราะห์ทางสถิติถึงผลของปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 4-14 หน้า 99 พบว่า ปริมาณการเติมแอนทราควิโนนในระดับต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณลิกนิน ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ปริมาณเฮมิเซลลูโลส และปริมาณสารแทรก เมื่อมีการเติมปริมาณแอนทราควิโนนในระดับต่างๆ โดยไม่มีการใช้เมทานอลและมีการร่วมกับเมทานอลระดับร้อยละ 20 เนื่องจากค่า P-value มีค่าต่ำกว่า 0.05 นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณการเติมแอนทราควิโนนในระดับต่างๆ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ปริมาณเฮมิเซลลูโลส และปริมาณสารแทรก แต่เมื่อมีการเติมปริมาณแอนทราควิโนนในระดับต่างๆ ร่วมกับเมทานอลระดับร้อยละ 40 (ค่า P-value มีค่าต่ำกว่า 0.05) หากแต่พบว่าไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณลิกนินและปริมาณแอลฟาเซลลูโลส

จากการวิเคราะห์ทางสถิติถึงผลของปริมาณเมทานอลที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 4-17 หน้า 102 พบว่า การเติมเมทานอลในระดับต่างๆ โดยที่ไม่มีแอนทราควิโนนส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อองค์ประกอบทางเคมีที่มีการวิเคราะห์ทั้งหมด (ค่า P-value น้อยกว่า 0.05) เมื่อมีการเติมเมทานอลระดับต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนร้อยละ 0.1 พบว่าส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณลิกนิน ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ปริมาณเฮมิเซลลูโลสและปริมาณสารแทรก (ค่า P-value น้อยกว่า 0.05) แต่ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ส่วนการเติมเมทานอลระดับต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนร้อยละ 0.2 พบว่า ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณแอลฟาเซลลูโลสและปริมาณสารแทรก (ค่า P-value น้อยกว่า 0.05) แต่ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณลิกนิน ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส และปริมาณเฮมิเซลลูโลส และเมื่อทำการเติมเมทานอลระดับต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนร้อยละ 0.4 พบว่า ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณเฮมิเซลลูโลสและปริมาณแอลฟาเซลลูโลส(ค่า P-value น้อยกว่า 0.05) เท่านั้น

#### 4.2.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย

ความยาวของเส้นใยและลักษณะของเส้นใยในการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรก่อนการบดเยื่อและหลังการบดเยื่อแสดงดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยเยื่อข้าวโพดที่ผลิตได้จากวิธีไฮดาตัดแปร

สภาวะ	ไม่ผ่านการบดเยื่อ					ผ่านการบดเยื่อ				
	ความยาวเส้นใยแบบ LWW (มิลลิเมตร±SD)	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%±SD)	ความโค้งงอของเส้นใย	ความหักงอของเส้นใย	ความกว้างของเส้นใย (ไมโครเมตร±SD)	ความยาวเส้นใยแบบ LWW (มิลลิเมตร±SD)	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%±SD)	ความโค้งงอของเส้นใย	ความหักงอของเส้นใย	ความกว้างของเส้นใย (ไมโครเมตร±SD)
1. AQ 0% MeOH 0%	1.561±0.020	36.24±1.14	0.088±0.001	1.122±0.042	21.76±0.22	1.411±0.037	37.12±0.83	0.111±0.002	1.458±0.001	20.92±0.11
2. AQ 0% MeOH 20%	1.535±0.073	38.54±0.72	0.086±0.014	1.243±0.377	21.19±0.28	1.272±0.009	38.48±1.65	0.095±0.008	1.218±0.029	20.88±0.49
3. AQ 0% MeOH 40%	1.478±0.012	38.60±1.19	0.082±0.006	0.828±0.012	21.61±0.16	1.318±0.011	35.87±0.08	0.095±0.003	1.041±0.011	21.44±0.13
4. AQ 0.1% MeOH 0%	1.540±0.008	36.62±0.26	0.080±0.005	0.812±0.045	21.42±0.59	1.290±0.007	37.93±0.91	0.106±0.009	1.073±0.023	21.11±0.13
5. AQ 0.1% MeOH 20%	1.529±0.065	35.99±1.09	0.070±0.003	0.811±0.062	21.18±0.29	1.250±0.007	38.77±0.96	0.094±0.002	0.993±0.068	20.95±0.25
6. AQ 0.1% MeOH 40%	1.487±0.035	35.78±1.03	0.077±0.007	0.812±0.100	20.83±0.11	1.292±0.008	36.78±0.63	0.090±0.000	0.994±0.057	20.83±0.02
7. AQ 0.2% MeOH 0%	1.591±0.023	37.24±0.19	0.087±0.007	1.257±0.124	20.69±0.26	1.345±0.001	36.49±0.93	0.108±0.010	1.403±0.289	20.42±0.28
8. AQ 0.2% MeOH 20%	1.528±0.020	38.21±2.01	0.080±0.000	1.099±0.051	20.72±0.20	1.308±0.072	37.12±0.46	0.096±0.009	1.266±0.032	20.29±0.12
9. AQ 0.2% MeOH 40%	1.449±0.049	37.83±0.24	0.074±0.003	0.834±0.088	20.74±0.10	1.350±0.011	37.04±0.42	0.093±0.002	1.038±0.053	20.63±0.47
10. AQ 0.4% MeOH 0%	1.528±0.057	36.48±0.57	0.074±0.005	0.811±0.066	21.38±0.16	1.330±0.013	36.79±0.61	0.090±0.003	1.004±0.002	20.99±0.24
11. AQ 0.4% MeOH 20%	1.449±0.025	39.38±1.27	0.068±0.005	0.865±0.005	21.01±0.18	1.265±0.046	38.34±1.09	0.084±0.005	1.025±0.007	20.63±0.05
12. AQ 0.4% MeOH 40%	1.493±0.054	38.07±0.38	0.071±0.007	0.796±0.093	20.81±0.11	1.263±0.116	38.29±3.85	0.094±0.006	1.021±0.023	21.33±0.89

จากตารางที่ 4-10 จะเห็นได้ว่าความยาวของเส้นใยก่อนการบดเยื่อในแต่ละภาวะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักคืออยู่ในช่วง 1.49-1.59 มิลลิเมตร เมื่อใช้ปริมาณเมทานอลในระดับเพิ่มขึ้น เส้นใยมีขนาดสั้นลง อาจเป็นผลเนื่องมาจากการที่เมทานอลช่วยทำให้ด่างมีการแทรกซึมในชิ้นไม้ได้ดี จึงส่งผลให้สายโซ่ของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสอาจถูกทำลาย จึงส่งผลให้เส้นใยมีขนาดสั้นลงไปด้วย และเมื่อมีการบดเยื่อพบว่าเส้นใยมีขนาดสั้นลง เนื่องจากในการบดเยื่อนั้นที่บิดจากพื้นบดอาจตัดเส้นใยให้มีขนาดสั้นลง นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นใยขนาดเล็กที่ผลิตได้จากวิธีโซดาตัดแปรมีปริมาณที่พบอยู่ในช่วงร้อยละ 35-39 ซึ่งใกล้เคียงกับเยื่อที่ผลิตได้แบบวิธีโซดา ส่วนความกว้างของเส้นใยของการผลิตเยื่อแบบโซดากับโซดาตัดแปรมีค่าใกล้เคียงกันมาก เส้นใยเมื่อผ่านการบดเยื่อพบว่าจะมีความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยมากขึ้นทุกภาวะของการทดลอง ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะเส้นใยมีความอ่อนตัวมากขึ้นเมื่อถูกนิรนุญละลายออกจากเส้นใยมาก จึงส่งผลให้เส้นใยมีความโค้งงอและความหักงอเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยหลังการบดเยื่อที่ผลิตจากเยื่อโซดาตัดแปรมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการผลิตเยื่อแบบโซดา

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติเมื่อดูผลของการใช้แอนทราควิโนนและเมทานอล ที่มีต่อสมบัติลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใย ดังแสดงในตารางที่ 4-13 หน้า 98 พบว่า การเติมเมทานอลส่งผลต่อความยาวเส้นใยแบบ LWW ก่อนการบดเยื่อ ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กก่อนการบดเยื่อ ความหักงอของเส้นใยก่อนการบดเยื่อ ความยาวเส้นใยแบบ LWW หลังการบดเยื่อ และความหักงอของเส้นใยหลังการบดเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value ต่ำกว่า 0.05 ส่วนการเติมแอนทราควิโนนในการต้มเยื่อแบบโซดาตัดแปรมีผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กก่อนการบดเยื่อ ความโค้งงอของเส้นใยก่อนการบดเยื่อ ความหักงอของเส้นใยก่อนการบดเยื่อ ความกว้างของเส้นใยก่อนการบดเยื่อ ความโค้งงอของเส้นใยหลังการบดเยื่อ และความหักงอของเส้นใยหลังการบดเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value ต่ำกว่า 0.05 ด้วยเช่นกัน ปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลในการต้มเยื่อนั้น พบว่าไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใย

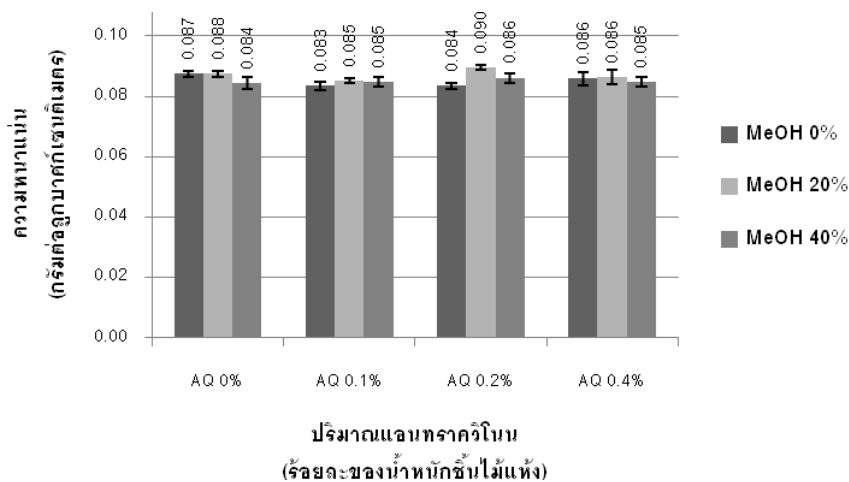
เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติถึงผลของปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ที่มีต่อพื้นฐานวิทยาของเส้นใย ดังแสดงในตารางที่ 4-16 หน้า 101 พบว่า ปริมาณการเติมแอนทราควิโนนในระดับต่างๆ คือ ร้อยละ 0.1, 0.2 และ 0.4 โดยไม่มีการใส่เมทานอลร่วมส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความยาวเส้นใยหลังการบดเยื่อและความหักงอของเส้นใยก่อนการบดเยื่อ เมื่อมีการเติมปริมาณแอนทราควิโนนในระดับต่างๆ ร่วมกับเมทานอลระดับร้อยละ 20 พบว่าส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหักงอของเส้นใยหลังบดเยื่อ และเมื่อมีการเติมปริมาณแอนทราควิโนนในระดับต่างๆ ร่วมกับเมทานอลระดับร้อยละ 40 พบว่าส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความกว้างของเส้นใยก่อนบดเยื่อ



เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติถึงผลของปริมาณเมทานอลที่ใช้ที่มีต่อสัญญาณวิทยาของเส้นใย ดังแสดงในตารางที่ 4-19 หน้า 104 ปริมาณการเติมเมทานอลในระดับต่างๆ คือร้อยละ 20 และ 40 พบว่าส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความยาวเส้นใยแบบ LWW หลังบดเยื่อ และความหักงอของเส้นใยหลังบดเยื่อ เมื่อมีการเติมเมทานอลระดับต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนร้อยละ 0.1 พบว่าส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความยาวเส้นใยแบบ LWW หลังบดเยื่อ เมื่อทำการเติมเมทานอลระดับต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนร้อยละ 0.2 พบว่าส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหักงอของเส้นใยก่อนบดเยื่อ และเมื่อทำการเติมเมทานอลระดับต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนร้อยละ 0.4 พบว่าไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะสัญญาณวิทยาของเส้นใย

#### 4.2.7 ความหนาแน่นปรากฏ

ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตได้จากเยื่อข้าวโพดวิธีโซดาตัดแปรที่ระดับการเติมแอนทราควิโนน และ/หรือ เมทานอลต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4-17 พบว่า ค่าความหนาแน่นของแผ่นขึ้นทดสอบจากการผลิตเยื่อแบบโซดาและแบบโซดาตัดแปรมีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วงความหนาแน่นที่ 0.083-0.090 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



ภาพที่ 4-17 ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อความหนาแน่นของแผ่นขึ้นทดสอบ

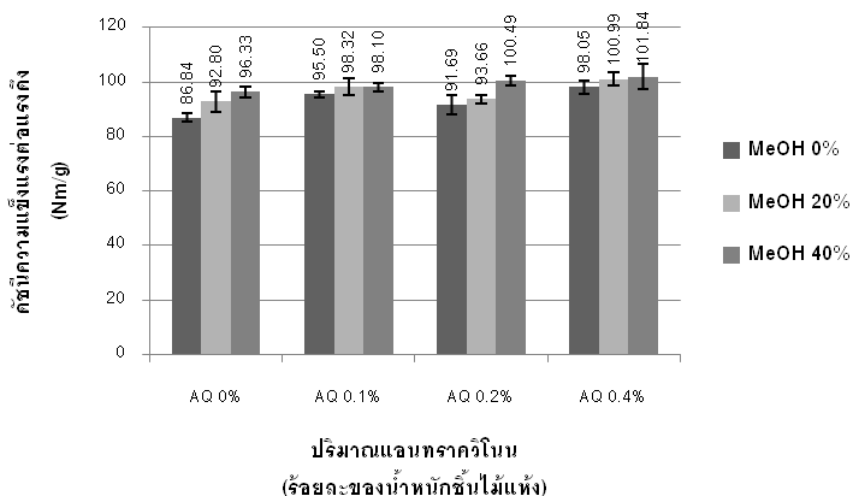
เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-12 หน้า 97 เพื่อดูผลของการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลที่มีต่อความหนาแน่น จะเห็นได้ว่า การเติมทั้งแอนทราควิโนนและเมทานอลไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของแผ่นขึ้นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของระดับปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ที่มีต่อความหนาแน่น

ดังแสดงในตารางที่ 4-15 หน้า 100 พบว่า การใส่ปริมาณแอนทราควิโนนในปริมาณต่างๆ ร่วมกับเมทานอลที่ระดับร้อยละ 20 เท่านั้นที่ส่งผลต่อความหนาแน่นปรากฏอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.041245) ส่วนการใส่แอนทราควิโนนในปริมาณต่างๆ ร่วมกับเมทานอลร้อยละ 0 และ 40 ไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นปรากฏอย่างมีนัยสำคัญ และจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ที่มีต่อความหนาแน่นดังแสดงในตารางที่ 4-18 หน้า 103 พบว่า การใส่เมทานอลในปริมาณต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนที่ระดับร้อยละ 0, 0.1, 0.2 และ 0.4 ไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นปรากฏอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

#### 4.2.8 สมบัติด้านความแข็งแรง

##### 4.2.8.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

แผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อวิธีไซตาตัดแปรมีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่าที่ได้จากการผลิตเยื่อวิธีไซตาแสดงในภาพที่ 4-18 เมื่อพิจารณาการเติมแอนทราควิโนนเพียงอย่างเดียว พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแอนทราควิโนนจาก 0.1 เป็น 0.2 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าลดลง หลังจากนั้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณแอนทราควิโนนเป็น 0.4 กลับพบว่ามีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงขึ้น เมื่อพิจารณาการเติมเมทานอลเพียงอย่างเดียว พบว่า เมื่อใช้ปริมาณเมทานอลที่สูงขึ้น ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าสูงขึ้นตาม และเมื่อพิจารณาการใช้แอนทราควิโนนร่วมกับการใช้เมทานอลในการต้มเยื่อ พบว่า เมื่อใช้ปริมาณแอนทราควิโนนคงที่แต่มีการแปรผันปริมาณเมทานอลเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากแอนทราควิโนนและเมทานอลต่างช่วยกันกำจัดลิกนินออกจากเยื่อได้ดี ส่งผลให้เส้นใยมีความยืดหยุ่น เมื่อนำมาขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบเส้นใยจึงมีการยุบตัวได้ดี ทำให้เส้นใยมีการแนบสัมผัสระหว่างกันได้มากขึ้น การสร้างพันธะเส้นใยระหว่างกันดีมากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงมีแนวโน้มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การผลิตเยื่อแบบไซตาตัดแปรจะมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสเป็นแบบกิ่ง จึงอาจช่วยส่งผลให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยได้ดี แผ่นขึ้นทดสอบจึงมีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงขึ้น นอกจากนี้เฮมิเซลลูโลสยังเป็นตัวที่ทำให้เส้นใยสามารถรับได้ดี เนื่องจากการที่มีโครงสร้างเป็นแบบกิ่ง ส่งผลให้เส้นใยมีความหยุ่นตัวมากขึ้น การแนบตัวกันระหว่างเส้นใยเกิดมากขึ้น จึงส่งผลให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยเกิดได้มากขึ้นตามไปด้วย และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเติมแอนทราควิโนน และ/หรือ เมทานอลในการผลิตเยื่อ ไม่เพียงแต่ช่วยเร่งอัตราการดึงลิกนินออกจากเส้นใยและป้องกันคาร์บอไฮเดรตถูกทำลายเท่านั้น ยังส่งผลให้กระดาษที่ผลิตได้มีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงขึ้นด้วย [15,16,18]

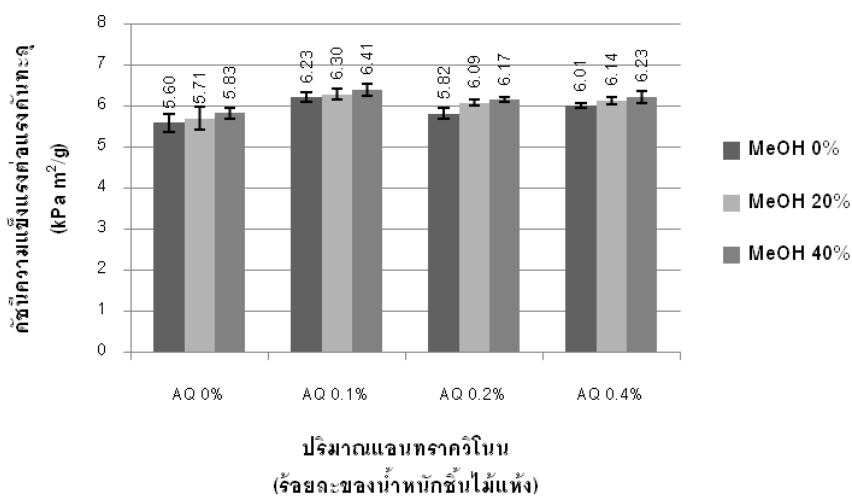


**ภาพที่ 4-18** ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นขึ้นทดสอบ

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-12 หน้า 97 พบว่าการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลในการต้มเยื่อส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value ของแอนทราควิโนนมีค่าเท่ากับ 0.000206 ส่วนค่า P-value ของเมทานอลมีค่าเท่ากับ 0.000404) แต่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ จากการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อดูผลของระดับปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 4-15 หน้า 100 พบว่า การใส่ปริมาณแอนทราควิโนนในปริมาณต่างๆ ร่วมกับเมทานอลที่ระดับร้อยละ 0 กับ 20 ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value เท่ากับ 0.037155 และ 0.010662 ตามลำดับ ส่วนการใส่แอนทราควิโนนในปริมาณต่างๆ ร่วมกับเมทานอลร้อยละ 40 ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ จากการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อดูผลของระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 4-18 หน้า 103 พบว่า การใส่เมทานอลในปริมาณต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนที่ระดับร้อยละ 0 และ 0.2 ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.002884 และ 0.011574 ตามลำดับ หากแต่การใส่เมทานอลในปริมาณต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนที่ระดับร้อยละ 0.1 และ 0.4 ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.2.8.2 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกับความแข็งแรงต่อแรงดึงดังแสดงในภาพที่ 4-19 คือ การผลิตเยื่อแบบไฮดาตัดแปรส่งผลให้มีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมากกว่าการผลิตเยื่อแบบไฮดา ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุขึ้นอยู่กับพันธะเส้นใยเช่นเดียวกับความแข็งแรงต่อแรงดึง เมื่อพิจารณาระดับการเติมแอนทราควิโนน พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแอนทราควิโนนจาก 0.1 เป็น 0.2 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีค่าลดลง หลังจากนั้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณแอนทราควิโนนเป็น 0.4 กลับพบว่ามีค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงขึ้น เมื่อพิจารณาการเติมเมทานอลเพียงอย่างเดียว พบว่า เมื่อใช้ปริมาณเมทานอลที่สูงขึ้น ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีค่าสูงขึ้นตาม และเมื่อพิจารณาการใช้แอนทราควิโนนร่วมกับการใช้เมทานอลในการต้มเยื่อพบว่า เมื่อใช้ปริมาณแอนทราควิโนนคงที่แต่มีการแปรผันปริมาณเมทานอลเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย เนื่องจากเหตุผลที่ได้อธิบายไว้ในกรณีของความแข็งแรงต่อแรงดึง



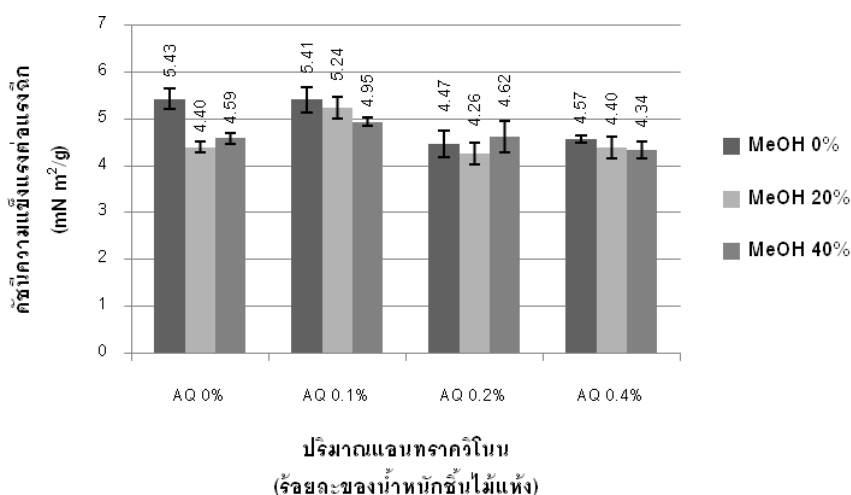
ภาพที่ 4-19 ผลของการผลิตเยื่อแบบไฮดาตัดแปรต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นขึ้นทดสอบ

