การเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดต่างพันธุ์

นางสาวสุพิตา สุขจำเริญ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPARISON OF PROPERTIES OF PULP AND PAPER FROM PARTS OF CORN STALK FROM DIFFERENT CORN CULTIVARS

Miss Supita Sukjamroen

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2008

Copyright of Chulalongkorn University

510686

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดต่างพันธุ์
โดย	นางสาวสุพิตา สุขจำเริญ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา บุญ-หลง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. สิริวรรณ พัฒนาฤดี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร. เลอพงศ์ จารุพันธ์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุพิตา สุขจำเริญ : การเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดต่างพันธุ์. (COMPARISON OF PROPERTIES OF PULP AND PAPER FROM PARTS OF CORN STALK FROM DIFFERENT CORN VARIETIES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ. ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ, 173 หน้า.

ข้าวโพด เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทย อีกทั้งยังปลูกได้ทั่วไปในทุกภาคของประเทศ แต่หลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิต ต้นข้าวโพดประมาณ 6,000-8,000 ต้นต่อไร่ ถูกไถกลบหรือเผาทิ้งไปพร้อมๆ กับพื้นที่เพาะปลูก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความต้องการที่จะนำต้นข้าวโพดมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเยื่อและกระดาษ โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อและกระดาษจากต้นข้าวโพด เปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ (พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์) รวมถึงหาสัดส่วนระหว่างเยื่อจากต้นข้าวโพดกับเยื่อทางการค้าที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษให้ดีขึ้น สำหรับการผลิตเยื่อจะใช้กระบวนการโซดา ที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ ทำการต้มเยื่อเป็นเวลา 120 นาที ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า สภาวะในการผลิตเยื่อที่ให้สมบัติด้านความแข็งแรง (ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ) ของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ดีที่สุด คือ สภาวะการต้มเยื่อที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 และ 25 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ตามลำดับ เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อทางการค้า (เยื่อจากไม้เนื้ออ่อนและเยื่อจากไม้เนื้อแข็ง) โดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ในอัตราส่วนร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง พบว่า เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ สามารถช่วยในการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรง (ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ) ของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อทางการค้าให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากทุกอัตราส่วนไม่มีความแตกต่างกัน และมีสมบัติด้านความแข็งแรงที่ดีกว่ากระดาษควบคุม หรือกระดาษที่ไม่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด ดังนั้น ต้นข้าวโพดสามารถนำมาใช้ในการผลิตเยื่อและกระดาษได้เป็นอย่างดี

สาขาวิชา เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2551 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

5072527723 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY

KEYWORDS : CORN STALK / SODA PULPING / PAPERMAKING / PAPER PROPERTIES

SUPITA SUKJAMROEN : COMPARISON OF PROPERTIES OF PULP AND PAPER FROM PARTS OF CORN STALK FROM DIFFERENT CORN CULTIVARS. ADVISOR : KUNTINEE SUVARNAKICH, 173 pp.

Corn, an important economic crop, is grown abundantly in Thailand. After harvesting, corn stalk is considered an agricultural residue with as many as 6000-8000 corn stalks per 1 rai (0.4 acre). It is ploughed up or burnt down in the field. Thus, this study aimed to find potential use of corn stalk in pulp and paper production by finding the optimum pulping conditions and papermaking potential of corn stalk, comparing properties of pulp and paper produced from various parts of corn stalk from different corn cultivars (waxy and field corn), and obtaining optimum ratio between corn stalk pulp and commercial pulp to improve paper properties. Corn stalk was cooked by soda process with various concentration of sodium hydroxide (NaOH). Pulping time was 120 minutes and pulping temperature was 120 °C. The results showed that the optimum pulping conditions that provided paper with best strength properties (tensile index and burst index) for waxy corn and field corn were 15% and 25% based on oven-dried chip weight, respectively. When corn stalk pulp was used to substitute commercial pulp (hardwood and softwood) at the amount of 25%, 50%, 75% and 100% based on oven-dried pulp weight to improve paper properties, it was found that the pulps from both corn cultivars could improve strength properties (tensile index and burst index) with similar efficacy in all ratios and had better strength properties than the control paper which contained no corn stalk pulp. Therefore, corn stalk residue can be used in pulping and papermaking with good results.

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

Academic Year : 2008 Advisor's Signature : Kuntinee Suvarnakich

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร. กุนทินี สุวรรณกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเสียสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ตรวจแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ สนับสนุนและให้กำลังใจ ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ สมพร ชัยอารีย์กิจ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ให้ความรู้ คำแนะนำ ตรวจแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ สนับสนุนและให้กำลังใจ ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี

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

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยภายใต้โครงการ "วิทยาเพื่อพื้นถิ่น จังหวัดน่าน"

ขอบคุณบริษัทเอสซีจี เปเปอร์ จำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์เยื่อทางการค้า (เยื่อจากไม้เนื้ออ่อนและเยื่อจากไม้เนื้อแข็ง) และขอขอบคุณคุณบุญเลิศ วิเชียรณรัตน์ เกษตรอำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี ที่ติดต่อประสานงานและจัดหาต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ให้เป็นอย่างดี

ขอบคุณ เพื่อน พี่ และน้องๆ สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเพื่อนๆ สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ทุกคนที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจในการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่และญาติๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนทางด้านการเรียนและการวิจัยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ญ
สารบัญภาพ..... ฐ

บทที่

1 บทนำ..... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น..... 3
1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย..... 3
1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย..... 3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3
1.8 วิธีดำเนินการวิจัย..... 4

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 5
2.1 แนวคิดและทฤษฎี..... 5
2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ทำเยื่อและกระดาษ..... 5
2.1.2 แหล่งที่มาของเส้นใยที่ใช้ในการผลิตกระดาษ..... 6
2.1.3 โครงสร้างทางกายภาพของไม้ (wood structure)..... 8
2.1.4 โครงสร้างของเส้นใย (fiber structure)..... 10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

2.1.5 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้..... 12
2.1.5.1 คาร์โบไฮเดรต (carbohydrates)..... 12
2.1.5.2 ลิกนิน (lignin)..... 17
2.1.5.3 สารแทรก (extractives)..... 19
2.1.6 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้ในประเทศไทย. 19
2.1.6.1 วัตถุดิบประเภทไม้ (wood)..... 20
2.1.6.2 วัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ (non-wood)..... 20
2.1.7 กระบวนการผลิตเยื่อ (pulping process)..... 23
2.1.8 กระบวนการฟอกเยื่อ (bleaching process)..... 25
2.1.9 การฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ((hydrogen peroxide bleaching, H_2O_2) 27
2.1.10 ข้าวโพด (corn)..... 29
2.1.11 ลักษณะทั่วไป และองค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพด..... 35
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 37

3 วิธีดำเนินการวิจัย..... 39
3.1 วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... 39
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย..... 41
3.2.1 การทดลองตอนที่ 1: หาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเยื่อจากต้นข้าวโพด และหาส่วนของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ที่ให้สมบัติของกระดาษที่ดีที่สุด..... 41
3.2.2 การทดลองตอนที่ 2: เปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ (พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์)..... 52
3.2.3 การทดลองตอนที่ 3: ศึกษาผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษ..... 53

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

3.2.4 การทดลองตอนที่ 4: ศึกษาหาสัดส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อทางการค้าที่เหมาะสมในการผลิตกระดาษ เพื่อให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่ดี..... 54

4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล..... 57

4.1 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเยื่อจากต้นข้าวโพด และส่วนของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ที่ให้สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ดีที่สุด..... 57

4.2 ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเยื่อจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ที่ให้สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ดีที่สุด..... 77

4.3 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ (พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์)..... 90

4.4 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษ 107

4.5 ผลการศึกษาหาสัดส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อทางการค้าที่เหมาะสมในการผลิตกระดาษ เพื่อให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่ดี..... 123

5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 142

รายการอ้างอิง..... 148

ภาคผนวก..... 153

ภาคผนวก ก การคำนวณการเตรียมเยื่อและสารเคมี..... 154

ภาคผนวก ข ภาพจากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 169

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 173

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ขนาดเส้นใยของวัตถุดิบชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษ.....	22
2-2	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยวัตถุดิบต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษในประเทศไทย.....	23
2-3	ลักษณะทั่วไปของเส้นใยชนิดต่างๆ	35
2-4	องค์ประกอบทางเคมีของส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด.....	36
2-5	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากต้นข้าวโพดเปรียบเทียบกับเส้นใยจากไม้เนื้ออ่อนและเส้นใยจากไม้เนื้อแข็ง.....	37
4-1	สมบัติของเยื่อที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่อต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน.....	58
4-2	องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ก่อนและหลังการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน.....	61
4-3	ความหนาของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่อต้มเยื่อด้วยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน.....	65
4-4	ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อสมบัติเชิงแสงของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว.....	67
4-5	ค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่อต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน.....	75
4-6	ค่า F ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่อต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน.....	76

ตารางที่ หน้า

4-7 สมบัติของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เมื่อต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน..... 79

4-8 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ก่อนและหลังการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน..... 80

4-9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เมื่อต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 89

4-10 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ก่อนและหลังการฟอกเยื่อ..... 122

4-11 ความหนาของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 124

4-12 ความหนาแน่นของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 126

4-13 ความขาวสว่างของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 127

4-14 ความทึบแสงของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์..... 129

4-15 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์..... 131

4-16 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์..... 132

4-17 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์..... 134

ตารางที่ หน้า

4-18 การวิเคราะห์ทางสถิติของสมบัติต่างๆ ของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อการค้า (เยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาว) ที่มีการปรับปรุงสมบัติของกระดาษด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ในอัตราส่วนต่างๆ กัน..... 136

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	โครงสร้างของลำต้นของพืชที่มีเนื้อไม้	8
2-2	ตัวอย่างชนิดของเซลล์ของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง	9
2-3	โครงสร้างของเส้นใย	10
2-4	โครงสร้างระดับโมเลกุลของผนังเซลล์ปฐมภูมิในพืช	11
2-5	โครงสร้างของเซลลูโลส	13
2-6	ลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่เซลลูโลสแต่ละเส้น ด้วยการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุล	14
2-7	บริเวณส่วนที่เป็นผลึก (ส่วนที่เป็นระเบียบ) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (ไม่เป็นระเบียบ)ของเซลลูโลส	14
2-8	น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีคาร์บอน 6 อะตอมเป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส	15
2-9	น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีคาร์บอน 5 อะตอมเป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส	15
2-10	โครงสร้างของลิกนิน (native lignin)	16
2-11	องค์ประกอบหลักของลิกนิน	16
2-12	ตัวอย่างหมู่โครโมฟอร์ (chromophore) ที่อยู่ในโครงสร้างของลิกนิน	26
2-13	ปฏิกิริยาเคมีของหมู่ฟีนอลิก (phenolic group) ในโครงสร้างทางเคมีของลิกนินที่เปลี่ยนเป็น quinine-like substance	26
2-14	ปฏิกิริยาการกำจัดลิกนิน	28
2-15	ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว	31
2-16	ลักษณะของเส้นใยจากต้นข้าวโพด (corn stalk fiber)	35
3-1	ลักษณะของต้นข้าวโพดที่เก็บเกี่ยวฝักสดเรียบร้อยแล้ว	42
3-2	ลักษณะการตัดต้นข้าวโพด	42
3-3	ลักษณะการตัดต้นข้าวโพดเป็นท่อนเล็กๆ	42
3-4	ลักษณะของท่อนข้าวโพดที่ตัดเป็นท่อนเรียบร้อยแล้ว	43
3-5	ลักษณะการแยกส่วนของเปลือกนอกและแกนกลางของต้นข้าวโพด	43

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ หน้า

3-6 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อและกระดาษจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดที่เตรียมเรียบร้อยแล้ว..... 43

3-7 บอมบ์ (bomb) สำหรับบรรจุต้นข้าวโพด เพื่อใช้ในการต้มเยื่อด้วยเครื่องต้มเยื่อ..... 45

3-8 เครื่องต้มเยื่อ (autoclave digester)..... 45

3-9 เครื่องตีกระจายเยื่อและลักษณะน้ำเยื่อที่ได้หลังจากตีกระจายเยื่อเรียบร้อยแล้ว..... 46

3-10 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (FQA)..... 47

3-11 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid – Kothen (Rapid – Kothen sheet former)... 48

3-12 น้ำเยื่อที่ใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษแต่ละแผ่น..... 48

3-13 การขึ้นแผ่นกระดาษและลักษณะของกระดาษที่ได้จากเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ... 49

3-14 ลักษณะของกระดาษที่จะอบแห้งและส่วนอบแห้งของกระดาษของ เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ 49

3-15 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสงของกระดาษ (Color touch PC)..... 50

4-1 ลักษณะพื้นผิวของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ที่กำลังขยาย 200 เท่า..... 62

4-2 ลักษณะภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า..... 64

4-3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด..... 66

4-4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด..... 68

ภาพที่ หน้า

4-5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด..... 69

4-6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าความดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด..... 71

4-7 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าความดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด..... 72

4-8 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าความดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด..... 74

4-9 ลักษณะพื้นผิวของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ที่กำลังขยาย 200 เท่า..... 81

4-10 ลักษณะภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า..... 82

4-11 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความหนาของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์..... 83

4-12 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์..... 84

4-13 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์..... 85

4-14 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์..... 85

ภาพที่ หน้า

4-15 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์..... 86

4-16 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์..... 87

4-17 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์..... 88

4-18 ผลการเปรียบเทียบปริมาณองค์ประกอบทางเคมีระหว่างต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวกับพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน..... 91

4-19 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อร้อยละ 10 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง โดย (ก) และ (ค) ที่กำลังขยาย 200 เท่า ส่วน (ค) และ (ง) ที่กำลังขยาย 500 เท่า..... 93

4-20 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง โดย (ก) และ (ค) ที่กำลังขยาย 200 เท่า ส่วน (ค) และ (ง) ที่กำลังขยาย 500 เท่า..... 94

4-21 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง โดย (ก) และ (ค) ที่กำลังขยาย 200 เท่า ส่วน (ค) และ (ง) ที่กำลังขยาย 500 เท่า..... 95

ภาพที่ หน้า

4-22 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อผลผลิตของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดสองพันธุ์..... 96

4-23 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความยาวของเส้นใยที่ผลิตจากต้นข้าวโพดสองพันธุ์..... 97

4-24 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ผลิตจากต้นข้าวโพดสองพันธุ์..... 97

4-24 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่ผลิตจากต้นข้าวโพดสองพันธุ์..... 98

4-26 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อสภาพระบายได้ของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดสองพันธุ์..... 99

4-27 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความหนาของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดสองพันธุ์..... 100

4-28 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดสองพันธุ์..... 101

4-29 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดสองพันธุ์..... 102

4-30 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ 103

4-31 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์..... 104

4-32 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์..... 105

ภาพที่ หน้า

4-33 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์..... 106

4-34 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ก่อนและหลังฟอกเยื่อ โดย (ก) และ (ข) ที่กำลังขยาย 200 เท่า ส่วน (ค) และ (ง) ที่กำลังขยาย 500 เท่า..... 108

4-35 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ก่อนและหลังฟอกเยื่อ โดย (ก) และ (ข) ที่กำลังขยาย 200 เท่า ส่วน (ค) และ (ง) ที่กำลังขยาย 500 เท่า..... 109

4-36 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อความยาวของเส้นใยที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์..... 111

4-37 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์..... 111

4-38 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อปริมาณของเส้นใยขนาดเล็กที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์..... 112

4-39 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อ (ก) ดัชนีความโค้งงอ และ (ข) ดัชนีความหักงอของเส้นใยที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์..... 113

4-40 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อสภาพระบายได้ของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์..... 114

4-41 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อความหนาของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์..... 115

4-42 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์..... 116

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ หน้า

4-43 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์..... 117
4-44 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์..... 118
4-45 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์..... 119
4-46 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์..... 120
4-47 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์..... 120
4-48 ความหนาของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) และพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (field corn) ในอัตราส่วนต่างๆ..... 124
4-49 ความหนาแน่นของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) และพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (field corn) ในอัตราส่วนต่างๆ..... 126
4-50 ความขาวสว่างของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) และพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (field corn) ในอัตราส่วนต่างๆ..... 128
4-51 ความทึบแสงของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) และพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (field corn) ในอัตราส่วนต่างๆ..... 130
4-52 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) และพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (field corn) ในอัตราส่วนต่างๆ..... 131

ภาพที่ หน้า

4-53 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) และพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (field corn) ในอัตราส่วนต่างๆ..... 133

4-54 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) และพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (field corn) ในอัตราส่วนต่างๆ..... 135

ข-1 กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้น ที่กำลังขยาย 200 เท่า..... 170

ข-2 กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาว ที่กำลังขยาย 200 เท่า..... 170

ข-3 กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว อัตราส่วนร้อยละ 50:50 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่กำลังขยาย 200 เท่า..... 171

ข-4 กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ อัตราส่วนร้อยละ 50:50 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่กำลังขยาย 200 เท่า..... 171

ข-5 กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว อัตราส่วนร้อยละ 50:50 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่กำลังขยาย 200 เท่า..... 172

ข-6 กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ อัตราส่วนร้อยละ 50:50 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่กำลังขยาย 200 เท่า..... 172

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษของประเทศมีอัตราการขยายตัวสูงขึ้น ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษต้องพยายามหาแหล่งวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ในการผลิตเยื่อและกระดาษเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการที่สูงขึ้น อีกทั้งยังมีความกดดันทางด้านการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและป่าไม้เข้ามาเกี่ยวข้องจึงทำให้อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษมีแนวโน้มลดปริมาณการใช้ไม้ (wood) เพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อและกระดาษลง ดังนั้นจึงเริ่มมีการศึกษาและหาวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ (non-wood raw material) ต่างๆ มาทดแทนพืชที่มีเนื้อไม้เพื่อใช้ในการผลิตเยื่อและกระดาษเพิ่มมากขึ้น โดยพืชที่ไม่ใช่ไม้ที่มีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาเป็นแหล่งวัตถุดิบในการผลิตเยื่อและกระดาษที่น่าสนใจในประเทศไทยนั้น ได้แก่ ชานอ้อย ฟางข้าว เปลือกในของพืชตระกูลปอต่างๆ เช่น ปอสา ปอแก้ว ปอกระเจา ปอคิวบา และใบสับปะรด เป็นต้น อย่างไรก็ตามยังมีพืชอีกชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจและมีศักยภาพที่จะนำมาผลิตเยื่อและกระดาษได้เช่นเดียวกับวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ นั่นคือ ต้นข้าวโพด (corn stalk)

ข้าวโพด เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทย อีกทั้งยังปลูกได้ทั่วไปในทุกภาคของประเทศ โดยในส่วนของเมล็ดจากฝักข้าวโพดใช้เป็นอาหารคนและสัตว์ นอกจากนั้นยังสามารถนำข้าวโพดมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเครื่องอุปโภคหลายชนิด เช่น ทำสบู่ น้ำมันใส่ผม น้ำหอม ยา และผ้า เป็นต้น ส่วนของฝัก ใบ และลำต้นนั้นยังอาจนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ได้อีกหลายอย่าง เช่น ปุ๋ยและวัตถุฉนวนไฟฟ้า นอกจากนี้ซังข้าวโพดแห้งยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มได้ อย่างไรก็ตาม ข้าวโพดเมื่อทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตเรียบร้อยแล้ว ส่วนของใบและลำต้นข้าวโพดมักจะถูกไถกลบไปพร้อมๆ กับพื้นที่เพาะปลูกหรือบางแหล่งอาจมีการเผาต้นข้าวโพดทิ้ง ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงจัดได้ว่าต้นข้าวโพดเป็นของเหลือจากการเกษตร (agricultural residues) ซึ่งผลผลิตของต้นข้าวโพดต่อไร่มีประมาณ 6,000-8,000 ต้น ที่เป็นส่วนที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวผลผลิต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความต้องการที่จะนำต้นข้าวโพดมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเยื่อและกระดาษ ซึ่งเส้นใยจากต้นข้าวโพดนั้นมีความยาวที่ใกล้เคียงกับเส้นใยจากไม้เนื้อแข็ง ซึ่งเป็นเยื่อใยสั้น มีปริมาณของเซลลูโลสค่อนข้างสูงและมีปริมาณลิกนินที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเส้นใยที่ได้จากพืชที่มีเนื้อไม้ทั่วๆ ไป โดยในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อและกระดาษจากต้นข้าวโพด เปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ รวมถึง

ศึกษาหาสัดส่วนระหว่างเยื่อจากต้นข้าวโพดกับเยื่อทางการค้าที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษให้ดีขึ้นอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 หาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากต้นข้าวโพด เพื่อใช้ในการผลิตกระดาษ

1.2.2 เปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดต่างพันธุ์

1.2.3 หาสัดส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด (corn stalk pulp) ต่อเยื่อทางการค้าที่เหมาะสมในการผลิตกระดาษ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อและกระดาษจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด (พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว) ที่ให้สมบัติของกระดาษที่ดีที่สุด โดยนำต้นข้าวโพดแต่ละส่วนคือ ส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพด ส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพดและต้นข้าวโพดทั้งต้นมาผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา (soda pulping) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10, 15 และ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้งต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเยื่อที่ผลิตได้ในแต่ละส่วนของต้นข้าวโพดมาขึ้นแผ่นกระดาษให้ได้น้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร ทำการทดสอบสมบัติเชิงแสงและสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษต่างๆ

1.3.2 เปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ คือ พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยใช้ส่วนของต้นข้าวโพดที่ดีที่สุดที่หาได้จากข้อ 1.3.1 และใช้สภาวะการต้มเยื่อเช่นเดียวกับข้อ 1.3.1

1.3.3 นำเยื่อที่ได้จากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มาทำการฟอกเยื่อ โดยใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ร้อยละ 3 อุณหภูมิการฟอกเยื่อที่ 80-85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และค่าความเป็นกรด-เบส (pH) คงที่ 10 ± 0.2

1.3.4 หาสัดส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด (corn stalk pulp) ต่อเยื่อทางการค้า (เยื่อจากไม้เนื้ออ่อนและเยื่อจากไม้เนื้อแข็ง) ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อการค้าให้ดีขึ้น

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อและกระดาษจากต้นข้าวโพด เปรียบเทียบสมบัติของกระดาษที่ผลิตได้จากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ รวมถึงศึกษาหาสัดส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อทางการค้าที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษให้ดีขึ้น

1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย

ข้าวโพดมีฤดูการเก็บเกี่ยวผลผลิตเพียงแค่ปีละ 2 ครั้ง ทำให้วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อและกระดาษอาจไม่เพียงพอต่อความต้องการในระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้การควบคุมคุณภาพของต้นข้าวโพดให้สม่ำเสมอนั้นทำได้ยาก

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

กระบวนการผลิตเยื่อ (pulping) เป็นกระบวนการที่พยายามแยกเส้นใยจากชิ้นไม้ออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ (Individual fiber) โดยอาจมีการเอาลิกนินหรือไม่เอาลิกนินออกจากชิ้นไม้ก็ได้ เพื่อนำเยื่อที่ผลิตได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ

การผลิตกระดาษ (papermaking) เป็นการนำเยื่อกระดาษไปผสมน้ำให้มีความเจือจางของน้ำเยื่อที่เหมาะสม กวนให้เยื่อกระดาษกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แล้วนำเยื่อกระดาษมาทำให้เป็นแผ่นได้โดยการเอาน้ำออกผ่านตะแกรงลวด เยื่อจะจับตัวและตกทับกันเป็นชั้นๆ สุดท้ายเมื่อกระดาษแห้งตัวเส้นใยจะเกิดแรงยึดระหว่างเส้นใยด้วยกันเองขึ้น เกิดเป็นแผ่นกระดาษขึ้นมา

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้สภาวะในการผลิตเยื่อและกระดาษจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด (พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว) ที่เหมาะสมในการนำมาผลิตเยื่อและกระดาษ

1.6.2 ได้ข้อมูลของสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ คือ พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว และพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

1.6.3 ได้สัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ต่อเยื่อทางการค้าในการผลิตกระดาษ

1.6.4 สามารถนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรกลับมาใช้ให้เป็นประโยชน์ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับต้นข้าวโพดอีกทางหนึ่ง

1.7 วิธีดำเนินการวิจัย

1.7.1 ศึกษาค้นคว้ารวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.7.2 เตรียมวิธีการทดลอง อุปกรณ์และสารเคมี

1.7.3 ผลิตเยื่อและกระดาษ

1.7.4 ทดสอบสมบัติของเยื่อและกระดาษ

1.7.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผลการทดลองและเรียบเรียงเนื้อหาเพื่อผลิตบทความวิจัย

1.7.6 เขียนวิทยานิพนธ์และส่งผลงานไปเผยแพร่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

กระดาษ โดยทั่วไปหมายถึง วัสดุแผ่นบางๆ ซึ่งโครงร่างเป็นชั้นซ้อนกันด้วยเส้นใยจากพืช ที่เรียงสานกันอย่างไม่เป็นระเบียบ โดยที่การยึดหรือประสานกันของเส้นใยนั้นเกิดขึ้นจากตัวของเส้นใยเอง มิได้เกิดจากการใส่สารอื่นเข้าไปเป็นตัวประสานให้เส้นใยแต่ละเส้นเชื่อมต่อกัน

กระดาษในความหมายของการใช้งาน คือ วัสดุสำหรับใช้เขียน ใช้พิมพ์ ใช้ทำภาชนะบรรจุ และห่อของต่างๆ รวมทั้งใช้ในการทำความสะอาดและดูดซับ ตลอดจนใช้ในงานพิเศษต่างๆ

เส้นใยของพืช คือ เซลล์ประเภทที่สร้างความแข็งแรงให้แก่ลำต้น ส่วนใหญ่มักทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและอาหารให้แก่พืช โดยเส้นใยจะมีลักษณะเป็นเซลล์ขนาดเล็ก เป็นแท่งยาวและเรียว ซึ่งสามารถแยกย่อยออกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ด้วยกระบวนการผลิตเยื่อ (pulping) โดยผลผลิตสุดท้ายของกระบวนการผลิตเยื่อคือ เยื่อกระดาษ (paper pulp หรือ pulp) นั่นเอง

การผลิตกระดาษ (papermaking) คือ การนำเยื่อกระดาษไปผสมน้ำให้มีความเจือจางของน้ำเยื่อที่เหมาะสม กวนให้เยื่อกระดาษกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แล้วนำเยื่อกระดาษมาทำให้เป็นแผ่นได้โดยการเอาน้ำออกผ่านตะแกรงลวด เยื่อจะจับตัวและตกทับกันเป็นชั้นๆ สุดท้ายเมื่อกระดาษแห้งตัวเส้นใยจะเกิดแรงยึดระหว่างกันขึ้น เกิดเป็นแผ่นกระดาษขึ้นมา

2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ทำเยื่อและกระดาษ

ปัจจุบัน กระดาษไม่ได้มีเพียงเส้นใยจากเซลลูโลสเท่านั้น แต่ยังมีการใส่สารเติมแต่งอื่นๆ เพื่อเพิ่มสมบัติต่างๆ ให้กับกระดาษอีกด้วย ดังนั้น วัตถุดิบที่ใช้ทำกระดาษสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

2.1.1.1 วัตถุดิบที่เป็นเส้นใย (fibrous raw material) ได้แก่ เส้นใยจากเนื้อไม้ชนิดต่างๆ เช่น ไม้เนื้อแข็ง (hardwood) ซึ่งมีลักษณะเส้นใยสั้น ได้จากพืชตระกูลไม้ผลัดใบ และไม้เนื้ออ่อน (softwood) ซึ่งมีลักษณะเส้นใยยาว ได้มาจากพืชตระกูลสน เป็นต้น [1]

2.1.1.2 วัตถุดิบที่ไม่ใช่เส้นใย (non-fibrous raw material) ได้แก่ สารเคมีต่างๆ เช่น สารเติมเต็ม (filler) สารกันซึม (sizing agent) สารเพิ่มความแข็งแรงกระดาษ (dry strength agents) สารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อกระดาษเปียก (wet strength agents) สารให้สี (dyes and coloring agents) เป็นต้น [1]

การเลือกวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตกระดาษในระดับอุตสาหกรรม จะต้องคำนึงถึง

1. ต้นทุนและปริมาณผลผลิตที่ได้จะต้องเหมาะสม
2. แหล่งและการจัดหาให้ได้ปริมาณเพียงพอ วัสดุที่มีการเก็บเกี่ยวตามฤดูกาลย่อมเป็นอุปสรรคในการสำรองปริมาณไว้ใช้ในการผลิตตลอดทั้งปี
3. คุณภาพของวัตถุดิบต้องมีความสม่ำเสมอ
4. ค่าใช้จ่ายในการเก็บรวบรวม การขนส่งและการลำเลียง (transportation and handling) ควรพิจารณาวัตถุดิบประเภทที่มีความสะดวกและประหยัดในการขนส่ง เช่น น้ำหนักเบาปานกลาง ไม่เบามากเกินไป และไม่อยู่ในแหล่งทุรกันดาร เป็นต้น
5. ค่าใช้จ่ายในการแปรรูปจากวัตถุดิบเป็นกระดาษจะต้องมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุด
6. การเก็บรักษา (storage) ควรพิจารณาถึงเนื้อที่ในการเก็บวัตถุดิบ วิธีการเก็บที่ปลอดภัยจากอัคคีภัยและรักษาคุณภาพวัตถุดิบไว้ได้คงที่

2.1.2 แหล่งที่มาของเส้นใยที่ใช้ในการผลิตกระดาษ

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษส่วนใหญ่จะได้มาจากเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืช ทั้งที่เป็นไม้ยืนต้นและไม้ล้มลุก รวมถึงเส้นใยจากฝ้าย (cotton) ปอ ป่าน และพืชชนิดอื่นๆ เช่น กล้วย ผักตบชวา สับปะรด เป็นต้น โดยส่วนใหญ่เส้นใยที่นำมาใช้ในการผลิตเยื่อและกระดาษมักได้มาจากส่วนของลำต้น (stem) ใบ (leaf) หรือแม้แต่ผล (fruit) ซึ่งสามารถแบ่งเส้นใยที่ได้จากพืชออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

2.1.2.1 เส้นใยที่ได้มาจากเนื้อไม้ (wood fiber)

เป็นเส้นใยที่ได้มาจากเนื้อไม้ (wood) ของพืชเมล็ดเปลือยในกลุ่มของสน (conifers) และเนื้อไม้ของพืชใบเลี้ยงคู่ ซึ่งไม้ยืนต้นทุกชนิดสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษได้ เส้นใยประเภทนี้ได้มาจากป่าธรรมชาติและบางชนิดก็สามารถปลูกเป็นสวนป่าเพื่อใช้ในการผลิตเยื่อโดยเฉพาะ โดยไม้ยืนต้นที่นำมาใช้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ

2.1.2.1.1 ไม้เนื้ออ่อน (softwood) เป็นไม้ที่มีลักษณะใบเหมือนรูปเข็ม เขียวตลอดทั้งปี เป็นไม้ที่ไม่ผลัดใบ มีมากในแถบประเทศเขตหนาว โดยมีเซลล์จำพวกเทรคีด (tracheids) ทำหน้าที่เป็นท่อลำเลียงน้ำภายในลำต้น ความยาวเฉลี่ยของเส้นใยประมาณ 2.5-7.0 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยประมาณ 15-80 ไมโครเมตร ตัวอย่างไม้ชนิดนี้ ได้แก่ ไม้สนสองใบ ไม้สนสามใบ เป็นต้น [2] มักนำมาใช้ผลิตกระดาษที่ต้องการความแข็งแรงสูง แต่ผิวของกระดาษที่ได้จะไม่เรียบ เนื้อกระดาษไม่สม่ำเสมอ เส้นใยจะจับกันเป็นก้อนๆ

2.1.2.1.2 ไม้เนื้อแข็ง (hardwood) เป็นไม้ใบกว้าง ผลัดใบในฤดูใบไม้ร่วง เป็นไม้เนื้อแข็ง โดยมีเซลล์จำพวกลิบริฟอร์ม (libriform) ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่ลำต้น และจะมีเซลล์จำพวกเวสเซล (vessel) ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีขนาดใหญ่ กว้าง และผนังบางแทรกอยู่โดยทั่วไป ทำหน้าที่เป็นท่อลำเลียงน้ำในลำต้น ความยาวเฉลี่ยของเส้นใยประมาณ 0.2-1.3 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยประมาณ 20-300 ไมโครเมตร ตัวอย่างไม้ชนิดนี้ ได้แก่ ไม้เมืองร้อนเกือบทุกชนิด สำหรับไม้เนื้อแข็งเมืองหนาว เช่น เมเปิล (maple) โอ๊ค (oak) และ เบิร์ช (birch) เป็นต้น [2] มักนำเส้นใยที่ได้จากไม้จำพวกนี้มาใช้ทำกระดาษที่ต้องความเรียบและเนื้อสม่ำเสมอ ไม่จำเป็นต้องแข็งแรงนัก เช่น กระดาษพิมพ์เขียน เป็นต้น

การเรียกประเภทของไม้ว่าไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง มิได้แบ่งแยกตามความแข็งของเนื้อไม้อย่างเด่นชัด ไม้เนื้อแข็งมีความหนาแน่นและความแข็งของเนื้อไม้ต่างกันเป็นช่วงกว้างมาก บางชนิดก็มีเนื้ออ่อนและความหนาแน่นของเนื้อไม้เท่ากับไม้เนื้ออ่อน [2]

2.1.2.2 เส้นใยที่ไม่ได้มาจากเนื้อไม้ (non-wood fiber)

เป็นแหล่งวัตถุดิบเส้นใยสำคัญของประเทศที่กำลังพัฒนาทั้งหลาย และประเทศที่พัฒนาแล้วที่ขาดแหล่งป่าไม้สำหรับผลิตเยื่อกระดาษ พืชล้มลุกและพืชปลูกหมุนเวียนเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตเยื่อสำหรับป้อนการผลิตกระดาษชนิดพิเศษ (special paper) พืชเหล่านี้หลายชนิดสามารถผลิตกระดาษได้ดีและเท่าเทียมกับเยื่อจากไม้เนื้อแข็ง ซึ่งโดยทั่วไปจะมี 3 แหล่งใหญ่ คือ

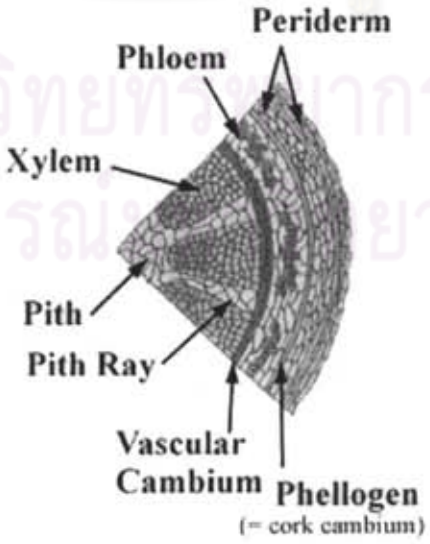
2.1.2.2.1 ของเหลือทางการเกษตร (agricultural waste) ได้แก่ ฟางข้าว และกากอ้อย เป็นต้น เป็นแหล่งวัตถุดิบประเภทเส้นใยที่มีปริมาณมาก

2.1.2.2.2 พืชล้มลุกที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ได้แก่ วัตถุดิบประเภทหญ้า (grasses) วัสดุเส้นใยประเภทนี้จะรวมไม้ไผ่ไว้ด้วย หญ้าที่ใช้กันในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ได้แก่หญ้าขจรจบ และไผ่ เป็นต้น

2.1.2.2.3 พืชเส้นใย (bast fiber plants) เป็นพืชล้มลุกที่ลำต้นประกอบด้วยเปลือกที่มีเส้นใยยาว ได้แก่ ลินิน ป่าน ปอกระเจา และปอแก้ว เป็นต้น ลักษณะเนื้อไม้เป็นประเภทเส้นใยสั้นที่อยู่ในส่วนแกนกลางของลำต้น เส้นใยประเภทนี้เมื่อผ่านกระบวนการต้มเยื่อมักจะแยกตัวออกในแนวแกนของเส้นใย นอกจากนั้นยังมีฝ้าย (cotton หรือ linter) ทั้งที่เป็นใยฝ้ายและเมล็ดฝ้ายติดปุย ซึ่งจัดเป็นวัตถุดิบประเภทใยยาว มีปริมาณแอลฟาเซลลูโลสสูง ใช้ผลิตเยื่อชนิดพิเศษ เพราะให้คุณภาพของเยื่อที่ค่อนข้างสูง

2.1.3 **โครงสร้างทางกายภาพของไม้** (wood physical structure)