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-12 หน้า 97 พบว่าการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลในการต้มเยื่อส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า P-value สำหรับการเติมแอนทราควิโนนเท่ากับ  $7.237E-06$  และมีค่า P-value สำหรับการเติมเมทานอลเท่ากับ  $0.003152$  แต่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุอย่างมีนัยสำคัญ

จากการวิเคราะห์ทางสถิติถึงผลของระดับปริมาณของแอนทราควิโนนดังแสดงในตารางที่ 4-15 หน้า 100 พบว่า การใส่ปริมาณแอนทราควิโนนในปริมาณต่างๆ ร่วมกับเมทานอลที่ระดับร้อยละ 0, 20 และ 40 พบว่าส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.023547, 0.010555 และ 0.042284 ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติถึงผลของระดับปริมาณเมทานอลดังแสดงในตารางที่ 4-18 หน้า 103 พบว่า การใส่เมทานอลในปริมาณต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนที่ระดับร้อยละ 0, 0.1, 0.2 และ 0.4 ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

#### 4.2.8.2 ความแข็งแรงต่อแรงฉีก

ความแข็งแรงต่อแรงฉีกเป็นความแข็งแรงที่ขึ้นอยู่กับความยาวและความแข็งแรงของเส้นใยมากกว่าพันธะของเส้นใย ลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบของเส้นใยมีหน้าที่เสริมสร้างให้ความแข็งแรงให้แก่เส้นใย แต่การผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรร่งผลให้มีการละลายลิกนินออกจากเส้นใยปริมาณมาก จึงส่งผลให้เส้นใยมีความแข็งแรงลดลง ดังนั้นแผ่นขึ้นทดสอบที่ทำมาจากเยื่อโซดาตัดแปรร่งจึงมีความแข็งแรงต่อแรงฉีกลดลง ดังแสดงในภาพที่ 4-20 นอกจากนี้การผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรร่งผลให้มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการเรียงตัวของเฮมิเซลลูโลสเป็นการเรียงตัวแบบหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบ (amorphous) ส่งผลให้เมื่อทดสอบความแข็งแรงต่อแรงฉีกจึงมีค่าลดลง



ภาพที่ 4-20 ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรร่งต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของแผ่นขึ้นทดสอบ

เมื่อพิจารณาการเติมแอนทราควิโนนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเพียงชนิดเดียว พบว่า ความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีแนวโน้มลดลง ส่วนการเติมปริมาณเมทานอลในระดับที่เพิ่มขึ้น กลับพบว่า ความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อมีการเติมแอนทราควิโนนร่วมกับเมทานอล โดยเมื่อใช้ปริมาณแอนทราควิโนนคงที่ๆ ระดับร้อยละ 0.1 และ ร้อยละ 0.4 แต่มีการแปรผันเมทานอลในระดับที่เพิ่มขึ้น กลับส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีแนวโน้มลดลง

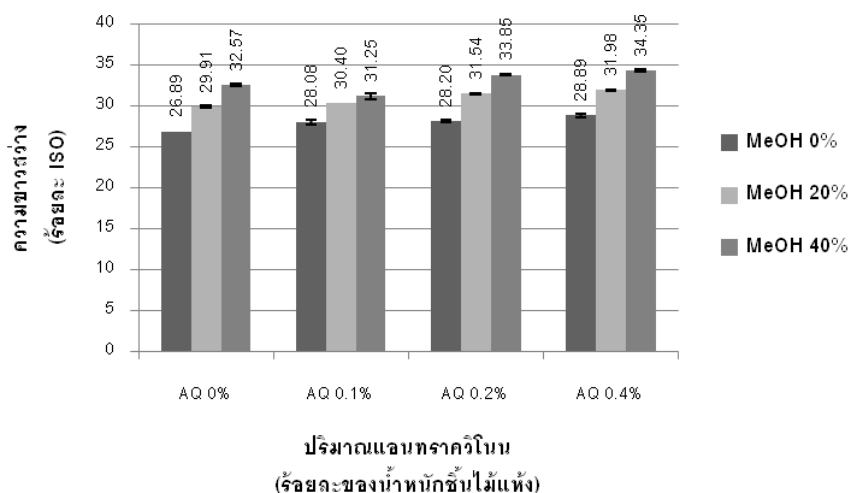
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-12 หน้า 97 พบว่า การเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลในการต้มเยื่อส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงฉีกอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value เกือบเท่ากับ 0 (ค่า P-value เท่ากับ 0.000000002084 และ 0.0000004768 ตามลำดับ) นอกจากนี้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลก็ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงฉีกอย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย (ค่า P-value เท่ากับ 0.000004976) จากการวิเคราะห์ทางสถิติถึงผลของระดับปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 4-15 หน้า 100 พบว่า การใส่ปริมาณแอนทราควิโนนในปริมาณต่างๆ ร่วมกับเมทานอลที่ระดับร้อยละ 0, 20 และ 40 พบว่าส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงฉีกอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.000764, 0.000120 และ 0.009657 ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติถึงผลของระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 4-18 หน้า 103 พบว่า การใส่เมทานอลในปริมาณต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนที่ระดับร้อยละ 0, 0.1 และ 0.2 ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงต่อแรงฉีก โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.000920, 0.016533 และ 0.042126 ตามลำดับ หากแต่การใส่เมทานอลในปริมาณต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนที่ระดับร้อยละ 0.4 กลับพบว่าไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงต่อแรงฉีกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

#### 4.2.9 สมบัติด้านทัศนศาสตร์

##### 4.2.9.1 ความขาวสว่าง

แผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อวิธีโซดาตัดแปร มีค่าความขาวสว่างมากกว่าแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อวิธีโซดา ดังแสดงในภาพที่ 4-21 เนื่องจากในการผลิตเยื่อวิธีโซดาตัดแปรนั้น ลิกนินซึ่งเป็นตัวการทำให้เกิดสีเหลืองในกระดาษได้ถูกกำจัดออกได้มากกว่าการผลิตเยื่อแบบโซดา เมื่อพิจารณาระดับการเติมแอนทราควิโนนเพียงอย่างเดียว พบว่า เมื่อมีการใช้ระดับปริมาณแอนทราควิโนนเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความขาวสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น คือมีการเพิ่มขึ้นไม่ถึง 1 จุด เมื่อพิจารณาการเติมเมทานอลเพียงอย่างเดียวในระดับที่เพิ่มขึ้นพบว่า ค่าความขาวสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเมื่อพิจารณาการเติมแอนทราควิโนน

ร่วมกับเมทานอลในการต้มเยื่อพบว่า ค่าความขาวสว่างจะสูงกว่าการเติมแอนทราควิโนนเพียงอย่างเดียว เมื่อมีการใช้แอนทราควิโนนที่ระดับคงที่แต่มีการแปรผันการเติมเมทานอลในระดับที่เพิ่มขึ้นพบว่า ค่าความขาวสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่าค่าความขาวสว่างมีความสัมพันธ์กับค่าค่าปทานัมเบอร์ กล่าวคือ เมื่อค่าค่าปทานัมเบอร์ลดลง จะส่งผลให้มีค่าความขาวสว่างสูงขึ้น

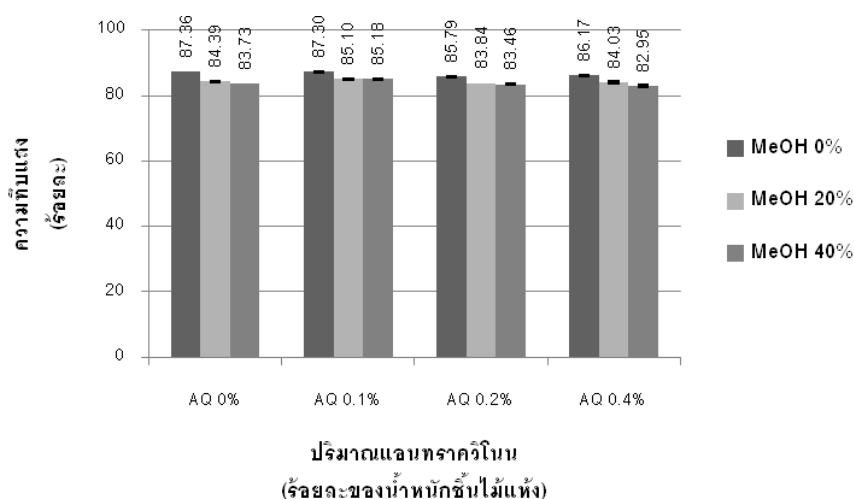


ภาพที่ 4-21 ผลของการผลิตเยื่อแบบไซโตตัดแปรต่อความขาวสว่างของแผ่นขึ้นทดสอบ

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-12 หน้า 97 พบว่า การเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลในการต้มเยื่อส่งผลต่อความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญ (ค่า P-value เท่ากับ 0.00009127 และ 0.000000001826 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่า 0 มาก) ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความขาวสว่าง จากการวิเคราะห์ทางสถิติของผลของระดับปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 4-15 หน้า 100 พบว่า การใส่ปริมาณแอนทราควิโนนในปริมาณต่างๆ ร่วมกับเมทานอลที่ระดับร้อยละ 0, 20 ส่งผลต่อความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.034379 และ 0.014426 ตามลำดับ แต่การใส่ปริมาณแอนทราควิโนนในปริมาณต่างๆ ร่วมกับเมทานอลที่ระดับร้อยละ 40 พบว่าไม่ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติของผลของระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 4-18 หน้า 103 พบว่า การใส่เมทานอลในปริมาณต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนที่ระดับร้อยละ 0, 0.1, 0.2 และ 0.4 ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความขาวสว่าง เนื่องจากมีค่า P-value เท่ากับ 0.001504, 0.021030, 0.013385 และ 0.001503 ตามลำดับ

#### 4.2.9.1 ความทึบแสง

แผ่นชั้นทดสอบที่ผลิตได้จากเยื่อวิธีโซดาตัดแปรมีค่าความทึบแสงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นชั้นทดสอบที่ผลิตได้จากเยื่อวิธีโซดาดังแสดงในภาพที่ 4-22 เนื่องจากลิกนินที่หลงเหลืออยู่ในเยื่อแบบโซดาตัดแปรมีปริมาณน้อยกว่าในเยื่อแบบโซดา ทำให้เส้นใยสามารถสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีขึ้น ทำให้เหลือพื้นที่ผิวในการกระเจิงแสงน้อยลง เช่นเดียวกับเยื่อที่ผลิตจากการผลิตเยื่อแบบเคมี (chemical pulping) เมื่อนำมาขึ้นแผ่นชั้นทดสอบจะให้ค่าความทึบแสงต่ำกว่าแผ่นชั้นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อที่ผลิตโดยการผลิตเยื่อแบบเชิงกล (mechanical pulping) เนื่องจากเยื่อเชิงกลไม่ได้มีการนำลิกนินออกจากเยื่อ และเยื่อเคมีมีเส้นใยที่ยาวกว่าเยื่อเชิงกล การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยของเยื่อเคมีเกิดขึ้นมากกว่าเยื่อเชิงกล และเมื่อพิจารณาระดับการเติมแอนทราควิโนนเพียงอย่างเดียว โดยเพิ่มปริมาณแอนทราควิโนนจากร้อยละ 0.1 เป็น 0.2 ค่าความทึบแสงมีค่าลดลงจาก 87.30 เป็น 85.79 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็นร้อยละ 0.4 พบว่า ค่าความทึบแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 86.17 เมื่อพิจารณาการเติมเมทานอลเพียงอย่างเดียว พบว่า เมื่อทำการเพิ่มปริมาณเมทานอล ค่าความทึบแสงมีค่าลดลง ในขณะที่เมื่อพิจารณาการเติมแอนทราควิโนนร่วมกับเมทานอลในการต้มเยื่อพบว่า ค่าความทึบแสงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการใช้แอนทราควิโนนเพียงตัวเดียว โดยเมื่อใช้ปริมาณแอนทราควิโนนคงที่แต่มีการแปรผันการเพิ่มปริมาณเมทานอลที่เพิ่มขึ้นพบว่า ค่าความทึบแสงมีค่าลดลง