ลำต้นและกิ่งก้านของต้นไม้ เจริญเติบโตขึ้นโดยการแบ่งตัวของเนื้อเยื่อซึ่งประกอบด้วยกลุ่มเซลล์ที่เรียกว่า แคมเบียม (cambium) ซึ่งอยู่ถัดจากเปลือก แคมเบียมจะมีการแบ่งตัวผลิตเซลล์ขึ้นใหม่อยู่ตลอดฤดูกาลเจริญเติบโต โดยเซลล์ที่เจริญเข้าด้านในกลายเป็นเนื้อไม้ ส่วนเซลล์ที่เจริญออกมาด้านนอกจะเจริญต่อไปเป็นเปลือกไม้ เนื้อไม้หรือไม้ (wood) ประกอบด้วยเซลล์ชนิดต่างๆ ซึ่งมีขนาดแตกต่างกันทั้งรูปร่างลักษณะตลอดจนความหนาของผนังเซลล์ ส่วนใหญ่เนื้อไม้ประกอบด้วยกลุ่มเซลล์ที่มีรูปร่างยาว แคบ กลวง ทำหน้าที่เกี่ยวกับการลำเลียงน้ำ สารอนินทรีย์และวัตถุดิบ ซึ่งเป็นสารละลายรวมทั้งแร่ธาตุต่างๆ จากรากขึ้นไปสู่ส่วนบนของลำต้น เนื้อเยื่อลำเลียงนี้เรียกว่า ไซเลม (xylem) โดยมักจะอยู่คู่กับโฟลเอม (pholem) ซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงอาหาร (ในรูปของน้ำผสมน้ำตาล) เสมอ โดยมีวาสคิวลาร์แคมเบียม (vascular cambium) ทำหน้าที่แบ่งตัวสร้างเนื้อเยื่อโฟลเอมและไซเลมให้เพิ่มมากขึ้น เพื่อการเจริญเติบโตของลำต้น ซึ่งจะอยู่ระหว่างโฟลเอมกับไซเลม [2, 3] ดังแสดงในภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 โครงสร้างของเนื้อไม้ [3]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เส้นใยที่นำมาใช้ในการผลิตกระดาษจะอยู่ในส่วนของเนื้อไม้ (wood) หรือไซเลม [2]

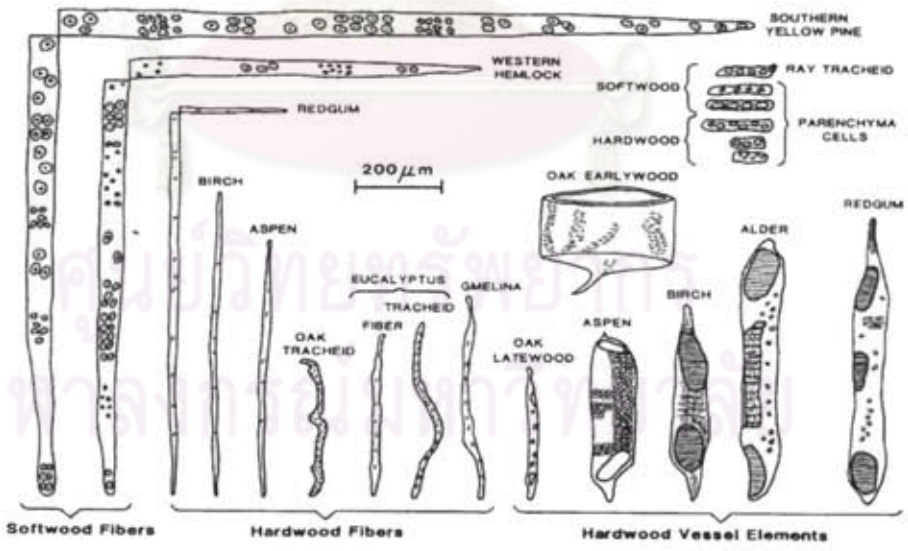
เซลล์ในเนื้อไม้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

2.1.3.1 เซลล์ในไม้เนื้ออ่อน (softwood xylem)

ในไม้เนื้ออ่อน ไซเลม ประกอบด้วยเซลล์เทรคีด (tracheid) หรือเส้นใยเป็นหลัก ประมาณร้อยละ 90-95 ของปริมาตรของเนื้อไม้ ทำหน้าที่ทั้งลำเลียงน้ำและเสริมโครงสร้างของลำต้นให้แข็งแรง นอกจากนั้นยังมีเรย์เซลล์ ประมาณร้อยละ 5-10 ซึ่งเป็นเซลล์ลำเลียงน้ำ (ray tracheids) และลำเลียงอาหาร (ray parenchyma) ในแนวตัวขวางของต้นไม้ และมีเรซินคะแนล (resin canals) ซึ่งเป็นโพรงเชื่อมระหว่างแนวตั้งและแนวนอนของลำต้น เพื่อลำเลียงเรซิน [2, 4, 5]

2.1.3.2 เซลล์ในไม้เนื้อแข็ง (hardwood xylem)

ในไม้เนื้อแข็ง จะพบเซลล์ไซเลมหลายชนิดมากกว่าในไม้เนื้ออ่อน ได้แก่ เซลล์เวสเซล (vessel member หรือ vessel element) เซลล์ไฟเบอร์ (fiber) และเซลล์พาเรนไคมา (parenchyma cell) [2, 5, 6] ดังแสดงในภาพที่ 2-2 ซึ่งเป็นเซลล์หลักที่พบได้ทั่วไปในไม้เนื้อแข็ง ส่วนเทรคีดนั้นอาจพบได้ในไม้เนื้อแข็งบางชนิด และพบได้ในปริมาณไม่มากนัก



ภาพที่ 2-2 ตัวอย่างชนิดของเซลล์ของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง [5, 6]

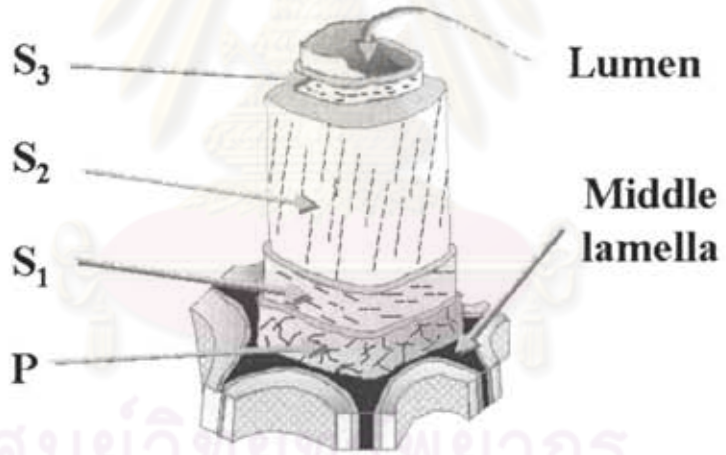
สำหรับเซลล์ของพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ ในกรณีของลำต้น (stalk) นั้น มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับเซลล์ของพืชที่มีเนื้อไม้ แต่ต่างกันที่พืชที่ไม่มีเนื้อไม้จะมีความหลากหลายของเซลล์มากกว่า คือ ในพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ชนิดเดียว อาจมีทั้งเซลล์พาเรนไคมา เซลล์เทรคีดหรือเวสเซล แต่มักพบเซลล์พาเรนไคมาหรือเซลล์ที่มีขนาดเล็กและสั้น อยู่ในปริมาณที่มากกว่าเซลล์ชนิดอื่นๆ

2.1.4 **โครงสร้างของเส้นใย** (fiber structure)

โครงสร้างของเส้นใย อาจแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้นหลักๆ ดังนี้

2.1.4.1 ชั้นมิดเดิลลาเมลลา (middle lamella)

เป็นบริเวณรอยต่อระหว่างเส้นใย ประกอบด้วยลิกนิน (lignin) ทำหน้าที่เหมือนกาวหรือตัวประสานยึดเส้นใยแต่ละเส้นเข้าไว้ด้วยกัน มีขนาดบางมากและมองไม่เห็นด้วยกล้องจุลทรรศน์ทั่วไป [2, 5, 6] ดังแสดงในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 โครงสร้างของเส้นใย [5, 7]

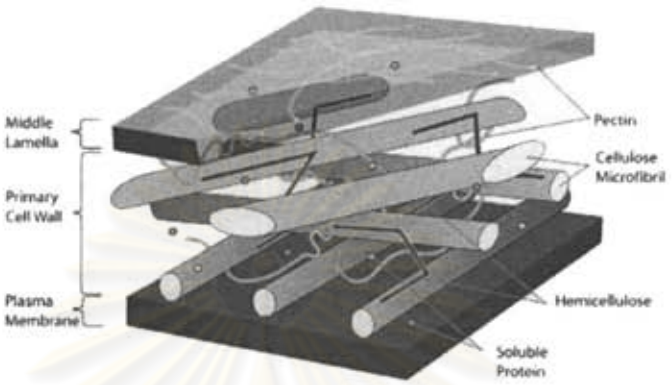
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.4.2 ผนังของเส้นใย (cell wall) ประกอบด้วยชั้นย่อยๆ หลายชั้น ดังนี้

2.1.4.2.1 ผนังเส้นใยชั้นแรกหรือผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall)

เป็นผนังเซลล์ชั้นแรกที่เซลล์สร้างขึ้นตั้งแต่ระยะที่กำลังเติบโตจนถึงโตเต็มที่ อยู่ด้านนอกสุดของเซลล์ มีผนังเซลล์ที่บางมาก ซึ่งมีความหนาเพียง 0.1-0.2 ไมโครเมตรเท่านั้น ผนัง

เส้นใยชั้นแรกประกอบด้วย เฮมิเซลลูโลสและเพคติน เป็นส่วนใหญ่ [8] และอาจมีเซลลูโลสอยู่บ้างบางส่วน ดังแสดงในภาพที่ 2-4 สำหรับการจะเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อย ที่เรียกว่า ไมโครไฟบริล (microfibril) ในบริเวณนี้ไม่เป็นระเบียบนัก



ภาพที่ 2-4 โครงสร้างระดับโมเลกุลของผนังเซลล์ปฐมภูมิในพืช [8]

2.1.4.2.2 ผนังเส้นใยชั้นที่ 2 หรือผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell wall)

เป็นผนังชั้นในสุด (ถัดเข้าไปจากผนังเซลล์ชั้นแรก) ประกอบด้วยเซลลูโลส ซูเบอริน (suberin) คิวติน (cutin) มีความหนา แข็งแรงและมีการจัดเรียงตัวของไมโครไฟ บริลที่เป็นระเบียบมากกว่าผนังเซลล์ชั้นแรก ตัวอย่างเซลล์ที่มีผนังเซลล์ชั้นนี้คือ ไฟเบอร์ (fiber) เทรคีด (tracheid) และสเคลอเรนไคมา (sclerenchyma) ผนังเซลล์ชั้นนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชั้น ตามทิศทางการเรียงตัวของไมโครไฟบริล [2, 5, 6] ดังแสดงในภาพที่ 2-3 ได้ดังนี้

2.1.4.2.2.1 ชั้น S_1 (outer layer secondary wall) เป็นชั้นนอกสุดของผนังเส้นใยชั้นที่ 2 มีความหนาประมาณ 0.1-0.3 ไมโครเมตร การจัดเรียงตัวของไมโครไฟบริลในชั้นนี้มีลักษณะคล้ายรูปตัว S หรือ Z

2.1.4.2.2.2 ชั้น S_2 (middle layer secondary wall) เป็นชั้นกลางของผนังเส้นใยชั้นที่ 2 เป็นชั้นที่มีความหนามากที่สุด ประมาณ 1-5 ไมโครเมตร คิดเป็นร้อยละ 80-90 ของเส้นใยทั้งหมด โดยลักษณะการจัดเรียงตัวของไมโครไฟบริลในชั้นนี้เป็นไปในแนวเดียวกัน ทำให้เส้นใยในบริเวณนี้มีความแข็งแรงมากกว่าผนังเส้นใยชั้นอื่นๆ

2.1.4.2.2.3 ชั้น S_3 (inner layer secondary wall) เป็นชั้นในสุดของผนังเส้นใยชั้นที่ 2 เป็นชั้นที่บางที่สุด ประมาณ 0.1 ไมโครเมตร หรืออาจไม่มีเลยก็เป็นได้ มีการเรียงตัวของไมโครไฟบริลคล้ายกับผนังเส้นใยชั้น S_1

การที่ผนังเส้นใยแต่ละชั้นมีการเรียงตัวของไมโครไฟบริลที่ไม่เหมือนกัน จะส่งผลต่อสมบัติของเส้นใยเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผนังเส้นใยชั้น S_2

2.1.4.3 ลูเมน (lumen)

เป็นท่อกลวงที่อยู่ใจกลางของเส้นใย อยู่ถัดจากผนังเส้นใยชั้นที่ 2 เข้าไป ทำหน้าที่ส่งผ่านสารเคมี น้ำและอาหารระหว่างเส้นใย ดังแสดงในภาพที่ 2-3

2.1.5 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ (chemical composition of wood)

องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ แบ่งเป็น 3 ชนิดหลักๆ คือ

2.1.5.1 คาร์โบไฮเดรต (carbohydrates)

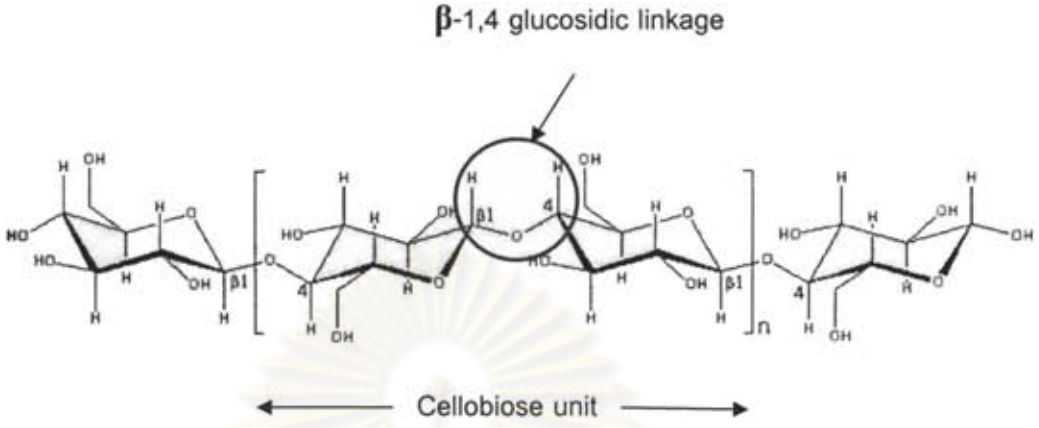
คาร์โบไฮเดรต ประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลย่อยๆ หลายชนิด เช่น กลูโคส (glucose) แมนโนส (mannose) หรือไซโลส (xylose) มาต่อกันเป็นสายยาว จนกลายเป็นสายโซ่พอลิแซคคาไรด์ (polysaccharides) โดยจะพบพอลิแซคคาไรด์ ประมาณร้อยละ 60 ถึง 80 ของเนื้อไม้ทั้งหมด [4, 5, 9, 10] ซึ่งองค์ประกอบหลักของพอลิแซคคาไรด์ในเนื้อไม้ สามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

2.1.5.1.1 เซลลูโลส (cellulose)

เป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดประมาณร้อยละ 40-45 ในเนื้อไม้ [10] เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซคคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคส (glucose subunits, $C_6H_{10}O_6$) ประมาณ 1,000-10,000 โมเลกุล [5] โดยคุณสมบัติของเซลลูโลสนั้นจะขึ้นอยู่กับความยาวของสายโซ่เซลลูโลส (degree of polymerization, DP) ซึ่งเซลลูโลสในชิ้นไม้จะมีความยาวประมาณ 3,500 หน่วย ส่วนในเยื่อกระดาษประมาณ 300-1,700 หน่วย [5, 12]

สำหรับหน่วยย่อยพื้นฐาน (basic subunit) ของเซลลูโลส คือ เซลโลไบโอส (cellobiose) จะประกอบด้วยกลูโคส 2 โมเลกุลเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า-(1-4) ไกลโคซิดิก (β-1,4 glucosidic) โดยโมเลกุลของกลูโคสจะเชื่อมต่อกันที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 ของหน่วย

กลูโคสโมเลกุลหนึ่งกับคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสโมเลกุลถัดไป [4, 5, 9, 10, 11,12] ดังแสดงในภาพที่ 2-5



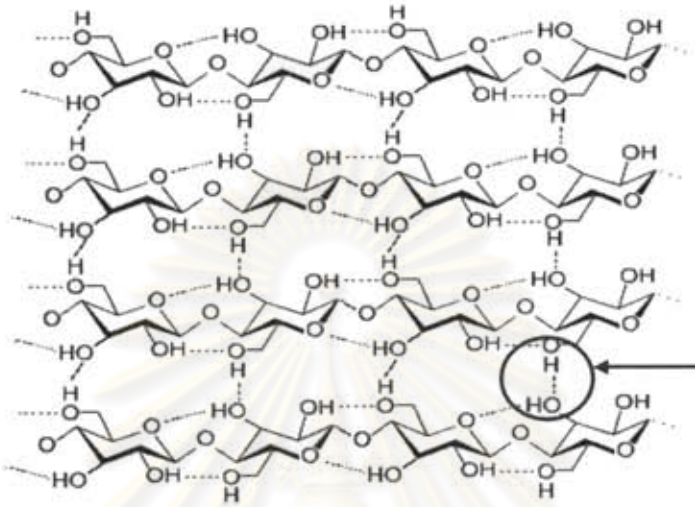
ภาพที่ 2-5 โครงสร้างของเซลลูโลส [5, 9]

สำหรับลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่เซลลูโลสแต่ละเส้นจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในโมเลกุล (intramolecular) และระหว่างโมเลกุล (intermolecular) ซึ่งจะเชื่อมต่อระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group, -OH) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 กับออกซิเจนที่อยู่ในวงแหวนในโมเลกุลของกลูโคสที่อยู่ถัดไป และเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่เซลลูโลสที่ขนานกันที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 6 กับออกซิเจนที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลของกลูโคสในอีกสายโซ่หนึ่งของเซลลูโลส [12] ดังแสดงในภาพที่ 2-6 ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้เส้นใย สามารถสร้างพันธะด้วยกันเองได้ดี ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) จึงสูงขึ้น

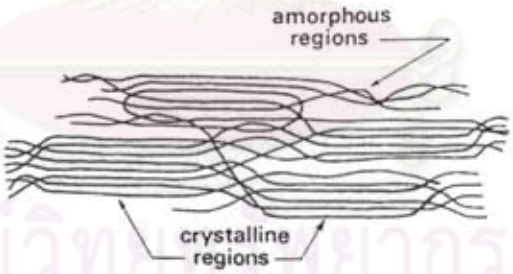
จากภาพที่ 2-6 จะเห็นว่าแต่ละสายโซ่ของเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่มากถึง 3 หมู่ จึงทำให้เซลลูโลสมีความชอบน้ำ (hydrophilic) แต่ละลายในน้ำได้ยากเช่นกัน เนื่องจากผลของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลและแรงดึงดูดภายในโมเลกุลนั้นมีมาก อีกทั้งยังเกิดแรงแวนเดอร์วาลล์ (Van der Waal's forces) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของหมู่ที่มีขั้วเกิดขึ้นอีกด้วย [12, 13, 14, 15] นั่นคือ โมเลกุลของเซลลูโลสมีความเสถียรมาก อย่างไรก็ตามเซลลูโลสสามารถถูกทำลายได้ด้วยกรดแก่ หรือโดยการย่อยของเอนไซม์เซลลูเลส (cellulase)

เซลลูโลสประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ บริเวณที่เรียกว่า ส่วนผลึก (crystalline region) ซึ่งโมเลกุลจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น เป็นระเบียบ มีความหนาแน่นสูง จึงเป็นส่วนที่ทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรงสูง แข็งไม่เปราะง่าย สามารถต้านทานต่อตัวทำละลายหรือสารเคมี ส่วนอีกบริเวณเรียกว่า ส่วนอสัณฐาน (amorphous region) เป็นบริเวณที่มีการจัดเรียง

ตัวอย่างหลวมๆ และมีความหนาแน่นต่ำ มีความสามารถในการรับน้ำและความชื้นได้ดี ทำให้บริเวณนี้ไม่ค่อยแข็งแรง มีความยืดหยุ่น สามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีได้ง่าย และมีความเหนียวที่ค่อนข้างสูง [5] ดังแสดงในภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-6 ลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่เซลลูโลสแต่ละเส้น ด้วยการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุล [12, 13]

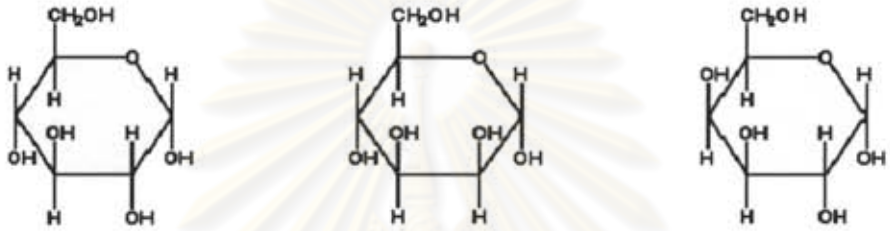


ภาพที่ 2-7 บริเวณส่วนที่เป็นผลึก (ส่วนที่เป็นระเบียบ) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (ไม่เป็นระเบียบ) ของเซลลูโลส [5]

2.1.5.1.2 **เฮมิเซลลูโลส** (hemicellulose)

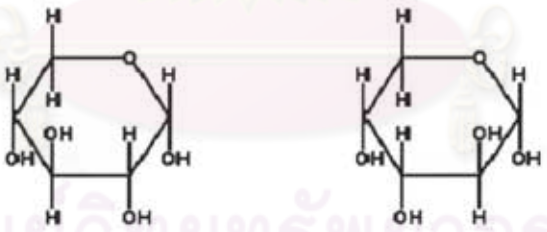
เฮมิเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบที่ซับซ้อนของพอลิแซคคาไรด์ที่อยู่ในเนื้อไม้ พบมากเป็นอันดับ 2 รองจากเซลลูโลส มีอยู่ประมาณร้อยละ 20-30 ในเนื้อไม้ สูตรทางเคมีของเฮมิ

เซลลูโลสคือ $(C_6H_{12}O_5)_{2n}$ เป็นสารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ละลายน้ำ สามารถละลายได้ดีในกรดอ่อนและด่างอ่อน เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์เช่นเดียวกับเซลลูโลส คือประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน แต่ต่างกันที่เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด ได้แก่ กลูโคส (glucose) กาแลกโตส (galactose) แมนโนส (mannose) ซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม (C6) ดังแสดงในภาพที่ 2-8 และไซโลส (xylose) กับอะราบิโนส (arabinose) ซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม (C5) [4, 5, 9, 10, 11,12] ดังแสดงในภาพที่ 2-9



(ก) กลูโคส (ข) แมนโนส (ค) กาแลกโตส

ภาพที่ 2-8 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีคาร์บอน 6 อะตอมเป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส [5]



(ก) ไซโลส (ข) อะราบิโนส

ภาพที่ 2-9 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีคาร์บอน 5 อะตอมเป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส [5]

เฮมิเซลลูโลสส่วนมากจะประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ของน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม โดยจะมีน้ำตาลไซโลสอยู่ในปริมาณที่มากที่สุด แต่ละโมเลกุลจะเชื่อมกันด้วยพันธะ β-1,4 glucosidic bond และมีกิ่งที่ตำแหน่ง (1,2), (1,3) และ (1,6) โดยเฉลี่ยแล้วเฮมิเซลลูโลสจะมีค่า

DP ประมาณ 100-200 หน่วย ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าและสามารถสลายตัวได้ง่ายกว่าเซลลูโลส [4, 5, 9, 10]

ตัวอย่างเฮมิเซลลูโลส ที่ประกอบด้วยน้ำตาลมากกว่า 1 ชนิด เช่น กาแลกโตกลูโคแมนแนน (galactoglucomanmannan) กลูโคแมนแนน (glucomannan) อะราบิโนกลูโคโครโนไซแลน (arabinoglucoronoxylan) กลูโคโรโนไซแลน (glucoronoxylan) อะราบิโนไซแลน (arabinoxylan) เป็นต้น [5, 9, 10]

การที่เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด การจัดเรียงตัวของโมเลกุลน้ำตาลในสายโซ่พอลิแซคคาไรด์จึงมีความไม่เป็นระเบียบสูง ทำให้เฮมิเซลลูโลสสามารถละลายในกรดและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ได้ง่ายกว่าเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตเยื่อและสมบัติของเยื่อ เป็นอย่างยิ่ง คือ หากเยื่อมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูงจะทำให้กระดาษมีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อแรงดันทะลุ (burst strength) และความทนทานต่อการพับ (folding endurance) สูง เนื่องจากสายโซ่ของเฮมิเซลลูโลสมีความเป็นกิ่งก้าน (branching chain) สูง ทำให้การยึดเหนี่ยวกันระหว่างสายโซ่ทำได้มากขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มความสามารถในการดูดซึมน้ำของเยื่อ ทำให้ง่ายต่อการเตรียมน้ำเยื่อ (stock preparation) นอกจากนั้นเส้นใยจะมีความยืดหยุ่น (flexibility) สูง ตัดปัญหาค่าสภาพการระบายได้ของเยื่อ (freeness) ลดลง เมื่อบดเยื่อเป็นเวลานาน และเฮมิเซลลูโลสยังสามารถช่วยให้เส้นใยพองตัวได้ง่ายเมื่อเปียกน้ำ ทำให้พื้นที่ในการสัมผัสกับน้ำของเส้นใยเพิ่มขึ้น เส้นใยประสานตัวกันได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อกระดาษแห้ง มักมีรอยย่นเกิดขึ้น เพราะเส้นใยหดตัวได้เช่นกัน [9, 10]

ส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดของเส้นใย ได้แก่ เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส รวมเรียกว่าโฮโลเซลลูโลส (holocellulose) [10, 15, 16, 17] ซึ่งโฮโลเซลลูโลสสามารถแบ่งได้ 3 ชนิด ตามลักษณะการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย ดังนี้

2.1.5.1.3 แอลฟาเซลลูโลส (α–cellulose) เป็นส่วนที่เรียกว่า เซลลูโลสที่แท้จริง (true-cellulose) ไม่สามารถละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้องได้ หากมีปริมาณมากคุณภาพของกระดาษจะดีมากขึ้นตามไปด้วย ในการผลิตเยื่อไม่สามารถแยกแอลฟาเซลลูโลสออกมาได้อย่างบริสุทธิ์ร้อยละ 100 แต่มักจะมีน้ำตาลแมนแนน (mannan) และกลูโคแมนแนน (glucomannan) ปะปนมาด้วยเสมอ เพราะทั้งสองตัวนี้ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 เช่นกัน โดยแอลฟาเซลลูโลส

ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสตั้งแต่ 200 หน่วยขึ้นไป ซึ่งแอลฟาเซลลูโลสมีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ [17]

2.1.5.1.4 เบต้าเซลลูโลส (β–cellulose) เป็นเซลลูโลสที่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้อง และจะตกตะกอนในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด เบต้าเซลลูโลสจึงแยกได้จากส่วนที่ตกตะกอนในด่าง ค่า DP ของเบต้าเซลลูโลสจะอยู่ระหว่าง 100-200 หน่วย [17]

2.1.5.1.5 แกมม่าเซลลูโลส (γ–cellulose) เป็นเซลลูโลสซึ่งละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้อง และละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรด แต่จะตกตะกอนได้โดยใช้แอลกอฮอล์ ดังนั้น แกมม่าเซลลูโลสจึงแยกได้จากส่วนที่เป็นน้ำในสารละลายด่าง ค่า DP ของแกมม่าเซลลูโลสจะต่ำกว่า 10 หน่วย [17]

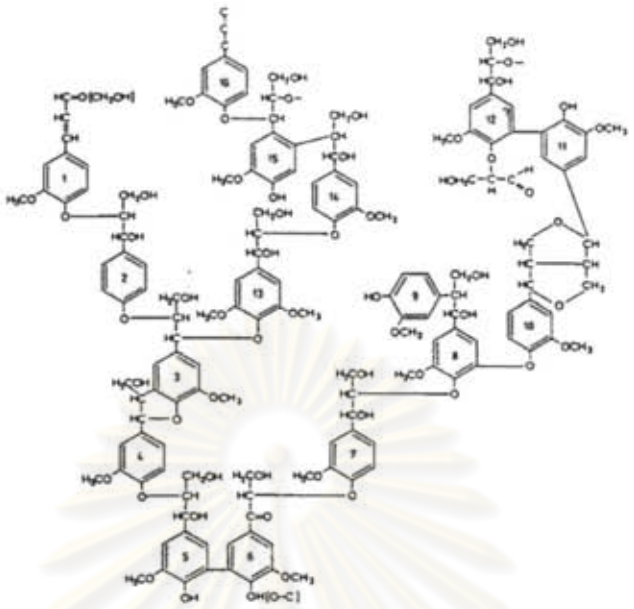
ถ้าหากปริมาณ α, β และ γ -cellulose ในเนื้อไม้เปอร์เซ็นต์สูง จะทำให้ผลผลิตสูงทั้งเยื่อฟอกและไม่ฟอก [15, 16, 17]

2.1.5.2 ลิกนิน (lignin)

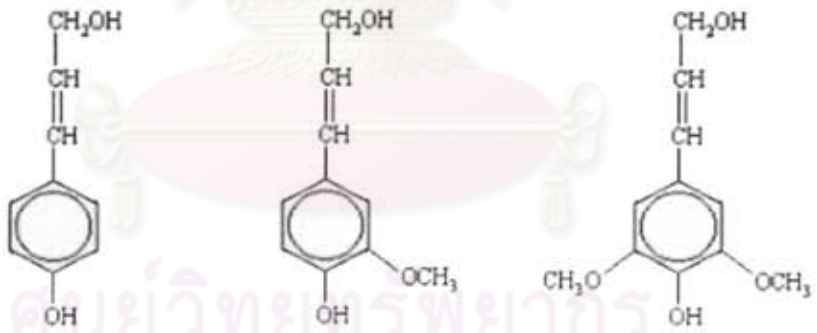
ลิกนิน เป็นกลุ่มของสารในธรรมชาติที่ซับซ้อนที่สุดและมีโครงสร้างที่ไม่แน่นอนนัก ในเนื้อไม้มีลิกนินประมาณร้อยละ 20-35 ของเนื้อไม้ทั้งหมด [5, 10] ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบลิกนินและอยู่รวมกันอย่างหนาแน่นระหว่างและภายในของชั้นนอกของเส้นใย อีกทั้งยังอยู่รวมกับเซลลูโลส พบมากในส่วนของผนังเซลล์ชั้นที่ 2 (S_2) และที่บริเวณมิดเดิลลาเมลลา (middle lamella)

ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยของเฟนิลโพรเพน (phenyl propane) ซึ่งเป็นสารอะโรมาติก มาเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้าง 3 มิติ [4, 5, 10] ดังแสดงในภาพที่ 2-10

ภาพที่ 2-11 แสดงตัวอย่างองค์ประกอบหลัก (หน่วยที่ซ้ำกัน) ของลิกนิน ซึ่งได้แก่ p-hydroxyphenyl เช่น p-coumaryl alcohol, guaiacyl เช่น coniferyl alcohol และ syringyl เช่น sinapyl alcohol เป็นต้น [4, 5, 9, 10, 18]



ภาพที่ 2-10 โครงสร้างของลิกนิน (native lignin) [5]



(ก) p-coumaryl alcohol (ข) coniferyl alcohol (ค) sinapyl alcohol

ภาพที่ 2-11 องค์ประกอบหลักของลิกนิน [5]

ลิกนินเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่ช่วยในการเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษ เนื่องจากไม่มีส่วนในการสร้างพันธะระหว่างเส้นใย และหากมีปริมาณสูงจะทำให้เยื่อมีคุณภาพต่ำลง เพราะลิกนินเป็นตัวที่ทำให้กระดาษเหลือง เนื่องจากลิกนินมีองค์ประกอบทางเคมีที่เรียกว่า หมู่โครโม

ฟอร์ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับความร้อน แสงและความชื้นได้ง่าย ทำให้กระดาษเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลือง ในกระบวนการผลิตกระดาษลิกนินจะถูกกำจัดออกได้ด้วยการไฮโดรไลซิสด้วยกรดหรือด่างในขั้นตอนการต้มเยื่อ หรือกำจัดออกในขั้นตอนการฟอกเยื่อด้วยสารเคมีต่างๆ เช่น คลอรีน (chlorine) เป็นต้น

2.1.5.3 สารแทรก (extractives)

สารแทรก เป็นสารที่มีความหลากหลาย แทรกอยู่เป็นองค์ประกอบของเนื้อไม้ พบในปริมาณเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของพืชนั้นๆ ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย แต่สารเหล่านี้เป็นแหล่งของผลพลอยได้จากไม้หลายตัว ทำให้ไม้ทนต่อแมลงและการผุเน่า ทนต่อการต้มเนื้อเยื่อและการฟอกในบางขณะ รวมทั้งยังเป็นตัวทำให้เนื้อไม้มีกลิ่น รสและสีเกิดขึ้นอีกด้วย สารแทรกเป็นสารที่ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างในเนื้อไม้ ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารมวลโมเลกุลต่ำและอยู่ภายนอกเซลล์ มักพบสารแทรกในส่วนของพืชทั่วไป ได้แก่ ลำต้น กิ่ง ราก เปลือกไม้และก้านใบ สารแทรกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ สารแทรกที่ละลายน้ำได้กับสารแทรกที่ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์

สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษ สารแทรกนั้นทำให้การแทรกซึมของสารเคมีเข้าไปในเนื้อไม้ในขณะทำการต้มเยื่อทำได้น้อยลง สิ้นเปลืองสารเคมีในการต้มเยื่อมากขึ้น อีกทั้งยังมีปัญหาเกี่ยวกับการเกิดฟองเมื่อล้างเยื่อ ซึ่งหากมีสารแทรกตกค้างอยู่ในเยื่อมากมักทำให้เยื่อดูดซึมน้ำได้น้อยลง ส่งผลถึงการเตรียมเยื่อในการทำแผ่นกระดาษทำได้ยากขึ้น เนื่องจากเยื่อไม่เปียกน้ำ ต้องใช้เวลาในการบดมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดสารแทรกออกในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ

2.1.6 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้ในประเทศไทย

ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษในประเทศไทย มีการใช้วัตถุดิบหลายชนิด ซึ่งแบ่งเป็นประเภทหลัก ๆ คือวัตถุดิบประเภทไม้และวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ สำหรับวัตถุดิบที่เป็นไม้ คือ ยูคาลิปตัส ส่วนวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ คือ ชานอ้อย ปอแก้ว ฟางข้าว และไม้ไผ่ เยื่อกระดาษที่ผลิตได้ในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นเยื่อที่มีเส้นใยสั้น คล้ายกับเยื่อจากไม้เนื้อแข็ง ยกเว้นเฉพาะเยื่อกระดาษสาที่ผลิตจากต้นปอสาเท่านั้นที่จัดเป็นเยื่อที่มีเส้นใยยาว ในด้านปริมาณการใช้วัตถุดิบแต่ละชนิดพบว่า มีการใช้ยูคาลิปตัสมากที่สุด รองลงมาได้แก่ ไม้ไผ่ ชานอ้อย ฟางข้าว และปอสา ตามลำดับ [19]

2.1.6.1 วัตถุดิบประเภทไม้ (wood)

ยูคาลิปตัส (eucalyptus) จัดว่าเป็นไม้จำพวกไม้เนื้อแข็ง (hardwood) ที่โตเร็ว สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้โดยใช้เวลาปลูกเพียง 4-5 ปี และได้ผลผลิตเฉลี่ย 10-15 ตัน/ไร่ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น พาร์ทิเคิลบอร์ด ปาร์เก้ ถ่าน เยื่อกระดาษและเยื่อเรยอง ชิ้นไม้ยูคาลิปตัสสับเมื่อนำไปทำเป็นเยื่อกระดาษจะได้เยื่อคุณภาพดี เมื่อนำไปทำเยื่อโดยกรรมวิธีเคมีจะได้เยื่อน้ำหนักโดยเฉลี่ย 3.75 ตันต่อไม้หนึ่งไร่ ซึ่งถือว่าให้ผลผลิตในปริมาณที่สูง เหมาะสำหรับผลิตเป็นเยื่อกระดาษและยังสามารถส่งออกไปในรูปไม้สับไปต่างประเทศได้อีกด้วย

เส้นใยของยูคาลิปตัสจะมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 1 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 18 ไมโครเมตร [20] ส่วนองค์ประกอบทางเคมีจะมีเซลลูโลสประมาณร้อยละ 47 ลิกนินประมาณร้อยละ 20 เฮมิเซลลูโลสประมาณร้อยละ 23 สารแทรกที่ละลายในน้ำร้อน (hot water soluble) ร้อยละ 2.4 สารแทรกที่ละลายในแอลกอฮอล์และเบนซิน (alcohol benzene soluble) ร้อยละ 1.5 และเถ้า (ash) ร้อยละ 0.4 ที่เหลือเป็นส่วนประกอบของสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์อื่น ๆ [21] ดังแสดงในตารางที่ 2-2

2.1.6.2 วัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ (non-wood)

วัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ที่ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้ในประเทศไทย มีดังนี้

2.1.6.2.1 ชานอ้อย (bagasse)