ภาพที่ 4-22 ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรต่อความทึบแสงของแผ่นชั้นทดสอบ

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-12 หน้า 97 พบว่า การเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลในการต้มเยื่อส่งผลต่อความทึบแสงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



เนื่องจากค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.001185 และ 0.0000005016 ตามลำดับ ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความทึบแสง เมื่อพิจารณาผลของระดับปริมาณแอนทราควิโนนที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 4-15 หน้า 100 พบว่า การใส่ปริมาณแอนทราควิโนนในปริมาณต่างๆ ร่วมกับเมทานอลที่ระดับร้อยละ 0 พบว่าส่งผลต่อความทึบแสงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-value เท่ากับ 0.000303 แต่ในขณะที่การใส่ปริมาณแอนทราควิโนนในปริมาณต่างๆ ร่วมกับเมทานอลที่ระดับร้อยละ 20 และ 40 กลับพบว่าไม่ส่งผลต่อค่าความทึบแสงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาผลของระดับปริมาณเมทานอลที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 4-18 หน้า 103 พบว่า การใส่เมทานอลในปริมาณต่างๆ ร่วมกับแอนทราควิโนนที่ระดับร้อยละ 0, 0.1 และ 0.4 ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความทึบแสง โดยมีค่า P-value เท่ากับ 0.006434, 0.036676 และ 0.000478 ตามลำดับ

#### 4.2.10 ลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยในแผ่นขึ้นทดสอบจากการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปร โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)

ภาพที่ 4-23 และ 4-24 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการสานตัวของเส้นใยของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตจากลำต้นข้าวโพดด้วยเยื่อวิธีโซดาตัดแปร โดยแสดงทางด้านพื้นผิวและด้านตัดขวาง ตามลำดับ

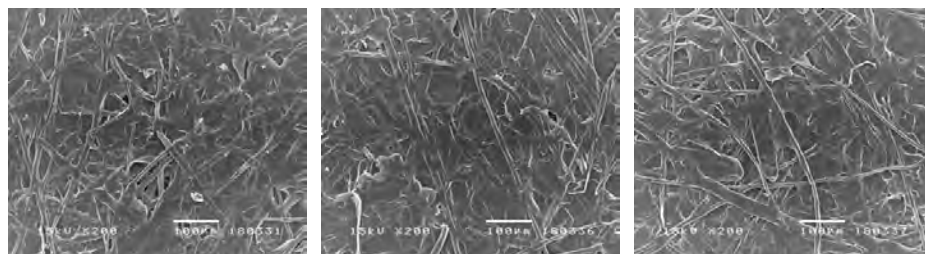
ลักษณะการสานตัวของเส้นใยของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตได้จากวิธีโซดาตัดแปรนั้นมีลักษณะช่องว่างระหว่างเส้นใยในแผ่นขึ้นทดสอบน้อยกว่าและมีขนาดรูพรุนเล็กกว่า แผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตได้จากเยื่อวิธีโซดา ดังแสดงในภาพที่ 4-21 (ก)-(ง) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเมื่อมีการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลในปริมาณเพิ่มขึ้น สามารถขจัดลิกนินออกจากเยื่อและเส้นใยมากขึ้น เส้นใยที่ผลิตได้จากวิธีโซดาตัดแปรจึงมีความยืดหยุ่นดี สามารถแผ่ยุบตัวลงและสร้างพันธะระหว่างกันได้ดีขึ้น ส่งผลให้ช่องว่างในแผ่นขึ้นทดสอบมีจำนวนน้อยลง ปริมาตรรูพรุนลดลง และขนาดของรูพรุนในแผ่นขึ้นทดสอบมีขนาดเล็ก และเมื่อพิจารณาด้านตัดขวางของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตได้จากเยื่อวิธีโซดาตัดแปร ดังภาพที่ 4-22 (ก)-(ง) พบว่าเส้นใยมีการยุบตัวแนบระหว่างกันได้ดี



(ก) AQ 0%+MeOH 0%

(ข) AQ 0%+MeOH 20%

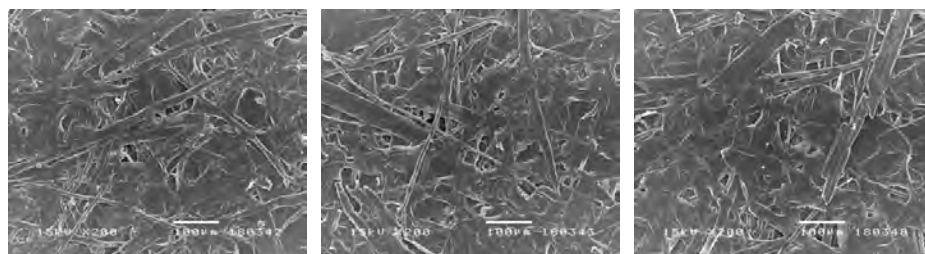
(ค) AQ 0%+MeOH 40%



(ง) AQ 0.1%+MeOH 0%

(จ) AQ 0.1%+MeOH 20%

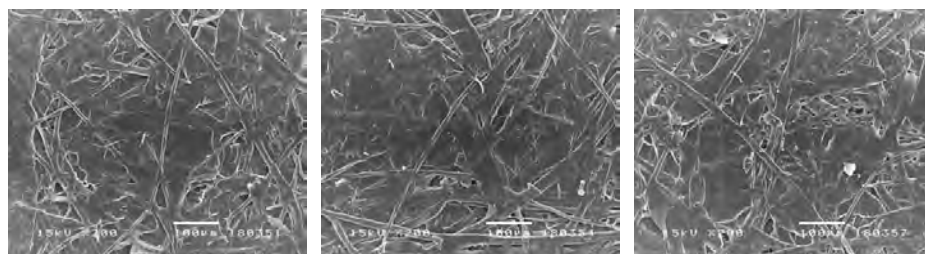
(ฉ) AQ 0.1%+MeOH 40%



(ช) AQ 0.2%+MeOH 0%

(ซ) AQ 0.2%+MeOH 20%

(ฅ) AQ 0.2%+MeOH 40%

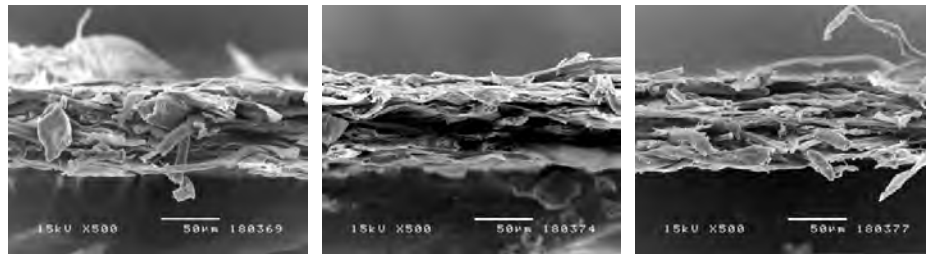


(ญ) AQ 0.4%+MeOH 0%

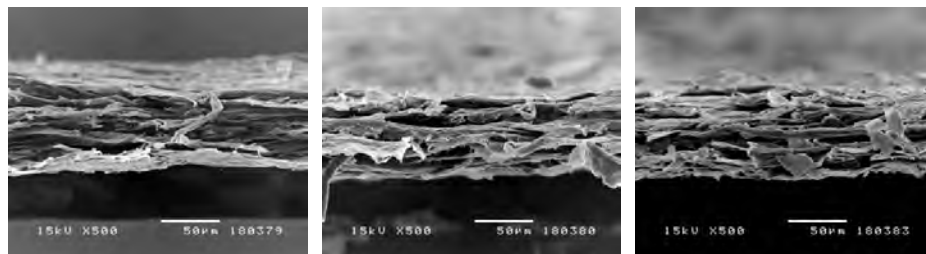
(ฎ) AQ 0.4%+MeOH 20%

(ฏ) AQ 0.4%+MeOH 40%

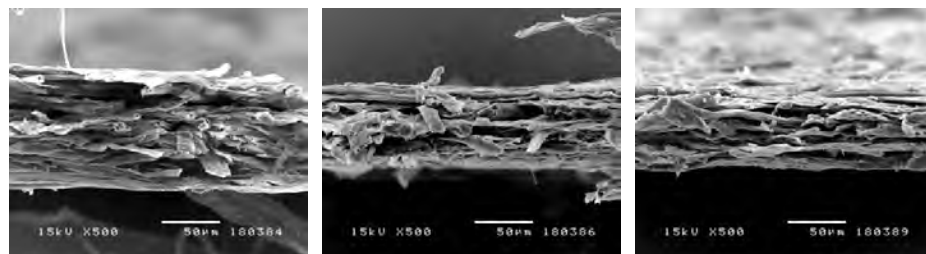
ภาพที่ 4-23 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นชั้นทดสอบจากเยื่อแบบโชดาตัดแปร



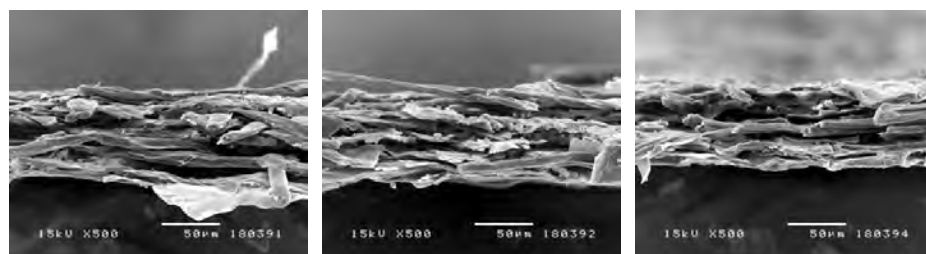
(ก) AQ 0%+MeOH 0%      (ข) AQ 0%+MeOH 20%      (ค) AQ 0%+MeOH 40%