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ปลูกอ้อยมากประเทศหนึ่ง ชานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากการหีบอ้อยของโรงงานน้ำตาล ซึ่งจะใช้ชานอ้อยส่วนหนึ่งเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำของโรงงาน ดังนั้นปริมาณของชานอ้อยที่จะนำมาทำเป็นวัตถุดิบเส้นใยในการผลิตเยื่อกระดาษจึงเป็นส่วนที่เหลือจากการใช้ของโรงงานน้ำตาล และปริมาณชานอ้อยที่เหลือจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผลิตน้ำตาลทรายขาวกับน้ำตาลทรายดิบ ซึ่งโดยปกติแล้วน้ำตาลทรายขาวจะใช้ไอน้ำมากกว่าน้ำตาลทรายดิบ และขึ้นกับประสิทธิภาพของเครื่องผลิตไอน้ำของโรงงานน้ำตาลและราคาพลังงานอื่นๆ ที่ใช้ทดแทนกันได้ ชานอ้อยมีเส้นใยยาวประมาณ 0.8-2.8 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ10-34 ไมโครเมตร และมีส่วนประกอบทางเคมีดังนี้ คือ เซลลูโลสร้อยละ 26-39 ลิกนินร้อยละ 19-22 สารแทรกที่ละลายในน้ำร้อนร้อยละ 3-11 สารแทรกที่ละลายในแอลกอฮอล์และเบนซินร้อยละ 3-11 และเถ้าร้อยละ 1-5 ดังแสดงในตารางที่ 2-1 และ 2-2 ตามลำดับ

2.1.6.2.2 ฟางข้าว (rice straw)

ลักษณะเส้นใยของฟางข้าวมีความยาวประมาณ 0.7-3.5 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-15 ไมโครเมตร สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากฟางข้าวจะประกอบด้วยเซลลูโลสร้อยละ 28-41 ลิกนินร้อยละ 10-17 สารแทรกที่ละลายในน้ำร้อน ร้อยละ 13-17 สารแทรกที่ละลายในแอลกอฮอล์และเบนซินร้อยละ 1-7 และเถ้าร้อยละ 14-22 ดังแสดงในตารางที่ 2-1 และ 2-2 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบขนาด (dimension) ของเส้นใยฟางข้าว จะพบว่าค่อนข้างสั้นกว่าเส้นใยชนิดอื่น ในกรณีที่ใช้ฟางข้าวในกระบวนการผลิตเยื่อแบบเคมีหรือแบบกึ่งเคมี จะให้ผลผลิตเยื่ออยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 30-45

สำหรับประเทศไทย การใช้ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบผลิตเยื่อกระดาษนั้นนับว่ายังน้อยมากโดยมีปริมาณเพียงปีละ 20,000 ตันเท่านั้น โรงงานที่ผลิตเยื่อกระดาษจากฟางข้าวมีเพียงแห่งเดียว คือ โรงงานกระดาษบางปะอิน แต่ในปัจจุบันโรงงานได้หยุดการผลิตเยื่อกระดาษจากฟางข้าวแล้ว ด้วยสาเหตุที่ปริมาณและคุณภาพของวัตถุดิบไม่สม่ำเสมอและโรงงานไม่สามารถควบคุมได้

2.1.6.2.3 ปอแก้ว (kenaf)

ลักษณะเส้นใยของปอแก้วมีความยาวประมาณ 0.6–6.0 มิลลิเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 14–40 ไมโครเมตร สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากปอแก้วจะประกอบด้วยเซลลูโลสร้อยละ 64 ลิกนินร้อยละ 11–21% สารแทรกที่ละลายในน้ำร้อนร้อยละ 1.1 สารแทรกที่ละลายในแอลกอฮอล์และเบนซินร้อยละ 1.2 และเถ้า ร้อยละ 0.6 ดังแสดงในตารางที่ 2-1 และ 2-2 ตามลำดับ โดยปอแก้วนั้นจัดว่าเป็นวัตถุดิบที่สามารถนำมาผลิตเป็นเยื่อกระดาษที่มีคุณภาพดี แต่ปอแก้วมีราคาสูงและปริมาณไม่เพียงพอกับความต้องการ เนื่องจากพื้นที่การปลูกปอแก้วมีแนวโน้มลดลง ส่งผลให้ปริมาณการผลิตลดลง นอกจากนี้ผลผลิตบางส่วนยังถูกนำไปทำกระสอบ พรมปูพื้น ฉนวนไฟฟ้าและสิ่งประดิษฐ์ เป็นต้น

2.1.6.2.4 ไม้ไผ่ (bamboo)

ลักษณะเส้นใยของไม้ไผ่มีความยาวประมาณ 1.5-4.4 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าเป็นเส้นใยที่ค่อนข้างยาวเมื่อเทียบกับเส้นใยจากพืชที่ไม่ใช่ไม้อื่นๆ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยประมาณ 7-27 ไมโครเมตร และมีส่วนประกอบของเซลลูโลสร้อยละ 35-47 ลิกนินร้อยละ 22-30 สารแทรกที่ละลายในน้ำร้อนร้อยละ 16-21 สารแทรกที่ละลายในแอลกอฮอล์และเบนซินร้อยละ 3-6 และเถ้า

ร้อยละ 1-5 ดังแสดงในตารางที่ 2-1 และ 2-2 ตามลำดับ โดยไม้ไผ่มีมากทางภาคตะวันตก ภาคเหนือและภาคตะวันออกของประเทศไทย ปัญหาของไม้ไผ่ คือ ปริมาณสำรองของป่าไผ่ตามธรรมชาติเทียบกับอัตราการตัดและการขึ้นทดแทนไม่สมดุลกัน

2.1.6.2.5 ปอสา (mulberry)

เป็นพืชเส้นใยชนิดหนึ่งที่ให้เส้นใยจากเปลือกของลำต้น อยู่ในตระกูล Moraceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Broussnetia papyrifera Vent.* จัดเป็นไม้ยืนต้น มักเกิดขึ้นตามพื้นดินที่ชุ่มชื้น สำหรับประเทศไทยจะพบปอสาขึ้นกระจัดกระจายอยู่ทั่วประเทศ ปอสาเป็นพืชพื้นเมืองของไทย เป็นไม้พุ่มยืนต้นขนาดกลาง ลำต้นมีลักษณะกลม สีน้ำตาลคล้ำ พันธุ์ที่พบในประเทศไทยมี 2 ชนิด คือ ชนิดต้นม่วง จะมีกิ่งและก้านใบเป็นสีม่วงหรือสีน้ำตาลคล้ำ และชนิดสีเขียว จะมีกิ่งและก้านใบเป็นสีเขียว แต่ที่พบโดยทั่วๆ ไป คือ ชนิดต้นม่วง ขนาดของลำต้นปอสาที่พอจะตัดเอาเปลือกมาใช้ทำกระดาษได้จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 7 เซนติเมตร ขึ้นไป จนถึง 20 เซนติเมตร มีอายุ 3-5 ปี ต้นสาที่มีอายุอ่อนกว่า 3 ปี จะมีปริมาณเปลือกน้อย เยื่อปอสาประกอบด้วยเส้นใย 2 ชนิด คือ เส้นใยสั้นเป็นเยื่อที่มาจากเนื้อไม้และเส้นใยยาวมาจากส่วนเปลือก ซึ่งมีความยาวเฉลี่ยประมาณ 8 มิลลิเมตร แต่มีปริมาณน้อยเพียงร้อยละ 7 ของน้ำหนักทั้งต้น

ตารางที่ 2-1 ขนาดเส้นใยของวัตถุดิบชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษ [20]

ชนิดของวัตถุดิบ	ความยาวของเส้นใย (มิลลิเมตร)		เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (ไมโครเมตร)	
	ต่ำ - สูง	เฉลี่ย	ต่ำ - สูง	เฉลี่ย
ฟางข้าว	0.7 – 3.5	1.5	5 -15	9
ปอแก้ว	0.6 – 6.0	1.6	14 - 40	25
ชานอ้อย	0.8 – 2.8	1.6	10 – 34	20
ไม้ไผ่	1.5 – 4.4	2.3	7 – 27	18
ยูคาลิปตัส	0.6 – 1.4	1.0	14 - 20	18

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2-2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยวัตถุดิบต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษในประเทศไทย [21]

ชนิดวัตถุดิบ	เซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)	Hot water Soluble (%)	Alcohol benzene soluble (%)	เถ้า (%)
ฟางข้าว	28 – 41	10 – 17	13 -17	1 – 7	14 – 22
ปอแก้ว	64	11 – 21	1.1	1.2	0.6
ชานอ้อย	26 – 39	19 – 22	3 – 11	3 – 11	1 – 5
ไม้ไผ่	35 – 47	22 – 30	16 – 21	3 – 6	1 – 5
ยูคาลิปตัส	47	20	2.4	1.5	0.4

2.1.7 **กระบวนการผลิตเยื่อ** (pulping process)

เป็นกระบวนการที่พยายามแยกเส้นใยจากชิ้นไม้ออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ (individual fiber) โดยอาจมีการเอาลิกนินหรือไม่เอาลิกนินออกจากชิ้นไม้ก็ได้ เพื่อนำเยื่อที่ผลิตได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ โดยกระบวนการผลิตเยื่อเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณสมบัติของเยื่อ ถึงแม้ว่าวัตถุดิบชนิดเดียวกันแต่การผลิตเยื่อแตกต่างกัน คุณสมบัติของเยื่อที่ได้ก็จะแตกต่างกัน และถึงแม้ว่าจะใช้กระบวนการผลิตเดียวกัน แต่ถ้าสภาวะที่ใช้ในการผลิตแตกต่างกันก็จะส่งผลให้คุณสมบัติของเยื่อแตกต่างกันไปด้วย

กระบวนการผลิตเยื่อนั้นแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

2.1.7.1 กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกล (mechanical pulping process)

เป็นกระบวนการที่ใช้แรงกลในการแยกเส้นใยออกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ การผลิตเยื่อเชิงกลนั้นไม่ได้มีการเอาลิกนินออก แต่จะทำให้ลิกนินอ่อนตัวลงเท่านั้น ดังนั้นกระดาษที่ผลิตด้วยกระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลเมื่อทิ้งไว้เป็นระยะเวลานานจะทำให้กลับมาเหลืองได้อีก เนื่องจากลิกนินทำปฏิกิริยากับแสง ความชื้น และความร้อน แล้วทำให้เกิดสีขึ้นได้ [9, 22] การผลิตเยื่อเชิงกลจะให้ผลผลิตของเยื่อ (pulp yield) ค่อนข้างสูง ประมาณร้อยละ 80-95 [23] แต่คุณภาพของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อประเภทนี้จะต่ำ โดยทั่วไปจะนำไปผลิตกระดาษหนังสือพิมพ์ ซึ่งไม่มีความจำเป็นต้องเก็บไว้นาน ปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลเพื่อให้คุณภาพของเยื่อสูงขึ้น โดยใช้สารเคมี หรือความร้อน หรือทั้งสารเคมีและความร้อนเข้าช่วย ทำให้ลิกนินอ่อนตัวลง

ง่ายต่อการที่จะทำให้เส้นใยแยกออกจากกัน ลดพลังงานที่ใช้ในการบดเยื่อลง โดยได้เยื่อที่มีคุณภาพสูงขึ้น [22]

หากจะแยกย่อยกระบวนการผลิตเยื่อแบบเชิงกล จะได้ดังนี้ คือ

2.1.7.1.1 Stone Ground Wood (SGW) เป็นการนำท่อนไม้ที่ลอกเปลือกออกแล้วทั้งท่อนมาแยกเส้นใยด้วยหินบด (stone grinder)

2.1.7.1.2 Refine Mechanical Pulping (RMP) เป็นการใช้ท่อนซุงที่ลอกเปลือกแล้วมาสับให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วแยกเส้นใยออกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ด้วยจานบด (disc refiner)

2.1.7.1.3 Thermo Mechanical Pulping (TMP) เป็นกระบวนการที่มีการนำชิ้นไม้เล็กๆ มาผ่านไอน้ำในสภาวะความดันสูง เพื่อให้ลิกนินในชิ้นไม้อ่อนตัว ก่อนที่จะนำไปเข้าจานบด

2.1.7.2 กระบวนการผลิตเยื่อกึ่งเคมี (semichemical pulping process)

เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานกล สารเคมี และพลังงานความร้อนร่วมกัน โดยที่สารเคมีและความร้อนจะช่วยให้ลิกนินในไม้อ่อนตัวลงและละลายออกบางส่วน แล้วนำมาบดให้เส้นใยแยกออกจากกัน ซึ่งบางชนิดอาจจะไม่ใช้ความร้อน เยื่อจากกระบวนการนี้เรียกว่า เยื่อกึ่งเคมี (semichemical pulp) [9, 22] ถ้าสารเคมีที่ใช้เป็น Sodium Sulfite ในสภาวะที่เป็นกลางก็จะเรียกกระบวนการผลิตเยื่อนั้นว่า Neutral Sulfite Semichemical Pulping (NSSC)

2.1.7.3 กระบวนการผลิตเยื่อเคมี (chemical pulping process)

เป็นกระบวนการที่มีการใช้สารเคมีและความร้อนเพื่อละลายลิกนินที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างเส้นใยให้ละลายออก ทำให้เส้นใยแยกออกจากกันได้ง่าย โดยเยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีความแข็งแรงค่อนข้างสูง มีความขาวสว่างและมีโอกาสที่จะเหลือง (yellowing) ต่ำกว่าเยื่อที่ได้จากการผลิตเยื่อเชิงกล [9, 22, 24] แต่ผลผลิตของเยื่อที่ได้จากการผลิตเยื่อเคมีค่อนข้างต่ำ ประมาณร้อยละ 40-50 [24] กระบวนการผลิตเยื่อแบบนี้สามารถแยกตามชนิดของสารเคมีที่ใช้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้คือ

2.1.7.3.1 กระบวนการโซดา (soda process) เป็นกระบวนการต้มเยื่อที่เริ่มใช้เป็นแบบแรก โดยสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) เพียงอย่างเดียวในการละลายลิกนินออกจากเนื้อไม้

2.1.7.3.2 กระบวนการซัลไฟต์ (sulfite process) เป็นการต้มเยื่อระบบกรด โดยสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับลิกนินคือ กรดซัลฟิวรัส (sulfurous acid, H_2SO_3) กับไบซัลไฟต์ไอออน (bisulfite ion, HSO_3^-) ซึ่งสารเคมีนี้จะเข้าไปเปลี่ยนลิกนินให้อยู่ในรูปเกลือของกรดลิกโนซัลโฟนิก (lignosulfonic acid) ที่สามารถละลายน้ำได้และสามารถละลายออกมาพร้อมกับสารเคมีที่ใช้ต้มเยื่อ

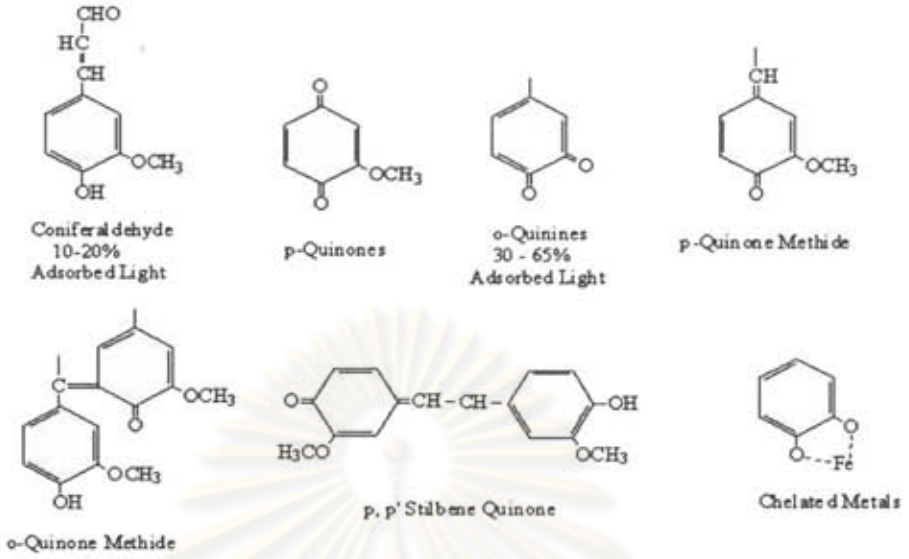
2.1.7.3.3 กระบวนการคราฟต์ (kraft process) เป็นกระบวนการต้มเยื่อระบบด่าง และเป็นกระบวนการที่ดัดแปลงมาจากกระบวนการโซดา โดยสารเคมีที่ใช้คือ โซเดียมซัลไฟด์ (sodium sulfide, Na_2S) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการทำปฏิกิริยาให้ลิกนินแตกตัว [5, 9, 24]

2.1.8 กระบวนการฟอกเยื่อ (bleaching process)

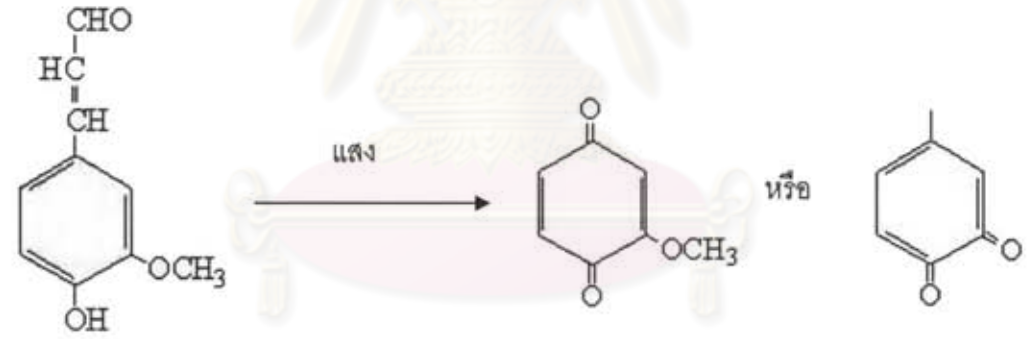
เยื่อกระดาษที่ได้จากกระบวนการผลิตเยื่อมักมีความขาวสว่างที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้นจึงต้องมีการฟอกเยื่อเพื่อช่วยในการปรับปรุงความขาวสว่างของเยื่อให้สูงขึ้น โดยที่ไม่ทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดต่ำลง และต้องการให้ความขาวสว่างของเส้นใยคงสภาพอยู่ได้โดยที่ไม่มีการกลับสี (brightness reversion) เมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน และที่สำคัญคือต้นทุนของการฟอกเยื่อจะต้องต่ำที่สุด นั่นคือต้องพยายามทำให้มีการสูญเสียเยื่อไปในการฟอกเยื่อน้อยที่สุด และควรเลือกสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อให้ได้คุณภาพที่ต้องการโดยที่ใช้สารเคมีต่อเยื่อที่ฟอกต่ำ นอกจากนั้นการฟอกเยื่อควรที่จะกำจัดส่วนประกอบอื่นๆ เช่น เรซิน กรดไขมัน (fatty acid) และสารแทรกต่างๆ ออกจากเยื่อให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

ในธรรมชาติเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจะมีสีขาว การที่เห็นว่าเยื่อก่อนฟอกมีสีน้ำตาลนั้นมีสาเหตุมาจากหมู่โครโมฟอร์ (chromophore) ที่อยู่ในโครงสร้างของลิกนิน [9, 10] ดังแสดงในภาพที่ 2-12

หมู่โครโมฟอร์นี้สามารถทำปฏิกิริยากับแสงและความชื้นได้ ทำให้หมู่ฟีนอลิก (phenolic group) ในโครงสร้างทางเคมีของลิกนินเปลี่ยนเป็นสารเสมือนควินิน (quinone-like substance) ซึ่งมีความสามารถในการดูดกลืนแสงได้ ทำให้เยื่อมีสีขึ้นมานั่นเอง [22] ดังแสดงในภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-12 ตัวอย่างหมู่โครโมฟอร์ที่อยู่ในโครงสร้างของลิกนิน [9]



ภาพที่ 2-13 ปฏิกิริยาเคมีของหมู่ฟีนอลิกในโครงสร้างทางเคมีของลิกนินที่เปลี่ยนเป็น quinone-like substance [22]

โดยปกติเยื่อก่อนฟอกที่ได้จากกระบวนการผลิตเยื่อเคมีไม่ว่าจะเป็นกระบวนการซัลไฟต์หรือคราฟต์ก็ตาม จะมีลิกนินเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 2-4 จากที่มีอยู่เดิมในเนื้อไม้ สำหรับเยื่อที่ได้จากกระบวนการผลิตเยื่อกึ่งเคมีและเชิงกล จะมีการแยกเอาลิกนินออกเพียงเล็กน้อยหรือไม่ได้เอาออกเลย ดังนั้นเยื่อจากกระบวนการทั้งสองจะมีลิกนินเหลืออยู่ในเยื่อในปริมาณที่ค่อนข้างสูง

การทำเยื่อให้มีความขาวสว่างขึ้นทำได้ 2 วิธี คือ

2.8.1.1 วิธีการแปรรูปลิกนินให้อยู่ในรูปที่ไม่มีสี (lignin bleaching approach)

เป็นวิธีการที่เปลี่ยนโครงสร้างของหมู่โครโมฟอร์ที่อยู่ในส่วนของลิกนิน เพื่อทำให้เยื่อไม่เกิดสีเหลืองขึ้นเมื่อเยื่อสัมผัสกับแสงแดดหรือความชื้น เนื่องจากวิธีนี้ไม่ได้ทำให้ลิกนินถูกกำจัดออกไปหลังจากการฟอกเยื่อ ดังนั้นเมื่อเวลานานเข้าเยื่อจะกลับมามีสีเหลืองอีกครั้งหนึ่ง วิธีนี้มักใช้กับเยื่อที่ให้ผลผลิตสูง เช่น เยื่อเชิงกลหรือเยื่อกึ่งเคมี เพราะเป็นกระบวนการที่ไม่มีการเอาลิกนินออก ทำให้ผลผลิตของเยื่อหลังฟอกไม่ลดลงมากนัก นิยมใช้เป็นการฟอกเยื่อแบบขั้นตอนเดียว (single-stage bleaching) เยื่อที่ฟอกด้วยกระบวนการนี้จะให้ความความสว่างของเยื่อปานกลาง โดยสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อวิธีนี้คือ โซเดียมเปอร์ออกไซด์ (sodium peroxide, Na_2O_2) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H_2O_2) โซเดียมไดไทโอไนต์ (sodium dithionite, $Na_2S_2O_4$) เป็นต้น [25, 26]

2.1.8.2 วิธีการกำจัดลิกนิน (lignin removal approach)

เป็นปฏิกิริยาที่มีการเอาลิกนินออกจากเยื่อ (delignification) ด้วยสารเคมี จึงเป็นวิธีที่ให้ผลค่อนข้างถาวร คือจะทำให้ได้เยื่อมีความขาวสว่างค่อนข้างสูงและไม่ทำให้เยื่อที่ผ่านการฟอกเยื่อแล้วกลับมามีสีเหลืองอีกเมื่อสัมผัสกับความชื้นและแสงแดด มักใช้กับเยื่อที่ให้ผลผลิตต่ำ เช่น เยื่อเคมี เพราะลิกนินถูกกำจัดออกไป นิยมใช้กับการฟอกเยื่อแบบหลายขั้นตอน (multiple-stage bleaching) สำหรับสารเคมีที่ใช้คือ ออกซิเจน (oxygen, O_2) คลอรีน (chlorine, Cl_2) คลอรีนไดออกไซด์ (chlorine dioxide, ClO_2) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H_2O_2) โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (sodium hypochlorite, NaOCl) โอโซน (ozone, O_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น [25, 26]

2.1.9 **การฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์** (hydrogen peroxide bleaching, H_2O_2)

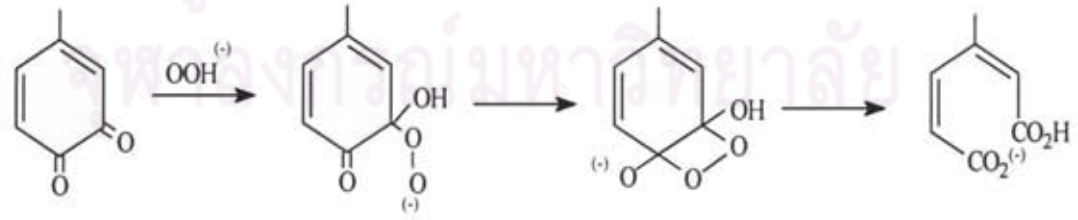
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถใช้ในการฟอกเยื่อได้ทั้งเยื่อเชิงกลและเยื่อเคมี โดยในเยื่อเชิงกลจะทำการฟอกที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจะช่วยเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อให้ดีขึ้นได้ อีกทั้งยังช่วยลดการสูญเสียผลผลิตของเยื่อให้น้อยลงได้ สำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการฟอกเยื่อเคมี คือ 70-80 องศาเซลเซียส เนื่องจากสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาการฟอกเยื่อ

(bleaching reaction) เพื่อเอาลิกนินที่อยู่ในชิ้นไม้หรือในเยื่อได้มากขึ้น ส่งผลให้ความขาวสว่างของเยื่อดีขึ้นได้ โดยความเข้มข้นของเยื่อที่ใช้ในการฟอกเยื่อด้วยวิธีนี้ควรมีค่าประมาณร้อยละ 10-20 และควรทำในสภาวะที่เป็นเบส โดยต้องควบคุมค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ให้คงที่อยู่ที่ 10.5 (ไม่ควรเกิน 11.0) เพราะหากความเป็นกรด-เบสสูงเกินไป จะทำให้ปฏิกิริยาการฟอกเยื่อเกิดได้ไม่ดี เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการสลายตัวเป็นอนุมูลของไฮดรอกซิลเรดิเคิล (hydroxyl radical, $HO^{\cdot}$) และซุปเปอร์ออกไซด์ แอนไอออน เรดิเคิล (superoxide anion radical, $OO^{\cdot-}$) ซึ่ง $HO^{\cdot}$ และ $OO^{\cdot-}$ จะเข้าไปตัดสายโซ่โมเลกุลของพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) ให้สั้นลง ส่งผลทำให้ผลผลิตของเยื่อที่ได้ลดลงด้วยเช่นกัน [9, 22, 25, 26]

อย่างไรก็ตาม ค่าความเป็นกรด-เบสสามารถควบคุมได้โดยการใส่บัฟเฟอร์ เช่น โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate, Na_2SiO_3) หรือแมกนีเซียมซัลเฟต (magnesium sulfate, $MgSO_4$) ลงไปในกระบวนการฟอกเยื่อ นอกจากนี้ควรมีการใส่สารจับโลหะหนัก (chelant) เช่น Diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA) และ Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) เพื่อช่วยลดการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปฏิกิริยาการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเกิดได้ 2 ปฏิกิริยาด้วยกัน โดยที่จะเกิดขนานกันไป ดังนี้

1. การฟอกเยื่อด้วยเปอร์ไฮดรอกซิล ไอออน (perhydroxyl ion, HOO^{-}) โดยตรง ซึ่งจะทำให้โครงสร้างของหมู่โครโมฟอร์เปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปที่ไม่สามารถทำให้เยื่อมีสีขึ้นได้อีก ดังแสดงในภาพที่ 2-14
2. ปฏิกิริยาที่เกิดจากฟรีแรดิเคิล (free radical species) ที่เข้าทำปฏิกิริยาในการกำจัดหมู่โครโมฟอร์ (chromophore elimination)



ภาพที่ 2-14 ปฏิกิริยาการกำจัดลิกนิน

2.1.10 **ข้าวโพด** (corn)

ข้าวโพด เป็นพืชไร่ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทย อีกทั้งยังปลูกได้ทั่วไปในทุกภาคของประเทศ นอกจากนั้นข้าวโพดยังเป็นธัญพืชที่สำคัญมากชนิดหนึ่งของโลก ผลผลิตประมาณครึ่งหนึ่งใช้เป็นอาหารมนุษย์ นอกนั้นใช้เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์และอื่นๆ ข้าวโพดมีถิ่นกำเนิดแถบบริเวณประเทศตะวันตกและเป็นที่นิยมบริโภคกันแถบทวีปอเมริกากลางและใต้ สำหรับประเทศไทย ข้าวโพดเป็นที่รู้จักและนิยมบริโภคในรูปอาหารว่างระหว่างมื้ออาหารมาช้านานแล้ว และยังมีการปลูกข้าวโพดเพื่อการเลี้ยงสัตว์เพิ่มขึ้นมาก

2.1.10.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ทั่วไป

ข้าวโพดเป็นพืชที่มีใบหยาบจัดอยู่ในตระกูลเดียวกับหญ้า [27, 28] ลักษณะทั่วไปมักมีความแตกต่างกันระหว่างพันธุ์และบริเวณเพาะปลูก

2.1.10.1.1 ลำต้น (culm หรือ stalk) ประกอบด้วยข้อและปล้อง โดยปล้องที่อยู่ในดินและใกล้ผิวดินมีขนาดสั้นและจะค่อยๆ ยาวขึ้นไปทางด้านปลาย ปล้องเหนือพื้นดินมีจำนวนประมาณ 8-20 ปล้อง บริเวณข้อมีเนื้อเยื่อเจริญ จุดกำเนิดราก ตาและรอยกาบใบ ลำต้นตั้งตรงแข็งแรง มีความสูงตั้งแต่ 30 เซนติเมตร จนถึง 7.5 เมตร แล้วแต่ชนิดของพันธุ์ ซึ่งโดยเฉลี่ยจะมีความสูงประมาณ 2.2 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น 2.5-5.0 เซนติเมตร (0.5-2.0 นิ้ว) เมื่อผ่าลำต้นดูตามขวางจะเห็นเปลือกอยู่เป็นวงรอบนอกประกอบด้วยเซลล์ที่กั้นน้ำได้ ส่วนเนื้อภายในเปลือกมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ เป็นเซลล์สีขาว เป็นเซลล์ท่อน้ำและท่ออาหาร (vascular bundles) ทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมอาหารจากใบก่อนจะส่งต่อไปยังเมล็ด [27, 28, 29]

ข้าวโพดเป็นพืชที่แตกกอน้อยหรือไม่แตกกอเลย ขึ้นกับพันธุ์และความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยปกติข้าวโพดหัวแข็ง (flint) หรือข้าวโพดหวานมักแตกกอได้ง่ายกว่าข้าวโพดหัวบุบ (dent) ต้นที่แตกกอมาใหม่นั้นอาจจะมีจำนวนถึง 3-4 ต้น โดยจะมีลักษณะไม่แตกต่างจากต้นแม่ และทุกต้นอาจให้ฝักที่สมบูรณ์ได้ด้วย [30]

2.1.10.1.2 ใบ ประกอบด้วยกาบใบและแผ่นใบ กาบใบจะหุ้มลำต้น ส่วนแผ่นใบจะกางออก ใบจะเป็นเส้นตรงปลายแหลม ยาวประมาณ 30-100 เซนติเมตร เส้นกลางของใบจะเห็นได้ชัด ตรงขอบใบมีขนอ่อนๆ

2.1.10.1.3 ดอก ข้าวโพดจะมีดอกทั้งตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในต้นเดียวกัน แต่อยู่คนละตำแหน่ง ช่อดอกตัวผู้อยู่ส่วนยอดของลำต้น ช่อดอกตัวเมียอยู่ต่ำลงมา โดยอยู่ระหว่างกาบของใบและลำต้น ฝักเกิดจากดอกตัวเมียที่เจริญเติบโตแล้ว ฝักอ่อนจะมีสีเขียว พอแก่เป็นสีนวล

2.1.10.1.4 ผลและเมล็ด เป็นแหล่งสะสมแป้งและสารอาหารต่างๆ ของข้าวโพด เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เป็นต้น

2.1.10.1.5 ราก มีด้วยกันสองส่วนคือ รากส่วนที่มีการเจริญเติบโตในระยะเวลาสั้นๆ ขณะข้าวโพดเป็นต้นกล้า และจะตายเมื่อต้นข้าวโพดโตขึ้น ส่วนรากอีกส่วนหนึ่งจะเป็นรากที่เจริญเติบโตอยู่ตลอดชีวิตของข้าวโพด สามารถเจริญแผ่กระจายรอบลำต้น มีรัศมีประมาณ 1 เมตร และหยั่งลึกลงไปในดินได้ 2.1-2.4 เมตร

2.1.10.2 การจำแนกชนิดของข้าวโพด

ข้าวโพดที่ปลูกในประเทศไทยมีหลายชนิดด้วยกัน จำแนกออกได้ดังนี้

2.1.10.2.1 จำแนกตามลักษณะทางพฤกษศาสตร์และสมบัติของแป้งในเมล็ด ซึ่งภายในเมล็ดประกอบด้วยแป้ง 2 ชนิด คือ แป้งแข็ง (hard starch) และแป้งอ่อน (soft starch) [31] สามารถแบ่งได้เป็น 6 ชนิดหลักๆ ดังนี้

2.1.10.2.1.1 ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์หรือข้าวโพดไร่ (field corn) จะมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea Mays* L. จัดอยู่ในวงศ์ Gramineae มีชื่อสามัญว่า maize หรือ corn และอาจรู้จักกันในชื่ออื่น เช่น ข้าวสาลี (สำหรับภาคเหนือ) คง (สำหรับจังหวัดกระบี่) โพด (สำหรับภาคใต้) บือเคส่ะ (สำหรับภาษากระเหรี่ยงและจังหวัดแม่ฮ่องสอน) เป็นต้น

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์หรือข้าวโพดไร่ ที่รู้จักในปัจจุบัน เช่น ข้าวโพดไร่ชนิดหัวบุ๋ม (dent corn) และข้าวโพดไร่ชนิดหัวแข็ง (fint corn) ซึ่งเป็นการเรียกตามลักษณะเมล็ด [31, 32, 33]

ข้าวโพดไร่ชนิดหัวบุ๋มหรือหัวบุบ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Zea *mays indentata* ข้าวโพดชนิดนี้เมื่อเมล็ดแห้งแล้วตรงส่วนหัวบนสุดจะมีรอยบุ๋มลงไป เนื่องจากบริเวณตอนบนเป็นส่วนของแป้งสีขาวชนิดอ่อน ส่วนด้านข้างของเมล็ดเป็นแป้งชนิดแข็ง สีของ

เมล็ดมีตั้งแต่ขาวไปจนถึงเหลืองเนื่องจากมีหลายสายพันธุ์ ข้าวโพดชนิดนี้ให้ผลผลิตสูง แต่มีโปรตีนน้อยกว่าพวกข้าวโพดหัวแข็งและมีปัญหาเรื่องเชื้อราและแมลงทำลายบนฝักและเมล็ด

ข้าวโพดไร่ชนิดหัวแข็ง มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays indurate* ข้าวโพดที่ด้านบนของเมล็ดมีแป้งแข็งเป็นองค์ประกอบ ส่วนแป้งอ่อนจะอยู่ตรงกลางของเมล็ดหรืออาจไม่มีเลย เมื่อเมล็ดแห้งจึงไม่มีรอยยุบด้านบน ข้าวโพดชนิดนี้ส่วนบนสุดของเมล็ดมักมีสีเหลืองจัดและเมื่อแห้งจะแข็งมาก เป็นข้าวโพดที่เหมาะในการทำเป็นอาหารสัตว์ เนื่องจากภายในเมล็ดมีสารที่ทำให้ข้าวโพดมีสีเหลืองจัดเป็นสารให้สีชนิดหนึ่ง

2.1.10.2.1.2 ข้าวโพดเทียนหรือข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays certain* ข้าวโพดที่คนใช้รับประทาน ข้าวโพดชนิดนี้มีลักษณะเมล็ดเหนียวคล้ายขี้ผึ้ง ฝักสดเมื่อต้มแล้วจะมีรสหวานและมีกลิ่นคล้ายข้าวเหนียว โดยในเนื้อแป้งจะประกอบด้วยแป้งพวกอะมิโลเพกทิน (amylopectin) ทั้งหมด ซึ่งต่างจากข้าวโพดชนิดอื่นที่มีแป้งอะมิโลส (amylose) เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย จึงทำให้แป้งค่อนข้างแข็ง ข้าวโพดชนิดนี้จะมีอายุการเจริญเติบโตค่อนข้างสั้น ต้นเล็ก ฝักดกและเปลือกหุ้มเมล็ดบาง สำหรับอายุการเก็บเกี่ยวผลผลิตประมาณ 80-90 วัน

ภาพที่ 2-15 ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว

2.1.10.2.1.3 ข้าวโพดหวาน (sweet corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays saccharata* ข้าวโพดที่คนใช้รับประทานและนิยมปลูกกันอย่างแพร่หลาย เมล็ดมักจะใส

และเหี่ยวเมื่อแก่เต็มที่ เพราะมีน้ำตาลมาก เวลาสุกจะมีรสหวานมากกว่าชนิดอื่น ๆ จึงเรียกข้าวโพดหวาน ข้าวโพดหวานมีอายุการเก็บเกี่ยวเพียง 70 วัน

2.1.10.2.1.4 ข้าวโพดคั่ว (pop corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays everta* ข้าวโพดที่คนใช้รับประทาน เมล็ดค่อนข้างเล็ก แข็ง ปลายแหลมมนสีดีและขนาดแตกต่างกัน ถ้าเมล็ดมีลักษณะแหลมเรียกว่า ข้าวโพดข้าว (rice corn) ถ้าเมล็ดกลมเรียกว่า ข้าวโพดไข่มุก (pearl corn) ข้าวโพดคั่วเป็นข้าวโพดที่มีแป้งในเมล็ดในเปอร์เซ็นต์ที่ค่อนข้างสูงเช่นเดียวกับข้าวโพดไร่ชนิดหัวแข็ง แต่มีขนาดเล็กกว่าเล็กน้อย และเมื่อถูกความร้อนจะเกิดแรงดันภายในเมล็ดทำให้เมล็ดแตกบานออก