(ง) AQ 0.1%+MeOH 0%      (จ) AQ 0.1%+MeOH 20%      (ฉ) AQ 0.1%+MeOH 40%



(ช) AQ 0.2%+MeOH 0%      (ซ) AQ 0.2%+MeOH 20%      (ฅ) AQ 0.2%+MeOH 40%



(ญ) AQ 0.4%+MeOH 0%      (ฎ) AQ 0.4%+MeOH 20%      (ฏ) AQ 0.4%+MeOH 40%

ภาพที่ 4-24 ลักษณะภาคตัดขวางของแผ่นขึ้นทอทดสอบจากเยื่อแบบโซดาตัดแปร

#### 4.2.11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

เมื่อนำค่าผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเยื่อ เส้นใย และแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตด้วยเยื่อวิธีโซดาตัดแปรมาวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธี Anova แบบ Two factor with replication เพื่อดูว่าการเติมเมทานอลและการเติมแอนทราควิโนนลงไปในช่วงการต้มเยื่อส่งผลต่อสมบัติต่างๆ เหล่านี้ อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $\alpha=0.05$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4-11 หน้า 96, ตารางที่ 4-12 หน้า 97 และตารางที่ 4-13 หน้า 98 ซึ่งเป็นตารางแสดงค่า P-value และค่า F ของสมบัติต่างๆ ของเยื่อ แผ่นขึ้นทดสอบและลักษณะของเส้นใย โดยค่า A คือผลของการเติมเมทานอล ค่า B คือผลของการเติมแอนทราควิโนน ค่า A\*B คือผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเติมเมทานอลและแอนทราควิโนน เมื่อค่า P-value มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 แสดงว่าการเติมแอนทราควิโนนหรือเมทานอลส่งผลต่อสมบัติการทดสอบนั้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และถ้าพบว่าค่า P-value มีค่าต่ำกว่า 0.05 มากๆ ยิ่งมีผลแสดงว่าการเติมแอนทราควิโนนหรือการเติมเมทานอลส่งผลต่อสมบัติเหล่านี้ อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากค่า F ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ ถ้าค่า  $F_{cal}$  มีค่ามากกว่า  $F_{crit}$  แสดงว่าการเติมแอนทราควิโนนหรือเมทานอลมีผลต่อสมบัติเหล่านี้ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากการทดลองพบว่าการเติมเมทานอลในการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรนั้นส่งผลต่อค่าผลผลิตเยื่อ คัปปานัมเบอร์ ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส สัดส่วนเฮมิเซลลูโลส ปริมาณลิกนิน ปริมาณสารแทรก ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก ความขาวสว่าง ความทึบแสง ความยาวเส้นใยก่อนการบดเยื่อและหลังการบดเยื่อ ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กก่อนการบดเยื่อ ความหักงอของเส้นใยก่อนและหลังการบดเยื่อ และความโค้งงอหลังการบดเยื่อ โดยส่งผลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $\alpha =0.05$ ) เนื่องจากค่า P-value มีค่าต่ำกว่า 0.05 ส่วนการเติมแอนทราควิโนนในการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรนั้นส่งผลต่อค่าผลผลิตเยื่อ คัปปานัมเบอร์ ปริมาณต่างที่หลงเหลือจากการต้มเยื่อ ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ปริมาณ เฮมิเซลลูโลส ปริมาณลิกนิน ปริมาณสารแทรก ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก ความขาวสว่าง ความทึบแสง ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กก่อนการบดเยื่อ ความโค้งงอของเส้นใยก่อนและหลังการบดเยื่อ ความหักงอของเส้นใยก่อนและหลังการบดเยื่อ และความกว้างของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $\alpha =0.05$ ) โดยค่า P-value มีค่าต่ำกว่า 0.05 ทั้งนี้อาจสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมีการเติมแอนทราควิโนนลงไปในกระบวนการ

ผลิตเยื่อ แอนทราควิโนนช่วยในการเร่งอัตราการละลายลิกนินออกจากเส้นใยได้ดี ช่วยป้องกันการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรตในเส้นใย และช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษ ส่วนเมทานอลเมื่อมีการเติมลงไปในการบวนการผลิตเยื่อ จะช่วยทำให้น้ำยาต้มเยื่อแทรกซึมเข้าสู่ชั้นไม้ได้ดีขึ้น ช่วยทำให้ลิกนินเกิดการสลายตัวเป็นโครงสร้างเล็กๆ ช่วยดึงลิกนินออกจากชั้นไม้และช่วยป้องกันการเกิด lignin condensation อีกทั้งยังช่วยป้องกันการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรตในเส้นใย ดังนั้นจากการทดลองการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรจึงพบว่าเยื่อที่ผลิตได้มีผลผลิตเยื่อสูงขึ้น ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความขาวสว่างของเยื่อมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่มีปริมาณลิกนินลดน้อยลง

ส่วนผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลในการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรนั้น พบว่า มีผลต่อค่าผลผลิตเยื่อ ปริมาณต่างที่หลงเหลือจากการต้มเยื่อ ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ปริมาณเฮมิเซลลูโลส ปริมาณลิกนินและดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ทั้งนี้เนื่องจากการสมบัติของแอนทราควิโนนและเมทานอลต่างช่วยกันส่งเสริมซึ่งกันและกันในการมีผลต่อสมบัติต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญ

ส่วนตารางที่ 4-14 ตารางที่ 4-15 และ ตารางที่ 4-16 เป็นผลจากการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาถึงผลของระดับปริมาณการเติมแอนทราควิโนนที่มีต่อสมบัติของเยื่อ แผ่นขึ้นทดสอบ และลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใยที่ระดับเมทานอลต่างๆ ว่ามีผลอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor ในการวิเคราะห์ ส่วนตารางที่ 4-17 ตารางที่ 4-18 และ ตารางที่ 4-19 เป็นผลจากการวิเคราะห์สถิติเพื่อศึกษาถึงผลของระดับปริมาณการเติมเมทานอลที่มีต่อสมบัติของเยื่อ แผ่นขึ้นทดสอบ และลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใยที่ระดับแอนทราควิโนนต่างๆ ว่ามีผลอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor ในการวิเคราะห์ โดยในการวิเคราะห์ผลนั้นดูจากค่า P-value และ ค่า F ถ้าค่า P-value มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 แสดงว่าระดับปริมาณการเติมแอนทราควิโนนหรือเมทานอลที่ใช้ส่งผลต่อสมบัติการทดสอบนั้นอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และถ้าพบว่าค่า P-value มีค่าต่ำกว่า 0.05 มากๆ ยิ่งแสดงว่าระดับปริมาณการเติมแอนทราควิโนนหรือระดับปริมาณการเติมเมทานอลส่งผลต่อสมบัติเหล่านั้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง สำหรับการพิจารณาว่า F นั้น สามารถทำได้จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ ถ้าค่า  $F_{cal}$  มีค่ามากกว่า  $F_{crit}$  แสดงว่าระดับปริมาณการเติมแอนทราควิโนนหรือเมทานอลที่ใช้ส่งผลต่อสมบัติเหล่านั้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4-11 ผลการวิเคราะห์สถิติการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลต่อสมบัติของเยื่อโดยใช้วิธี Anova แบบ Two factor with replication

สมบัติของเยื่อ	A			B			A*B		
	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>
1. ผลผลิตเยื่อ	0.002089*	10.781	3.885	0.020182*	4.800	3.490	0.008647*	5.008	2.996
2. ส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ	0.387155	1.028	3.885	0.48082	0.875	3.490	0.817568	0.470	2.996
3. คัปปานัมเบอร์	8.339E-13*	612.438	3.885	1.725E-10*	198.535	3.490	0.1054	2.282	2.996
4. ความเป็นอิสระของเยื่อก่อนการบดเยื่อ	0.164249	2.107	3.885	0.56873	0.702	3.490	0.512069	0.922	2.996
5. ปริมาณค้างที่หลงเหลือจากการต้มเยื่อ	0.319578	1.256	3.885	0.009495*	6.042	3.490	0.001389*	7.786	2.996
6. ปริมาณไฮโดเซลลูโลส	1.090E-10*	268.505	3.885	6.030E-13*	516.382	3.490	9.410E-11*	160.837	2.996
7. ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส	3.350E-05*	27.412	3.885	1.130E-05*	27.636	3.490	5.430E-07*	36.002	2.996
8. ปริมาณเฮมิเซลลูโลส	1.940E-08*	109.790	3.885	1.260E-09*	141.251	3.490	2.630E-05*	17.599	2.996
9. ปริมาณลิกนิน	2.110E-08*	108.152	3.885	6.120E-08*	71.933	3.490	2.250E-06*	27.852	2.996
10. ปริมาณสารแทรก	3.060E-07*	67.083	3.885	9.510E-11*	219.694	3.490	0.031717*	3.468	2.996

หมายเหตุ A คือ ผลของการเติมเมทานอล B คือ ผลของการเติมแอนทราควิโนน A\*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเติมเมทานอลและแอนทราควิโนน

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

ตารางที่ 4-12 ผลการวิเคราะห์สถิติการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลต่อสมบัติของแผ่นขึ้นทดสอบ โดยใช้วิธี Anova แบบ Two factor with replication

สมบัติของแผ่นทดสอบ	A			B			A*B		
	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>
1. ความหนาแน่น	0.081932	3.104	3.885	0.299344	1.368	3.490	0.256958	1.505	2.996
2. ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	0.000404*	16.063	3.885	0.000206*	15.381	3.490	0.190386	1.760	2.996
3. ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	0.003152*	9.669	3.885	7.237E-06*	30.106	3.490	0.903553	0.338	2.996
4. ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก	4.768E-07*	61.883	3.885	2.084E-09*	129.606	3.490	4.976E-06*	24.075	2.996
5. ความขาวสว่าง	1.826E-09*	165.613	3.885	9.127E-05*	18.240	3.490	0.079706	2.542	2.996
6. ความทึบแสง	5.016E-07*	61.311	3.885	0.001185*	10.380	3.490	0.432463	1.067	2.996

หมายเหตุ A คือ ผลของการเติมเมทานอล

B คือ ผลของการเติมแอนทราควิโนน

A\*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเติมเมทานอลและแอนทราควิโนน

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

ตารางที่ 4-13 ผลการวิเคราะห์สถิติการเติมแอนทราควิโนนและเมทานอลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใย โดยใช้วิธี Anova แบบ Two factor with replication

ลักษณะพื้นฐานวิทยาของเส้นใย	A			B			A*B		
	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>
1. ความยาวเส้นใยแบบ LWW ก่อนบดเยื่อ	0.010274*	6.868	3.885	0.477608	0.882	3.490	0.400947	1.132	2.996
2. ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กก่อนบดเยื่อ	0.044629*	4.074	3.885	0.023862*	4.544	3.490	0.228185	1.605	2.996
3. ความโค้งงอของเส้นใยก่อนบดเยื่อ	0.113827	2.618	3.885	0.010019*	5.949	3.490	0.748816	0.567	2.996
4. ความหักงอของเส้นใยก่อนบดเยื่อ	0.020209*	5.496	3.885	0.004738*	7.330	3.490	0.164414	1.887	2.996
5. ความกว้างของเส้นใยก่อนบดเยื่อ	0.055695	3.709	3.885	0.001336*	10.088	3.490	0.290174	1.403	2.996
6. ความยาวเส้นใยแบบ LWW หลังบดเยื่อ	0.022990*	5.251	3.885	0.076191	2.941	3.490	0.505233	0.934	2.996
7. ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังบดเยื่อ	0.206794	1.802	3.885	0.571764	0.696	3.490	0.696850	0.640	2.996
8. ความโค้งงอของเส้นใยหลังบดเยื่อ	0.003522*	9.382	3.885	0.030365*	4.187	3.490	0.295102	1.389	2.996
9. ความหักงอของเส้นใยหลังบดเยื่อ	0.001919*	11.019	3.885	0.000670*	11.853	3.490	0.053640	2.925	2.996
10. ความกว้างของเส้นใยหลังบดเยื่อ	0.326916	1.229	3.885	0.141295	2.196	3.490	0.868714	0.394	2.996

หมายเหตุ A คือ ผลของการเติมเมทานอล B คือ ผลของการเติมแอนทราควิโนน A\*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างการเติมเมทานอลและแอนทราควิโนน

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



ตารางที่ 4-14 ผลการวิเคราะห์สถิติการใช้ปริมาณแอนทราควิโนนที่ระดับต่างๆ ของเมทานอลต่อสมบัติของเยื่อ โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor

สมบัติของเยื่อ	MeOH 0%			MeOH 20%			MeOH 40%		
	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>
1. ผลผลิตเยื่อ	0.015793*	12.963	6.591	0.541480	0.833	6.591	0.173667	2.787	6.591
2. ส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ	0.173667	2.787	6.591	0.173667	2.787	6.591	0.908175	0.175	6.591
3. คัปปานัมเบอร์	0.000431*	86.434	6.591	0.000458*	83.781	6.591	0.001425*	46.806	6.591
4. ปริมาณต่างหลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อ	0.028046*	9.333	6.591	0.272595	1.889	6.591	0.032192*	8.606	6.591
5. ความเป็นอิสระของเยื่อก่อนการบดเยื่อ	0.352492	1.456	6.591	0.480895	0.994	6.591	0.917040	0.161	6.591
6. ปริมาณลิกนิน	0.000718*	66.535	6.591	0.019424*	11.533	6.591	0.161615	2.949	6.591
7. ปริมาณไฮโดเซลลูโลส	0.000012*	517.019	6.591	0.000173*	136.929	6.591	0.000102*	178.981	6.591
8. ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส	0.000230*	118.656	6.591	0.000234*	117.678	6.591	0.062672	5.716	6.591
9. ปริมาณเฮมิเซลลูโลส	0.000078*	204.979	6.591	0.000793*	63.259	6.591	0.004090*	26.985	6.591
10. ปริมาณสารแทรก	0.001671*	43.095	6.591	0.000163*	141.054	6.591	0.000628*	71.275	6.591

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

ตารางที่ 4-15 ผลการวิเคราะห์สถิติการใช้ปริมาณแอนทราควิโนนที่ระดับต่างๆ ของเมทานอลต่อสมบัติของแผ่นทดสอบ โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor

สมบัติของแผ่นทดสอบ	MeOH 0%			MeOH 20%			MeOH 40%		
	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>
1. ความหนาแน่น	0.485724	0.980	6.591	0.041245*	7.418	6.591	0.697902	0.508	6.591
2. ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	0.037155*	7.901	6.591	0.010662*	16.118	6.591	0.271732	1.895	6.591
3. ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	0.023547*	10.331	6.591	0.010555*	16.207	6.591	0.042284*	7.307	6.591
4. ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก	0.000764*	64.478	6.591	0.000120*	165.352	6.591	0.009657*	17.016	6.591
5. ความขาวสว่าง	0.034379*	8.277	6.591	0.014426*	13.636	6.591	0.053461	6.322	6.591
6. ความทึบแสง	0.000303*	103.316	6.591	0.158437	2.995	6.591	0.178932	2.721	6.591

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

ตารางที่ 4-16 ผลการวิเคราะห์สถิติการให้ปริมาณแอนทราควิโนนที่ระดับต่างๆ ของเมทานอลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor

ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย	MeOH 0%			MeOH 20%			MeOH 40%		
	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>
1. ความยาวเส้นใยแบบ LWW หลังบดเยื่อ	0.016534*	12.634	6.591	0.614368	0.668	6.591	0.549917	0.812	6.591
2. ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังบดเยื่อ	0.440949	1.117	6.591	0.539011	0.839	6.591	0.691642	0.519	6.591
3. ความโค้งงอของเส้นใยหลังบดเยื่อ	0.131836	3.441	6.591	0.355828	1.441	6.591	0.599596	0.699	6.591
4. ความหักงอของเส้นใยหลังบดเยื่อ	0.076731	5.012	6.591	0.005654*	22.720	6.591	0.672438	0.554	6.591
5. ความกว้างของเส้นใยหลังบดเยื่อ	0.096908	4.283	6.591	0.235773	2.157	6.591	0.668608	0.561	6.591
6. ความยาวเส้นใยแบบ LWW ก่อนบดเยื่อ	0.344173	1.494	6.591	0.401918	1.253	6.591	0.734264	0.445	6.591
7. ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กก่อนบดเยื่อ	0.541157	0.834	6.591	0.220627	2.286	6.591	0.089300	4.529	6.591
8. ความโค้งงอของเส้นใยก่อนบดเยื่อ	0.118595	3.716	6.591	0.201159	2.473	6.591	0.395642	1.277	6.591
9. ความหักงอของเส้นใยก่อนบดเยื่อ	0.009441*	17.228	6.591	0.230110	2.204	6.591	0.961558	0.090	6.591
10. ความกว้างของเส้นใยก่อนบดเยื่อ	0.138547	3.316	6.591	0.308314	1.675	6.591	0.005957*	22.094	6.591

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

ตารางที่ 4-17 ผลการวิเคราะห์สถิติการใช้ปริมาณเมทานอลที่ระดับต่างๆ ของแอนทราควิโนนต่อสมบัติของเยื่อ โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor

สมบัติของเยื่อ	AQ 0%			AQ 0.1%			AQ 0.2%			AQ 0.4%		
	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>
1. ผลผลิตเยื่อ	0.013920*	24.421	9.552	0.235181	2.437	9.552	0.897706	0.112	9.552	0.283395	1.977	9.552
2. ส่วนที่ไม่เป็นเยื่อ	0.731793	0.347	9.552	0.955275	0.046	9.552	0.091894	5.866	9.552	0.822894	0.208	9.552
3. คัปปานัมเบอร์	0.002880*	72.609	9.552	7.91E-05*	812.317	9.552	0.001311*	123.717	9.552	0.000192*	449.886	9.552
4. ปริมาณต่างหลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อ	0.380399	1.357	9.552	0.013467*	25.000	9.552	0.020540*	18.500	9.552	0.192450	3.000	9.552
5. ความเป็นอิสระของเยื่อก่อนบดเยื่อ	0.079105	6.640	9.552	0.817287	0.216	9.552	0.414228	1.199	9.552	0.522874	0.811	9.552
6. ปริมาณลิกนิน	0.000815*	170.417	9.552	0.005215*	48.377	9.552	0.269313	2.097	9.552	0.217635	2.646	9.552
7. ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส	0.003200*	67.573	9.552	0.080333	6.557	9.552	0.111607	4.971	9.552	0.148664	3.845	9.552
8. ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส	0.004467*	53.803	9.552	0.005931*	44.278	9.552	0.030224*	13.959	9.552	0.025694*	15.727	9.552
9. ปริมาณเฮมิเซลลูโลส	0.003717*	61.013	9.552	0.005505*	46.614	9.552	0.266701	2.120	9.552	0.007915*	36.268	9.552
10. ปริมาณสารแทรก	0.018119*	20.244	9.552	0.003708*	61.113	9.552	0.037515*	11.885	9.552	0.111513	4.975	9.552

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

ตารางที่ 4-18 ผลการวิเคราะห์สถิติการใช้น้ำปริมาณแตกต่างกันระดับต่างๆ ของแอนทราควิโนนต่อสมบัติของแผ่นทดสอบ โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor

สมบัติของแผ่นทดสอบ	AQ 0%			AQ 0.1%			AQ 0.2%			AQ 0.4%		
	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>
1. ความหนาแน่น	0.422200	1.165	9.552	0.765113	0.293	9.552	0.084517	6.289	9.552	0.379432	1.362	9.552
2. ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	0.002884*	72.529	9.552	0.712142	0.381	9.552	0.011574*	27.816	9.552	0.281375	1.993	9.552
3. ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	0.187078	3.086	9.552	0.509001	0.853	9.552	0.107152	5.149	9.552	0.216338	2.662	9.552
4. ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก	0.000920*	157.044	9.552	0.016533*	21.613	9.552	0.042126*	10.890	9.552	0.177778	3.244	9.552
5. ความขาวสว่าง	0.001504*	112.782	9.552	0.021030*	18.188	9.552	0.013385*	25.108	9.552	0.001503*	112.842	9.552
6. ความทึบแสง	0.006434*	41.862	9.552	0.036676*	12.089	9.552	0.131464	4.302	9.552	0.000478*	243.737	9.552

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

ตารางที่ 4-19 ผลการวิเคราะห์สถิติการใช้ปริมาณเมทานอลที่ระดับต่างๆ ของแอนทราควิโนนต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor

ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย	AQ 0%			AQ 0.1%			AQ 0.2%			AQ 0.4%		
	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>	P-value	F <sub>cal</sub>	F <sub>crit</sub>
1. ความยาวเส้นใยแบบ LWW หลังบดเยื่อ	0.019473*	19.224	9.552	0.019379*	19.291	9.552	0.606983	0.592	9.552	0.619096	0.565	9.552
2. ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กหลังบดเยื่อ	0.192719	2.996	9.552	0.205262	2.811	9.552	0.625046	0.552	9.552	0.769895	0.286	9.552
3. ความโค้งงอของเส้นใยหลังบดเยื่อ	0.073987	7.011	9.552	0.109915	5.037	9.552	0.298156	1.861	9.552	0.293559	1.896	9.552
4. ความหักงอของเส้นใยหลังบดเยื่อ	0.000391*	278.990	9.552	0.353346	1.501	9.552	0.244415	2.337	9.552	0.387013	1.324	9.552
5. ความกว้างของเส้นใยหลังบดเยื่อ	0.691058	0.419	9.552	0.362492	1.450	9.552	0.623689	0.555	9.552	0.513525	0.839	9.552
6. ความยาวเส้นใยแบบ LWW ก่อนบดเยื่อ	0.295920	1.878	9.552	0.517071	0.828	9.552	0.053556	9.057	9.552	0.378167	1.368	9.552
7. ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กก่อนบดเยื่อ	0.171760	3.354	9.552	0.654549	0.490	9.552	0.730319	0.350	9.552	0.087467	6.113	9.552
8. ความโค้งงอของเส้นใยก่อนบดเยื่อ	0.790585	0.254	9.552	0.300598	1.843	9.552	0.126813	4.443	9.552	0.707476	0.389	9.552
9. ความหักงอของเส้นใยก่อนบดเยื่อ	0.293781	1.894	9.552	0.999875	0.000	9.552	0.043567*	10.615	9.552	0.602796	0.602	9.552
10. ความกว้างของเส้นใยก่อนบดเยื่อ	0.171610	3.357	9.552	0.412707	1.206	9.552	0.965853	0.035	9.552	0.075436	6.902	9.552

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

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อวิธีโซดาจากลำต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพื่อใช้เป็นการทดลองควบคุม