2.1.10.2.1.5 ข้าวโพดแป้ง (flour corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า Zer mays *amylocea* ข้าวโพดที่มีองค์ประกอบเป็นแป้งอ่อนเกือบทั้งหมด เมื่อเมล็ดแก่จะไม่ยุบ เมล็ดมีหลายสี เช่น ขาว (ขุ่นๆ หรือปนเหลืองนิดๆ) หรือสีน้ำเงินคล้ำ หรือมีทั้งสีขาวและสีน้ำเงินคล้ำในฝักเดียวกัน เนื่องจากกลายพันธุ์ พวกที่มีเมล็ดสีคล้ำและพวกกลายพันธุ์เรียกว่าข้าวโพดอินเดียนแดง (squaw corn) หรือเรียกอีกชื่อว่าข้าวโพดพันธุ์พื้นเมือง (native corn)

2.1.10.2.1.6 ข้าวโพดป่า (pod corn) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays tunica* มีลักษณะใกล้เคียงข้าวโพดพันธุ์ป่า มีลำต้นและฝักเล็กกว่าข้าวโพดธรรมดา มีขั้วเปลือกหุ้มทุกเมล็ด และยังมีเปลือกหุ้มฝักอีกชั้นหนึ่ง ข้าวโพดชนิดนี้ไม่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจปลูกไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น

นอกจากนั้นอาจแบ่งชนิดของข้าวโพดเป็นข้าวโพดฝักอ่อน (young ear corn) อีกชนิดหนึ่งก็ได้ ซึ่งเป็นการปลูกข้าวโพดเพื่อเก็บฝักอ่อน การปลูกข้าวโพดชนิดนี้ไม่ควรปล่อยให้ไหมยาวเกิน 1 นิ้ว เพราะจะได้ฝักข้าวโพดที่แก่เกินไป ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวเพียง 60-75 วัน เท่านั้น สามารถปลูกได้ตลอดปี นิยมนำมาบรรจุกระป๋องหรือขายเป็นฝักสด

จากข้าวโพดทั้ง 6 ชนิดที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เนื้อที่เพาะปลูกส่วนใหญ่ของประเทศไทยจะใช้ในการปลูกข้าวโพดไร่ชนิดหัวแข็ง ข้าวโพดไร่ชนิดหัวบุบและข้าวโพดหวาน ซึ่งการปลูกข้าวโพดในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นการปลูกข้าวโพดชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ เนื่องจากมีความต้องการของตลาดเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จัดอยู่ในกลุ่มพืชที่ผลิตเพื่อใช้ภายในประเทศ โดยมีผลผลิตร้อยละ 97 ของผลผลิตทั้งประเทศหรือประมาณ 4 ล้านตันต่อปี ซึ่งมีอัตราการขยายตัวร้อยละ 3.73 ต่อปี ในปี 2550 มีพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ประมาณ 5.92 ล้านไร่ ผลผลิตโดยรวมมีค่าประมาณ 3.65 ล้านตัน อย่างไรก็ตาม ความต้องการใช้ข้าวโพด

ภายในประเทศประมาณปีละ 4 ล้านตัน และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ จึงจำเป็นจะต้องขยายการผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ให้เพียงพอต่อความต้องการ [33]

2.1.10.2.2 จำแนกตามวัตถุประสงค์การใช้ประโยชน์ ได้แก่ การปลูกเพื่อเก็บเมล็ดขาย (grain) ปลูกเพื่อเก็บเมล็ดขายเป็นเมล็ดพันธุ์ (seed) ปลูกเพื่อขายเป็นฝักอ่อน ปลูกเพื่อขายเป็นฝักสด และปลูกเพื่อใช้ทำเป็นอาหารหมักสำหรับเลี้ยงสัตว์ [31]

2.1.10.3 ประโยชน์ของข้าวโพด

ข้าวโพดมีประโยชน์อยู่หลายประการ เช่น

2.1.10.3.1 ใช้เป็นอาหารสัตว์ นิยมใช้ผสมในอาหารสำหรับเลี้ยงสัตว์ เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเมล็ดเป็นแป้งและมีโปรตีนอยู่บ้าง ส่วนของข้าวโพดที่นำมาใช้เลี้ยงสัตว์ได้แก่ เมล็ด ซัง ต้นสดและผลพลอยได้อื่นๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมข้าวโพด ได้แก่ เมล็ด เปลือก กากและรำ ดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ที่มีคุณภาพดีและราคาถูก ผลผลิตเมล็ดข้าวโพดประมาณร้อยละ 72 นำไปใช้ในการผลิตอาหารเลี้ยงสัตว์ทั้ง ไก่ หมู เป็ดและโคนม แต่มีบางประเทศที่ปลูกข้าวโพดแล้วตัดข้าวโพดทั้งต้นไปทำหญ้าหมักสำหรับเลี้ยงสัตว์ [31]

2.1.10.3.2 ใช้เป็นอาหารของมนุษย์ คือ เมล็ดข้าวโพดนำมาเป็นอาหาร เช่น การต้มและคั่วรับประทาน

2.1.10.3.3 ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ เมล็ดข้าวโพดสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมด้านอาหารอย่างกว้างขวาง เช่น น้ำมันพืช น้ำตาล แป้ง น้ำเชื่อม น้ำส้ม อาหารกระป๋องและอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น นำมาใช้เป็นส่วนผสมของยารักษาโรค น้ำหอม เครื่องสำอาง น้ำมันใส่ผม เครื่องเคลือบ ยาล้างเล็บ พลาสติก ฟิล์ม เสื้อผ้า แอลกอฮอล์และกระดาษได้ นอกจากนี้ยังมีการผลิตน้ำเชื่อมจากข้าวโพดที่เรียกว่า high fructose corn syrup เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มอย่างกว้างขวางอีกด้วย [31]

2.1.10.4 เทคนิคการปลูกข้าวโพด

2.1.10.4.1 ขั้นตอนการปลูกข้าวโพด มีขั้นตอนดังนี้

2.1.10.4.1.1 ไถดะด้วยรถแทรกเตอร์ หรือแรงงานสัตว์ 1-2 ครั้ง ให้ลึก 8-10 นิ้ว และตากดินไว้ 7-15 วัน

2.1.10.4.1.2 ไถแปร อีก 1-2 ครั้ง โดยไถขวางรอยเดิมของไถดะ

2.1.10.4.1.3 ปรับผิวดินให้เรียบ และเก็บวัชพืชโดยทำการพรวน การคราด

2.1.10.4.1.4 ใช้รถแทรกเตอร์แถกร่อง เพื่อเตรียมปลูกโดยจะใช้แรงคนหรือรถแทรกเตอร์ปลูกเลยก็ได้

2.1.10.4.2 การปลูกและระยะการปลูก

สำหรับข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ใช้ระยะแถวประมาณ 75 เซนติเมตร ระยะระหว่างหลุม 75 เซนติเมตร แล้วหยอดเป็นหลุมๆ ละ 4 เมล็ด กลบดินหนาประมาณ 5 เซนติเมตร ให้แน่นพอประมาณ ควรหยอดเมล็ดข้าวโพดให้ลึก 2.5-3 นิ้ว ใช้เมล็ดพันธุ์ข้าวโพด 3-4 กิโลกรัมต่อไร่ โดยใน 1 ไร่ จะมีต้นข้าวโพดประมาณ 8,500 ต้น [28, 31, 32] ถ้าใช้อัตราและระยะปลูกดังนี้

1. ระยะปลูก 75X25 ซม. หยอด 2 เมล็ดต่อ 1 หลุม ถอนแยกเหลือ 1 ต้นต่อ 1 หลุม
2. ระยะปลูก 75X50 ซม. หยอด 3 เมล็ดต่อ 1 หลุม ถอนแยกเหลือ 2 ต้นต่อ 1 หลุม
3. ระยะปลูก 75X75 ซม. หยอด 4 เมล็ดต่อ 1 หลุม ถอนแยกเหลือ 3 ต้นต่อ 1 หลุม

สำหรับข้าวโพดหวานและข้าวโพดข้าวเหนียว สามารถปลูกให้มีจำนวนต้นต่อไร่ได้มากกว่าข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อีกประมาณร้อยละ 25-50

2.1.10.4.3 ความต้องการน้ำของข้าวโพด

ข้าวโพด เป็นพืชที่ต้องการน้ำตลอดอายุการเจริญเติบโตแต่ความต้องการน้ำจะสูงสุด ในช่วงออกดอกและช่วงระยะต้นของการสร้างเมล็ด ถ้าหากขาดน้ำ จะเกิดสิ่งต่อไปนี้ขึ้น คือ

- ในช่วงระยะการเจริญทางลำต้นและใบ ผลผลิตจะลดลงร้อยละ 25
- ในช่วงระยะออกดอกตัวผู้-ออกไหม-เริ่มสร้างเมล็ด ผลผลิตจะลดลงร้อยละ 50
- ในช่วงระยะหลังการสร้างเมล็ดเสร็จ ผลผลิตจะลดลงร้อยละ 21

2.1.10.5 แหล่งผลิตในประเทศที่สำคัญ

ภาคเหนือ	ได้แก่	เพชรบูรณ์ นครสวรรค์ พิษณุโลก น่าน
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	ได้แก่	นครราชสีมา ศรีสะเกษ ชัยภูมิ
ภาคกลาง	ได้แก่	สระบุรี ลพบุรี
ภาคตะวันตก	ได้แก่	สุพรรณบุรี กาญจนบุรี
ภาคตะวันออก	ได้แก่	สระแก้ว จันทบุรี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.10.6 ฤดูปลูก

การปลูกข้าวโพดสามารถปลูกได้ทั้งต้นฝน คือ ระหว่างเดือนมีนาคม-พฤษภาคม หรือปลายฝน ระหว่างเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม [32] โดยทั่วไปการปลูกต้นฤดูฝนมักจะได้ผลผลิตดีกว่าปลายฤดูฝน

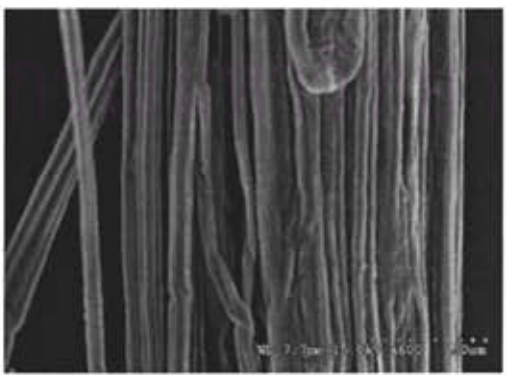
2.1.11 ลักษณะทั่วไป และองค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพด

2.1.11.1 ลักษณะทั่วไปของเส้นใยจากต้นข้าวโพด

ลักษณะทั่วไปของเส้นใยจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (field corn) นั้น มีขนาดความยาวของเส้นใย (fiber length) ใกล้เคียงกับเส้นใยจากไม้เนื้อแข็ง ซึ่งเป็นเยื่อใยสั้น นอกจากนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจากต้นข้าวโพดจะแคบกว่าเส้นใยจากทั้งไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน [34, 35] ดังแสดงในตารางที่ 2-3 ลักษณะที่เรียวยาวของเส้นใยจากต้นข้าวโพด ดังแสดงในภาพที่ 2-16 จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการผลิตเยื่อและกระดาษได้เช่นเดียวกับเส้นใยที่ได้จากพืชที่มีเนื้อไม้ทั่วๆ ไป [36]

ตารางที่ 2-3 ลักษณะทั่วไปของเส้นใยชนิดต่างๆ [34]

ชนิดของเส้นใย	ความยาวเฉลี่ยของเส้นใย (มิลลิเมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (ไมครอน)
เส้นใยจากไม้เนื้ออ่อน	2.7-4.6	32-43
เส้นใยจากไม้เนื้อแข็ง	0.7-1.6	20-40
เส้นใยจากต้นข้าวโพด	1.0-1.5	18-22



ภาพที่ 2-16 ลักษณะของเส้นใยจากต้นข้าวโพด [36]

2.1.11.2 องค์ประกอบทางเคมีของส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด

จากองค์ประกอบทางเคมีของส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด ที่แสดงในตารางที่ 2-4 จะเห็นว่า ส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างๆ กัน

ตารางที่ 2-4 องค์ประกอบทางเคมีของส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด [35]

องค์ประกอบทางเคมี (component)	ต้นข้าวโพดทั้งต้น (whole stalks)	ต้นข้าวโพดที่ปราศจากใบและแกนกลาง (stalks without leaves and pith)	ส่วนตาของต้นข้าวโพด (nodes only)	ใบ (leaves only)	แกนกลางต้นข้าวโพด (pith only)
Cellulose, %	45.5	47.7	41.4	44.2	47.6
Pentosans, %	27.1	26.2	29.0	28.3	26.0
Pentosans in the Cellulose, %	11.0	12.6	13.1	9.4	13.7
Lignin, %	16.7	16.4	19.8	14.6	13.3
Hot water solubility, %	14.9	12.7	14.9	10.6	18.8
1% NaOH solubility, %	47.6	40.2	-	-	-
Alcohol-Benzene solubility, %	7.0	6.6	6.3	2.8	10.9
Ash, %	6.9	6.0	6.2	10.3	5.8
SiO_2 in Ash, %	63.2	39.9	29.4	72.0	24.1

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากต้นข้าวโพดนั้นจะมีเซลลูโลส (cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) ในปริมาณที่ค่อนข้างสูงมาก และมีปริมาณลิกนิน (lignin) ต่ำเมื่อเทียบกับเยื่อจากไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง [34, 36, 37] ดังแสดงในตารางที่ 2-5 ซึ่งการที่ปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากต้นข้าวโพดเป็นเช่นนี้ จึงทำให้ต้นข้าวโพดมีความเหมาะสมที่จะนำมาทำการผลิตเป็นเยื่อเพื่อใช้ในการผลิตกระดาษได้

ตารางที่ 2-5 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากต้นข้าวโพดเปรียบเทียบกับเส้นใยจากไม้เนื้ออ่อนและเส้นใยจากไม้เนื้อแข็ง [34, 36]

ชนิดของเส้นใย	ปริมาณเซลลูโลส (ร้อยละ)	ปริมาณเฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ)	ปริมาณลิกนิน (ร้อยละ)
เส้นใยจากไม้เนื้ออ่อน	40-52	8-12	26-32
เส้นใยจากไม้เนื้อแข็ง	38-50	15-25	18-28
เส้นใยจากต้นข้าวโพด	46-50	27-28	16-17

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม [19] ได้มีการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษที่ผลิตได้ในประเทศไทย พบว่า วัตถุดิบที่ใช้มีทั้งวัตถุดิบประเภทไม้และวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ สำหรับวัตถุดิบที่นิยมใช้ผลิตเยื่อกระดาษในประเทศไทยที่เป็นไม้ คือ ยูคาลิปตัส ส่วนวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ คือ ชานอ้อย ปอแก้ว ฟางข้าว ไม้ไผ่ เยื่อกระดาษที่ผลิตได้ในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นเยื่อใยสั้นถึงเยื่อใยปานกลาง ยกเว้นเฉพาะเยื่อกระดาษสาที่ผลิตจากต้นปอสาเท่านั้นที่จัดเป็นเยื่อใยยาว ในด้านปริมาณการใช้วัตถุดิบแต่ละชนิด พบว่า ในปี 2540 มีการใช้ยูคาลิปตัสมากที่สุด คือประมาณร้อยละ 64.58 ของปริมาณวัตถุดิบทั้งหมด รองลงมา ได้แก่ ไม้ไผ่ ประมาณร้อยละ 28.36 ชานอ้อย ร้อยละ 4.40 ฟางข้าว ร้อยละ 0.76 และปอสา ร้อยละ 0.005 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม จากผลการสำรวจโรงงานผลิตเยื่อกระดาษในประเทศไทยในปัจจุบัน พบว่า ยูคาลิปตัสยังคงเป็นวัตถุดิบที่มีการใช้งานมากที่สุด วัตถุดิบที่มีปริมาณการใช้งานรองลงมาคือ ชานอ้อย ส่วนวัตถุดิบอื่นๆ ยังมีใช้บ้างแต่ในปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น

Ahmed และ Zhu [34] ได้ศึกษาหาวิธีการเตรียมเยื่อจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์โดยควบคุมให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสหายไปในขณะเตรียมเยื่อน้อยที่สุด ในการทดลองได้มีการเตรียมเยื่อโดยกระบวนการโซดาและกระบวนการคราฟต์ แล้วทำการศึกษาลักษณะต่างๆ ของเส้นใยและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากต้นข้าวโพดเพื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเตรียมเยื่อโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสในสภาวะกรดเจือจาง (dilute acid hydrolysis process) จากการทดลองพบว่ากระบวนการไฮโดรไลซิสในสภาวะกรดเจือจางสามารถช่วยลดการสูญเสียปริมาณเฮมิเซลลูโลสได้มากขึ้น และยังช่วยลดอุณหภูมิและเวลาในการเตรียมเยื่อให้น้อยลง อีกทั้งยังช่วยเพิ่มค่าความขาวสว่างและความแข็งแรงต่างๆ ของกระดาษได้ดีกว่ากระบวนการเตรียมเยื่อทั่วๆ ไป

Reddy และ Yang [36] ได้ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้าง องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติต่างๆ ของเส้นใยจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เพื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยจากพืช 3 ชนิด คือ ฝ้าย (cotton) ป่าน (flax) และปอแก้ว (kenaf) ซึ่งพบว่า เส้นใยจากต้นข้าวโพดมีปริมาณลิกนินที่ต่ำกว่าเส้นใยจากต้นปอแก้ว แต่มากกว่าเส้นใยจากต้นป่าน นอกจากนั้นเส้นใยจากต้นข้าวโพดยังมีปริมาณความเป็นผลึก (crystalline) ต่อการจัดเรียงตัวของไมโครไฟบริล (microfibrils) สูง เป็นผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยมีค่าสูง แต่ความสามารถในการดึงยืด (elongation) ของเส้นใยต่ำ และสมบัติทั่วๆ ไปของเส้นใยจากต้นข้าวโพดจะมีสมบัติที่คล้ายกับเส้นใยจากต้นปอแก้ว

Ahmed และคณะ [37] ได้ศึกษาวิธีการเตรียมเยื่อและกระดาษจากต้นข้าวโพด โดยสภาวะที่ใช้ในการเตรียมเยื่อแบบวิธีโซดา ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 12-15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากการทดลองพบว่า สภาวะในการเตรียมเยื่อที่เหมาะสมคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 14 ซึ่งเป็นสภาวะที่ทำให้กระดาษที่ผลิตจากเยื่อต้นข้าวโพดมีสมบัติด้านความแข็งแรงที่ดีที่สุด

Villar และคณะ [38] ได้ศึกษาการหาสัดส่วนระหว่างส่วนเปลือกนอก (bark) และแกนกลาง (core) ของต้นปอสา (kenaf) ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากส่วนเปลือกนอกของต้นปอสาเพียงอย่างเดียว จากการทดลองพบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ (ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุ) ได้ดีที่สุดคือ อัตราส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากส่วนเปลือกนอกต่อเยื่อที่ผลิตจากส่วนแกนกลางของต้นปอสาร้อยละ 66:34 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

วิทยา ปั้นสุวรรณ [39] ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ ได้แก่ ปริมาณลิกนิน โฮโลเซลลูโลส แอลฟาเซลลูโลส สารแทรก เพนโตแซนและเถ้า ที่ประกอบอยู่ในวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้ โดยตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์คือ เปลือกในปอสา เปลือกในปอกระเจา เปลือกในปอแก้ว เปลือกในปอคิวบา เปลือกในหม่อน ใบสับปะรด ชานอ้อย ฟางข้าว กาบกล้วย และกาบปาล์มน้ำมัน เพื่อหาข้อมูลเบื้องต้นที่เป็นประโยชน์ในการเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสมในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษของประเทศไทย โดยผลการวิเคราะห์พบว่าเปลือกในของปอทุกชนิด คือ ปอสา ปอแก้ว ปอกระเจา และปอคิวบา เหมาะสมที่จะใช้ทำเยื่อกระดาษ กาบกล้วยไม่เหมาะสม ส่วนเปลือกในของหม่อน ใบสับปะรดและ กาบปาล์มน้ำมันมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ทำเยื่อกระดาษได้ เพราะมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับชานอ้อยและซังข้าว ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษในปัจจุบัน

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1.1 ต้นข้าวโพด พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn, *Zea mays ceratina*) จากอำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี

3.1.1.2 ต้นข้าวโพด พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn, *Zea mays ceratina*) จากอำเภอปากท่อ จังหวัดราชบุรี

3.1.1.3 ต้นข้าวโพด พันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (field corn, *Zea Mays* L.) จาก อำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี

3.1.1.4 เยื่อใยสั้น ซึ่งมาจากไม้เนื้อแข็ง (เยื่อยูคาลิปตัสที่ผ่านการฟอก; LBKP#2); ฟินิคซ์ พัลพ์ แอน เพเพอร์ จำกัด มหาชน, ประเทศไทย

3.1.1.5 เยื่อใยยาว ซึ่งมาจากไม้เนื้ออ่อน (เยื่อสนผสม); Crofton, Canada

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

3.1.1.7 สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) (approx. 30% pure pa.); POCA SA, Poland

3.1.1.8 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 neutral solution QP; pH of 5% solution $\leq$ 11.5); Panreac Quimica SA, E.U.