จากการนำลำต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มาทำการศึกษากาภาวะการผลิตเยื่อแบบโซดา พบว่า ที่ระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ไม่สามารถต้มเยื่อให้สุกได้ โดยเห็นได้จากการมีปริมาณส่วนที่ไม่เป็นเยื่อจำนวนมาก ผลผลิตเยื่อที่ได้พบว่าที่ระดับโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 ให้ผลผลิตเยื่อมากที่สุดคือร้อยละ 44.34 และเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในระดับเพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลผลิตเยื่อเริ่มมีแนวโน้มลดลง ค่าค่าป่านัมเบอร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และการลดลงของค่าค่าป่านัมเบอร์เริ่มลดลงน้อยเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์จากระดับร้อยละ 25 เป็นร้อยละ 30 คือลดลงจาก 18.82 เป็น 17.82 ซึ่งมีการลดลงเพียงหนึ่งจุดเท่านั้น ปริมาณต่างที่หลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ระดับมากขึ้น เมื่อนำเยื่อที่ผลิตจากวิธีโซดาที่ระดับโซเดียมไฮดรอกไซด์ระดับต่างๆ มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่า เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณมากขึ้น ปริมาณลิกนิน ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส และปริมาณเฮมิเซลลูโลสมีค่าลดลง เมื่อนำเยื่อที่ผลิตด้วยวิธีโซดาแต่ละระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ มาทำการบดเยื่อ พบว่า การบดเยื่อทำให้เส้นใยมีขนาดสั้นลง ความโค้งงอและความหักงอของเส้นใยมีแนวโน้มสูงขึ้น หลังจากนั้นนำเยื่อที่ผ่านการบดเยื่อและไม่ผ่านการบดเยื่อของแต่ละระดับโซเดียมไฮดรอกไซด์มาทำการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติกัน พบว่า เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้นในการผลิตเยื่อแบบโซดา แผ่นขึ้นทดสอบจะมีค่าความหนาแน่น ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุและค่าความขาวสว่างสูงขึ้น แต่ค่าความทึบแสงและความแข็งแรงต่อแรงฉีกกลับมีแนวโน้มลดลง และเมื่อเปรียบเทียบผลของการบดเยื่อที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของแผ่นขึ้นทดสอบ พบว่า การบดเยื่อของแต่ละระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ค่าความหนาแน่น ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก ค่าความขาวสว่างและค่าความทึบแสงมีค่าลดลง

สำหรับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ของการผลิตเยื่อแบบโซดาจากลำต้นข้าวโพดที่เหมาะสมที่จะนำไปทำการทดลองต่อในตอนที่ 2 ซึ่งเป็นการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรรูปจากลำต้นข้าวโพด พบว่า การต้มเยื่อโดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับร้อยละ 20 เป็นภาวะที่

เหมาะสมในการนำไปผลิตเยื่อโซดาแบบดัดแปร ด้วยการเติมสารแอนทราควิโนนและ/หรือเมทานอล เนื่องจากที่ระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 20 ให้ความแข็งแรงของแผ่นขึ้นทดสอบต่ำและมีส่วนที่ไม่เป็นเยื่อปริมาณมาก ส่วนที่ระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงกว่าร้อยละ 20 พบว่า ผลผลิตเยื่อเริ่มลดลงและมีการใช้ปริมาณสารเคมีมาก และควรทำการบดเยื่อของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรด้วย เนื่องจากการบดเยื่อส่งผลให้ความแข็งแรงของแผ่นขึ้นทดสอบมีค่าความแข็งแรงที่สูงขึ้น

### 5.1.2 ผลของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพด

การผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพด โดยการเติมแอนทราควิโนนและ/หรือเมทานอลที่ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักลำต้นข้าวโพดแห้ง พบว่าให้ผลผลิตเยื่อเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 7 เมื่อเทียบกับการผลิตเยื่อแบบโซดา ค่าค่าปทานัมเบอร์ลดลงอย่างมากเมื่อมีการใช้แอนทราควิโนนร่วมกับการใช้เมทานอลในการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปร ปริมาณต่างที่หลงเหลือหลังจากการต้มเยื่อลดลง ส่วนค่าความเป็นอิสระของเยื่อก่อนการบดเยื่อมีค่าใกล้เคียงกันกับเยื่อที่ผลิตได้แบบโซดา สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อที่ผลิตได้จากวิธีโซดาตัดแปร พบว่า มีปริมาณลิกนินหลงเหลืออยู่ในเยื่อน้อยกว่าการผลิตเยื่อแบบโซดา แต่มีปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ปริมาณเฮมิเซลลูโลสและปริมาณสารแทรกสูงขึ้นไป ความยาวของเส้นใย ความกว้างของเส้นใยและปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีค่าใกล้เคียงกับเยื่อที่ผลิตได้แบบโซดา นอกจากนี้ยังพบว่าการบดเยื่อจะส่งผลให้เส้นใยของเยื่อที่ผลิตแบบโซดาตัดแปรมีความโค้งงอและหักงอมากขึ้น และเมื่อนำเยื่อที่ผลิตได้จากวิธีโซดาตัดแปรมาทำการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ ทำให้แผ่นขึ้นทดสอบมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงขึ้น แต่ความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่าลดลง ส่วนลักษณะทางด้านทัศนศาสตร์พบว่า การผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรส่งผลให้แผ่นขึ้นทดสอบมีค่าความขาวสว่างสูงขึ้นแต่มีความทึบแสงลดลง

ส่วนภาวะเหมาะสมของการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพด คือ ภาวะที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักต้นข้าวโพดแห้ง มีการเติมแอนทราควิโนนร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักเยื่อแห้งและเติมเมทานอลร้อยละ 20 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมดที่ใช้ในการต้มเยื่อ เนื่องจากที่ภาวะการต้มเยื่อนี้ให้ผลผลิตเยื่อที่สูง ลดค่าค่าปทานัมเบอร์ได้มาก ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นขึ้นทดสอบที่ผลิตได้มีค่าสูง อีกทั้งยังมีความแข็งแรงต่อแรงฉีกในระดับที่สูงอีกด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะที่มีการใช้แอนทราควิโนนเพียงอย่างเดียวและการใช้เมทานอลเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการใช้แอนทราควิโนน



เพียงอย่างเดียวและการใช้เมทานอลเพียงอย่างเดียว นั้น ค่าคัปปานัมเบอร์ยังมีค่าสูงและความแข็งแรงของแผ่นขึ้นทดสอบยังมีค่าต่ำอยู่ ส่วนการใช้ทั้งแอนทราควิโนนและเมทานอลร่วมกันในปริมาณที่สูงขึ้นกว่าแอนทราควิโนนร้อยละ 0.1 และเมทานอลร้อยละ 20 พบว่า ค่าคัปปานัมเบอร์ลดลงไม่มาก ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และพบว่าที่ภาวะการใช้แอนทราควิโนนร้อยละ 0.1 และเมทานอลร้อยละ 20 มีค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกที่สูงกว่า อีกทั้งเมื่อมีการใช้ปริมาณแอนทราควิโนนและเมทานอลมากไปกว่านี้จะทำให้สิ้นเปลืองสารเคมี

ผลการทดลองการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าให้ผลไปในทางเดียวกับการผลิตเยื่อแบบโซดาเติมแอนทราควิโนนจากลำต้นทานตะวันคือ ให้ผลผลิตเยื่อเพิ่มขึ้น มีการละลายลิกนินออกจากเส้นใยได้มากขึ้น รวมถึงช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษให้ดีขึ้นด้วย ซึ่งภาวะของการผลิตเยื่อของลำต้นทานตะวันจะมีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์น้อยกว่า คือ ร้อยละ 14-16 ของน้ำหนักลำต้นทานตะวันแห้ง แต่มีการใช้อุณหภูมิในการต้มเยื่อมากกว่าคือ 170 องศาเซลเซียส

## 5.2 ข้อเสนอนแนะ

5.2.1 ในการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพด ควรมีการทดลองใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อที่ปริมาณต่ำลง เช่น ร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง เพราะอาจลดปริมาณการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยที่สมบัติของเยื่อและแผ่นขึ้นทดสอบมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 20

5.2.2 ในการผลิตเยื่อแบบโซดาตัดแปรจากลำต้นข้าวโพด ควรมีการทดลองเพิ่มอุณหภูมิในการต้มเยื่อจาก 120 องศาเซลเซียส เป็น 130, 140 หรือ 160 องศาเซลเซียส เพราะอาจลดระยะเวลาในการต้มเยื่อ หรือปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการผลิตเยื่อ โดยที่สมบัติของเยื่อและแผ่นขึ้นทดสอบอาจมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อทำการเทียบกับการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

## รายการอ้างอิง

- [1] สมควร ดีรัมย์. การปลูกข้าวโพด. กรุงเทพฯ : แสงปัญญาเลิศ, 2542.
- [2] อัมพล เสนาณรงค์. การปลูกข้าวโพดในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: กรมส่งเสริมการเกษตร, 2515.
- [3] คณาจารย์ภาควิชาพืชไร่ภาควิชาพืชไร่ภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. พืชเศรษฐกิจ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2547.
- [4] วิชาการเกษตร, กรม. ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, 2547.
- [5] วิชาการเกษตร, กรม. ข้าวโพด. กรุงเทพฯ: ธนประดิษฐ์การพิมพ์, 2524.
- [6] Ahmed A. and Zhu, J, Y. Cornstalk as a Source of Fiber and Energy. In 3<sup>rd</sup> International Symposium on Emerging Technology of Pulping and Papermaking, Guangzhou, 2006, pp 1-4. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006.
- [7] Biermann, C.J. Essential of Pulping and Papermaking. San Diego: Academic Press, 1993.
- [8] Sjöström, E. and Alén, R. Analytical Methods in Wood Chemistry, Pulping, and Papermaking. Berlin: Springer-verlag, 1999.
- [9] Roberts, J.C. The Chemistry of Paper. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1996.
- [10] Mimms, A. Kraft Pulping a Compilation of Notes. Atlanta: TAPPI Press, 1989.
- [11] Casey, J.P. Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology. 3<sup>rd</sup> ed. Vol I. New York : John Wiley & Sons, 1980.
- [12] Gullichsen, J. and Paulapuro, H. Papermaking Science and Technology : Chemical Pulping Book 6A. Jyväskylä: Gummerus Printing, 2000.
- [13] Smook, G.A. Handbook for Pulp & Paper technologists. 2<sup>nd</sup> edition. Vancouver: Angus Wilde, 1994.
- [14] Sixta, H. Handbook of Pulp. Vol II. Weinheim: Weley-VCH, 2006.
- [15] Khristova, P., Gabir, S., Bontoheva, S. and Dafalla, S., Soda-Anthraquinone Pulping of Sunflower Stalks. Industrial Crops and Products 9 (1998): 9-17.

- [16] Feng, Z. and Alén, R., Soda-AQ pulping of reed canary grass. Industrial Crops and Products 14 (2001): 31-39.
- [17] Oliet, M., Garcia, J., Rodriguez, F. and Gilarranz, M.A. Solvent effects in autocatalyzed alcohol-water pulping comparative study between ethanol and methanol as delignifying agents. Chemical Engineering Journal 87 (2002):157-162.
- [18] Shatalov, A.A. and Pereira, H. *Arundo donax L.* reed: New perspectives for pulping and bleaching-organosolv delignification. TAPPI PEER-Reviewed paper 84 (November 2001):1-14.
- [19] Stockburger, P., An overview of near-commercial and commercial solvent-based pulping processes. Tappi journal 76(1993): 71-74.
- [20] สุพิธา สุขจำเริญ. การเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษจากส่วนต่างๆของต้นข้าวโพดต่างพันธุ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [21] Ahmed, A., Won, J.M. and Ryu, H., Method for Producing Corn Stalk Pulp and Paper Products from Corn Stalk Pulp, US Patent: US2004/0256065 A1, 2004.
- [22] Nakano, J., Takatsuka, C., Daima, H., Kobayashi, M. and Sasaki, N. Studies on alkalimethanol cooking, (2), strenght of pulp sheet and recovery of methanol. Japan Tappi 31(1977): 762-766.
- [23] Mogollon, G. Effect of organic solvent on the alkaline delignification of sugar cane bagasse. In 6<sup>th</sup> International Symposium on Wood and Pulping Chemistry Proc., pp. 251-255. Melbourne, 1991
- [24] TAPPI. TAPPI Test Methods. Atlanta: TAPPI Press, 2002.
- [25] Browning, B.L. Method in Wood Chemistry. New York: Interscience Publisher, 1963.
- [26] สมหวัง ชันตยานวงค์. เส้นใยเยื่อและกระดาษ: สมบัติทางกายภาพ. ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)
- [27] Suckling, I.D. Enhanced Cleavage of  $\beta$ -Aryl Ether Bonds in Lignin Model Compounds During Sulphite-Anthraquinone Pulping, Journal of Wood Chemistry and Technology, 8 (1:1988): 43-71.

ภาคผนวก

## การคำนวณสารเคมีในการผลิตเชื้อและการเตรียมเชื้อ

### 1. วิธีการหาความชื้นของลำต้นข้าวโพดแห้ง

นำลำต้นข้าวโพดที่ตัดเป็นท่อนมาทำการชั่งน้ำหนักก่อนอบหลังจากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็นใน desicator หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักหลังอบและนำมาคำนวณหาปริมาณความชื้นของต้นข้าวโพด ดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความชื้นของต้นข้าวโพด (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักลำต้นข้าวโพดก่อนอบ} - \text{น้ำหนักลำต้นข้าวโพดหลังอบ}}{\text{น้ำหนักลำต้นข้าวโพดก่อนอบ}} \times 100$$

### 2. วิธีการคำนวณสารเคมีที่ใช้ในการต้มเชื้อ

ยกตัวอย่างของภาวะที่มีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักต้นข้าวโพดแห้ง เดิมแอนทราควิโนนร้อยละ 0.2 ของน้ำหนักลำต้นข้าวโพดแห้ง และเมทานอลร้อยละ 20 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด กำหนดให้น้ำหนักลำต้นข้าวโพดมีน้ำหนัก 170 กรัม มีความชื้นร้อยละ 10 และในการต้มเชื้อกำหนดให้มีค่าของเหลวต่อน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง (L: W) เป็น 9 ต่อ 1

#### - หาน้ำหนักข้าวโพดแห้ง จากความชื้นร้อยละ 10

น้ำหนักต้นข้าวโพด 100 กรัมจะมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ  $100 - 10 = 90$  กรัม

ถ้าน้ำหนักต้นข้าวโพดแห้ง 170 กรัมจะมีน้ำหนักแห้งเท่ากับ  $(170 \times 90) / 100 = 153$  กรัม

#### - หาอัตราส่วนปริมาตรของเหลวทั้งหมด จากค่า L: W = 9:1

น้ำหนักลำต้นข้าวโพดแห้งที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 153 กรัมดังนั้นปริมาตรของเหลวทั้งหมดที่ใช้ในการต้มเชื้อคือ  $9 \times 153 = 1377$  กรัม

#### - หาปริมาณสารเคมีที่ต้องเติม

โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักข้าวโพดแห้ง

น้ำหนักข้าวโพดแห้ง 100 กรัมจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 กรัม

ถ้าน้ำหนักข้าวโพดแห้ง 153 กรัมจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ  $(153 \times 20) / 100 = 30.6$

กรัม

แต่เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีการเตรียมไว้ที่ความเข้มข้น 180 กรัมต่อลิตร ดังนั้นจะต้องตวงปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังนี้

โซเดียมไฮดรอกไซด์ 180 กรัมจาก สารละลาย 1000 มิลลิลิตร

ถ้าต้องการโซเดียมไฮดรอกไซด์ 30.6 กรัม ดังนั้นต้องตวงสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ  $(30.6 \times 1000) / 180 = 170$  มิลลิลิตร

แอนทราควิโนนร้อยละ 20 ของน้ำหนักข้าวโพดแห้ง

น้ำหนักข้าวโพดแห้ง 100 กรัมจะใช้แอนทราควิโนน 0.2 กรัม

ถ้าน้ำหนักข้าวโพดแห้ง 153 กรัมจะใช้แอนทราควิโนนเท่ากับ  $(153 \times 0.2) / 100 = 0.306$  กรัม

เมทานอลร้อยละ 20 ของปริมาตรของเหลวทั้งหมด

ปริมาตรของเหลวทั้งหมด 100 มิลลิลิตร ใช้เมทานอล 20 มิลลิลิตร

แต่ถ้าปริมาตรของเหลวทั้งหมด 1377 มิลลิลิตร ใช้เมทานอลเท่ากับ  $(1377 \times 20) / 100 = 275.4$  มิลลิลิตร

ดังนั้นปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพิ่ม = ปริมาตรของเหลวทั้งหมด - ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ - ปริมาตรเมทานอล - ปริมาตรความชื้นในข้าวโพด

ปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพิ่ม =  $1377 - 170 - 275.4 - 17 = 914.6$  มิลลิลิตร

### 3. วิธีการคำนวณเยื่อในการบดเยื่อ

เนื่องจากตามมาตรฐาน TAPPI T 200 sp-01 กำหนดให้ใช้น้ำหนักเยื่อแห้งในการบดเยื่อ 360 กรัมน้ำหนักแห้ง ในน้ำปริมาตร 23 ลิตร ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของเยื่อ (% consistency) มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.56 กำหนดให้เยื่อมีความชื้นร้อยละ 75 ดังนั้นถ้าต้องการเยื่อแห้ง 360 กรัม คำนวณได้ดังนี้

ความชื้นร้อยละ 75 แสดงว่าเมื่อชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความชื้น 100 กรัม จะมีเยื่อแห้งอยู่ 25 กรัม

ถ้าต้องการเยื่อแห้ง 25 กรัม ต้องชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความชื้น 100 กรัม

ถ้าต้องการเยื่อแห้ง 360 กรัม ต้องชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความชื้นเท่ากับ  $(360 \times 100) / 25 = 1440$  กรัม

ดังนั้นต้องชั่งเยื่อที่มีความชื้นร้อยละ 75 มา 1440 กรัมถึงจะได้เยื่อแห้ง 360 กรัม น้ำหนักแห้ง และพบว่ามือน้ำอยู่ในเยื่อแล้ว  $1440 - 360 = 1080$  กรัม ดังนั้นจะต้องเติมน้ำเพิ่มลงไปอีก 21920 กรัม เพื่อที่จะทำให้น้ำเยื่อที่พร้อมก่อนการบดมีความเข้มข้นร้อยละ 1.56

#### 4. วิธีการคำนวณหาปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการหาค่าความเป็นอิสระของเยื่อ (freeness)

เนื่องจากตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-94 กำหนดให้ใช้ความเข้มข้นของเยื่อเท่ากับ ร้อยละ 0.3 ในปริมาตรทั้งหมด 1000 มิลลิลิตร ในการหาค่าความเป็นอิสระของเยื่อ และในการหา จะตวงน้ำเยื่อมาจากเครื่องบดเยื่อซึ่งมีความเข้มข้นของน้ำเยื่อเท่ากับ 1.56 ดังนั้นจะใช้สูตร ดังต่อไปนี้ในการตวงปริมาณน้ำเยื่อเพื่อมาทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

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 มิลลิลิตร แล้วทำการเติมน้ำจนมีปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร แล้วนำไปหาค่าความเป็นอิสระของเยื่อ

## 5. วิธีการคำนวณน้ำเยื่อไว้ใช้สำหรับการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ

กำหนดให้น้ำหนักของแผ่นขึ้นทดสอบมีน้ำหนักเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร และเครื่องขึ้นแผ่นมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10.02 เซนติเมตร ดังนั้นพื้นที่ของเครื่องขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบจะมีพื้นที่เท่ากับ 0.0315 ตารางเมตร ดังนั้นถ้าจะทำการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตรจะต้องใช้เยื่อแห้งเท่ากับดังนี้

แผ่นขึ้นทดสอบ 1 ตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่น 60 กรัม

ถ้าแผ่นขึ้นทดสอบมีขนาด 0.0315 ตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่นเท่ากับ  $60 \times 0.0315 = 1.89$  กรัม

ดังนั้นจะต้องใช้เยื่อแห้ง 1.89 กรัมในการขึ้นแผ่นเพื่อทำให้แผ่นขึ้นทดสอบมีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร แต่ละภาวะจะทำการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ 15 แผ่น ดังนั้นจะต้องใช้เยื่อทั้งหมดในการขึ้นแผ่นเท่ากับ  $1.89 \times 15 = 28.35$  กรัม เนื่องจากความเข้มข้นของน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.56 ดังนั้นเราจะต้องตวงน้ำเยื่อออกมาปริมาตรเท่าไรให้มีเยื่อหนักเท่ากับ 28.35 กรัม โดยวิธีการเทียบดังนี้

น้ำหนักเยื่อ 1.56 กรัม ตวงมาจากน้ำเยื่อในเครื่องบดเยื่อ 100 มิลลิลิตร

ถ้าต้องการน้ำหนักเยื่อ 28.35 กรัม ต้องตวงน้ำเยื่อมาจากในเครื่องบดเยื่อเท่ากับ  $(28.35 \times 100) / 1.56 = 1817$  มิลลิลิตร

นำปริมาตรน้ำเยื่อที่คำนวณได้จากเครื่องบดเยื่อมาทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0.3 เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ หลังจากนั้นทำการคำนวณปริมาตรน้ำเยื่อเพื่อใช้ในการขึ้นแผ่น เนื่องจากแผ่นขึ้นทดสอบขนาด 60 กรัมต่อตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อ 1.89 กรัม ดังนั้นจะต้องทำการตวงน้ำเยื่อที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.3 ให้มีน้ำหนักเยื่อ 1.89 โดยการเทียบดังนี้

น้ำหนักเยื่อ 0.3 กรัม ตวงมาจากน้ำเยื่อ 100 มิลลิลิตร

ถ้าต้องการน้ำหนักเยื่อ 1.89 กรัม ต้องตวงมาจากน้ำเยื่อเท่ากับ  $(1.89 \times 100) / 0.3 = 630$  มิลลิลิตร

ดังนั้นตวงน้ำเยื่อจำนวน 630 มิลลิลิตรมาทำการขึ้นแผ่นก็จะได้น้ำหนักแผ่นขึ้นทดสอบที่มีขนาด 60 กรัมต่อตารางเมตร



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

### ประวัติส่วนตัว

นายวราพงษ์ ไสพิน เกิดเมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดอ่างทอง

### ประวัติการศึกษา

- ปี พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนอ่างทองปัทมโรจน์วิทยาคม
- ปี พ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อและกระดาษ ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

### ผลงานวิชาการ

- Sopin, W., Suvarnakich, K. and Chairrekij, S. (2009). Comparison of Soda and Modified Soda Pulping of Corn Stalks. 5<sup>th</sup> Mathematics and Physical Sciences Graduate Congress. 7-9 December 2009. Faculty of Science, Chulalongkorn University, Thailand.
- Sopin, W., Suvarnakich, K. and Chairrekij, S. (2010). Effects of Anthraquinone and Methanol in Modified Soda Pulping of Corn Stalk. The 3<sup>rd</sup> Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference. pp. 410-413, 4-6 March 2010. Nong Khai, Thailand.