3.1.1.9 น้ำกลั่น

3.1.1.10 กระดาษกรองเบอร์ 4; Whatman International Ltd., England

3.1.1.11 ถุงพลาสติกทนความร้อน

3.1.2 เครื่องมือ

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

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

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

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

3.1.2.5 ตู้อบ (hot air oven); Venticell, Germany

3.1.2.6 เครื่องต้มเยื่อ (autoclave digester) ; Universal Engineering, India

3.1.2.7 เครื่องตีกระจายเยื่อ (disintegrator); Adirondack Machine corporation, USA

3.1.2.8 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (Fiber Quality Analyzer, FQA); OpTest Equipment Inc., Canada

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

3.1.2.10 เครื่องวัดค่าการระบายน้ำ (freeness tester); รุ่น LTDA, Regmed Industria Tecnica de Frecisao, Brazil

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

3.1.2.12 เครื่องวัดความหนาของกระดาษ (thickness tester); Frank, Germany

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

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

3.1.2.15 เครื่องวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength Tester); รุ่น Lorentzen & Wettre, Sweden

3.1.2.16 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสงของกระดาษ; 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 เครื่องตัดกระดาษเพื่อทดสอบความแข็งแรงต่อแรงฉีก; รุ่น Saltaranpur, Universal Engineering Corporation, India

3.1.2.19 อ่างน้ำร้อน (water bath); รุ่น WB29, Memmert, Germany

3.1.2.20 กระบอกตวง ขนาด 25, 100 และ 1000 มิลลิลิตร

3.1.2.21 บีกเกอร์ ขนาด 25, 50, 250, 500 มิลลิลิตร

3.1.2.22 แท่งแก้วคนสาร

3.1.2.23 เทอร์โมมิเตอร์

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่อหาส่วนของต้นข้าวโพดที่ดีที่สุดได้แล้ว ทำการทดลองต่อเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเยื่อจากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ (พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์) เพื่อใช้ในการผลิตกระดาษที่ให้สมบัติของกระดาษดีที่สุด จากนั้นแบ่งเยื่อที่ได้ส่วนหนึ่งมาทำการศึกษาถึงการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่วนเยื่อที่เหลือนำมาทำการทดลองหาสัดส่วนระหว่างเยื่อที่ได้จากต้นข้าวโพดกับเยื่อทางการค้าที่เหมาะสมในการผลิตกระดาษเพื่อให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่ดีที่สุด ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดมีดังนี้

3.2.1 การทดลองตอนที่ 1: หาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเยื่อจากต้นข้าวโพดและหาส่วนของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ให้สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ดีที่สุด

3.2.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

3.2.1.1.1 การเตรียมต้นข้าวโพด

ทำการตัดต้นข้าวโพดหลังจากการเก็บเกี่ยวฝักสดเรียบร้อยแล้ว ดังแสดงในภาพที่ 3-1 ซึ่งต้นข้าวโพดที่สามารถเก็บเกี่ยวได้จะมีอายุการเจริญเติบโตประมาณ 80-90 วัน โดยจะทำการตัดต้นข้าวโพดในส่วนของลำต้น ตั้งแต่ส่วนที่พ้นดินขึ้นไปจนถึงความยาวประมาณ 60-90 เซนติเมตร (บริเวณใต้ตาของต้นข้าวโพด) ดังแสดงในภาพที่ 3-2 จากนั้นทำการลอกเปลือกหุ้มลำต้นข้าวโพดออก แล้วนำต้นข้าวโพดที่ตัดเรียบร้อยแล้วไปทำความสะอาด

3.2.1.1.2 การเตรียมชิ้นไม้สำหรับการผลิตเยื่อ

นำต้นข้าวโพดที่ผ่านการทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วมาทำการตัดเป็นท่อนเล็กๆ ขนาดท่อนละประมาณ 2.5–4.0 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3-3 และ 3-4

ภาพที่ 3-1 ลักษณะของต้นข้าวโพดที่เก็บเกี่ยวฝักสดเรียบร้อยแล้ว

ภาพที่ 3-2 ลักษณะการตัดต้นข้าวโพด

ภาพที่ 3-3 ลักษณะการตัดต้นข้าวโพดเป็นท่อนเล็กๆ

ภาพที่ 3-4 ลักษณะของท่อนข้าวโพดที่ตัดเป็นท่อนเรียบร้อยแล้ว

จากนั้นแบ่งท่อนข้าวโพดออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนท่อนข้าวโพดทั้งต้นที่ยังไม่ผ่านการปอกเปลือก (whole stalk) ส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพด (bast) และส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพด (pith) ดังแสดงในภาพที่ 3-5 จากนั้นนำต้นข้าวโพดทั้ง 3 ส่วนไปตากแดดให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ ดังแสดงในภาพที่ 3-6 เพื่อรอการผลิตเยื่อต่อไป

ภาพที่ 3-5 ลักษณะการแยกส่วนของเปลือกนอกและแกนกลางของต้นข้าวโพด

(ก) ต้นข้าวโพดทั้งต้น (ข) ส่วนเปลือกนอก (ค) ส่วนแกนกลาง

ภาพที่ 3-6 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อและกระดาษจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดที่เตรียมเรียบร้อยแล้ว

3.2.1.2 การผลิตเยื่อ

นำส่วนของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวทั้ง 3 ส่วนมาผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา โดยใช้สภาวะในการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ ร้อยละ 10, 15 และ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง โดยอุณหภูมิที่ใช้ต้มเยื่อคือ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนดังนี้

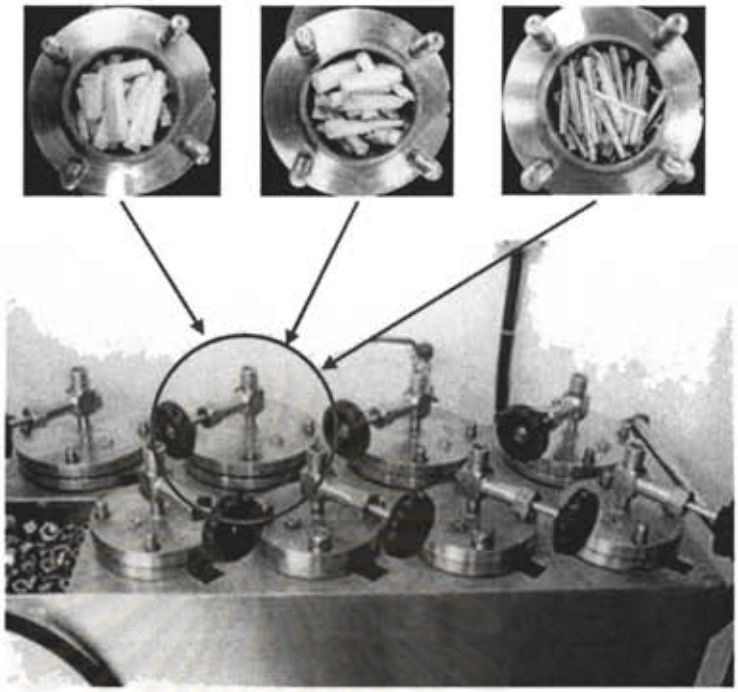
3.2.1.2.1 นำส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.1.1 มาหาปริมาณความชื้น (%moisture content) เพื่อใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง (O.D. chip weight) ของต้นข้าวโพด และคำนวณหาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก

3.2.1.2.2 ทำการชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามที่คำนวณได้ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก และทำการเตรียมสารละลายโดยการละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยน้ำบริสุทธิ์

3.2.1.2.3 นำต้นข้าวโพดแต่ละส่วนมาบรรจุในบอมบ์ (bomb) ที่จะใช้เป็นภาชนะในการต้มเยื่อจนเต็ม ดังแสดงในภาพที่ 3-7 จดน้ำหนักชิ้นไม้ที่ใส่ลงไปในแต่ละบอมบ์ เพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราส่วนของของเหลว (สารเคมี) ต่อชิ้นไม้ (liquor-to-wood ratio; L/W ratio)

3.2.1.2.4 เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อลงในบอมบ์และเติมน้ำลงไปจนเต็มบอมบ์ พร้อมทั้งจดปริมาตรของน้ำที่ใส่ลงไปในแต่ละบอมบ์ เพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราส่วนของของเหลว (สารเคมี) ต่อชิ้นไม้ ซึ่งจากการคำนวณ จะพบว่า สำหรับส่วนเปลือกนอก ส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพด และต้นข้าวโพดทั้งต้น มีค่าอัตราส่วนของของเหลว (สารเคมี) ต่อชิ้นไม้ เท่ากับ 10:1, 39:1 และ 13:1 ตามลำดับ ดังแสดงในวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก จากนั้นทำการปิดฝาบอมบ์ให้แน่นและนำบอมบ์แต่ละบอมบ์เข้าเครื่องต้มเยื่อแล้วขันน็อตให้แน่น พร้อมทั้งเปิดก๊อกน้ำเพื่อช่วยในการหล่อเย็นให้กับเครื่องต้มเยื่อ ดังแสดงในภาพที่ 3-8

3.2.1.2.5 หลังจากทำการต้มเยื่อด้วยเครื่อง autoclave digester จนครบเวลาตามที่กำหนด แล้วนำเยื่อที่ผลิตได้มาล้างทำความสะอาดเพื่อเอาสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อออก จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักเยื่อที่ได้หลังต้มเยื่อและหาปริมาณความชื้นของเยื่อ เพื่อใช้ในการคำนวณผลผลิตของเยื่อที่ได้ (%yield)

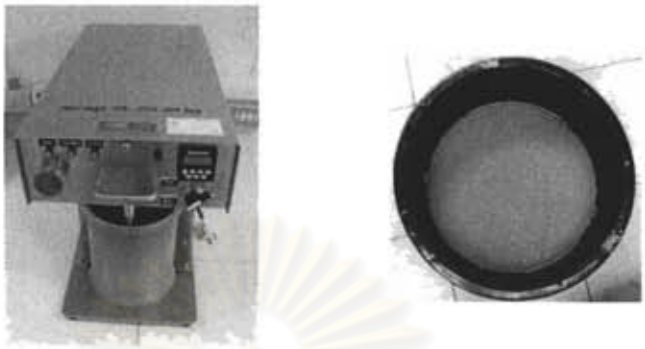


ภาพที่ 3-7 บอมบ์ (bomb) สำหรับบรรจุต้นข้าวโพด เพื่อใช้ในการต้มเยื่อด้วยเครื่องต้มเยื่อ

ภาพที่ 3-8 เครื่องต้มเยื่อ (autoclave digester)

3.2.1.2.6 นำเยื่อที่ผลิตได้จากทั้ง 3 ส่วนของต้นข้าวโพดมาหาปริมาณความชื้นของเยื่อ เพื่อใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักเยื่อที่จะใช้ในการตีกระจายเยื่อด้วยเครื่องตีกระจายเยื่อ

ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก. โดยการตีกระจายเยื่อจะตีกระจายเยื่อที่ความเข้มข้นของน้ำเยื่อร้อยละ 1.20 เป็นจำนวน 75,000 รอบ จนกระทั่งได้น้ำเยื่อ ดังแสดงในภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 เครื่องตีกระจายเยื่อและลักษณะน้ำเยื่อที่ได้หลังจากตีกระจายเยื่อเรียบร้อยแล้ว

3.2.1.2.7 แบ่งน้ำเยื่อส่วนหนึ่งเก็บไว้เพื่อวิเคราะห์เส้นใย สภาพระบายได้ของเส้นใยและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ ส่วนน้ำเยื่อที่เหลือจะนำมาขึ้นแผ่นกระดาษ เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติของกระดาษต่อไป

3.2.1.3 การทดสอบสมบัติของเยื่อ

นำเยื่อที่ผลิตได้มาวิเคราะห์สมบัติดังต่อไปนี้

3.2.1.3.1 วิเคราะห์ลักษณะเส้นใย

นำน้ำเยื่อที่แบ่งไว้ในข้อ 3.2.1.2.7 มาวัดค่าความยาว เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยและปริมาณเส้นใยขนาดสั้น ด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใย (FQA) ดังแสดงในภาพที่ 3-10 ตามมาตรฐาน ISO 16065 โดยจะทำการวัดเส้นใยแต่ละครั้งเป็นจำนวน 5,000 เส้น และทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละสภาวะ

3.2.1.3.2 สภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness)

นำน้ำเยื่อที่ตีกระจายเยื่อเรียบร้อยแล้วในข้อ 3.2.1.2.7 มาหาค่าร้อยละความเข้มข้นของน้ำเยื่อ (%consistency) เพื่อใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักของน้ำเยื่อที่จะใช้ในการวัดค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก ตามมาตรฐาน TAPPI T227 om-94 ด้วย

เครื่องวัดค่าการระบายน้ำของกระดาษ ซึ่งจะปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้เป็นร้อยละ 0.3 ในปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร โดยทำการจดค่าปริมาตรน้ำในกระบวกตวง วัดอุณหภูมิของน้ำในกระบอกตวง และหาความเข้มข้นของเยื่อหลังจากการหาสภาพระบายได้ สุดท้ายนำค่าที่หาได้ทั้งหมดไปเปิดตารางหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อเทียบกับอุณหภูมิและความเข้มข้นของเยื่อ

ภาพที่ 3-10 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (FQA)

3.2.1.3.3 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ

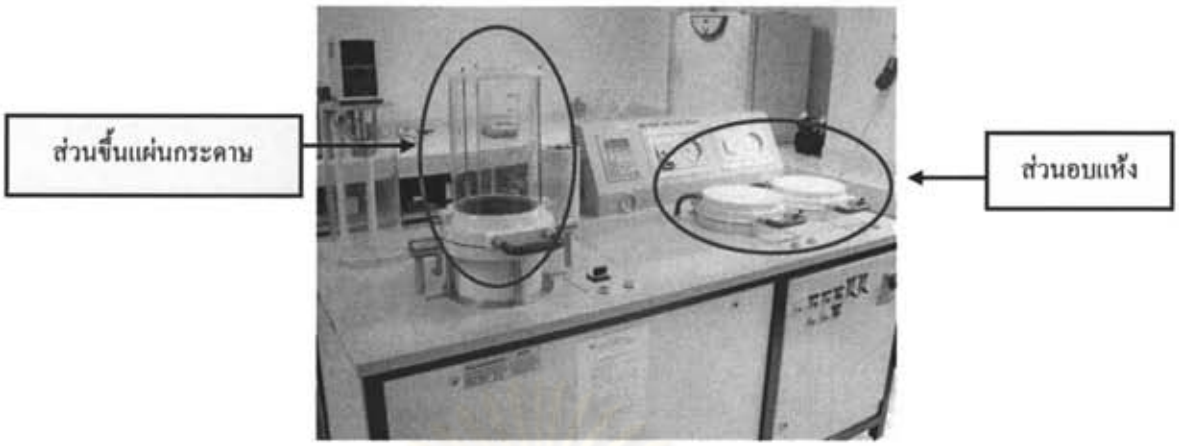
เป็นการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด ทั้งก่อนทำการต้มเยื่อและหลังต้มเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน โดยจะวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลสและลิกนินที่มีอยู่ในส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดและที่มีเหลืออยู่ในเยื่อ ตามมาตรฐาน ดังนี้คือ

- โฮโลเซลลูโลส ตามวิธี Acid chlorite ของ Browing
- แอลฟาเซลลูโลส (α-cellulose) ตามมาตรฐาน TAPPI T222 om-88
- ลิกนิน ตามมาตรฐาน TAPPI T222 om-88

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.1.4 การขึ้นแผ่นกระดาษทดสอบ

การขึ้นแผ่นกระดาษ (handsheet) จะใช้เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid – Kothen (Rapid – Kothen sheet former) ตามมาตรฐาน ISO 5269-2 โดยที่ตัวเครื่องจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 3-11 คือส่วนขึ้นแผ่นกระดาษ (sheet forming) และส่วนอบแห้ง (dryer) โดยมีขั้นตอนการขึ้นแผ่นกระดาษเป็นดังนี้



ภาพที่ 3-11 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid – Kothen (Rapid – Kothen sheet former)

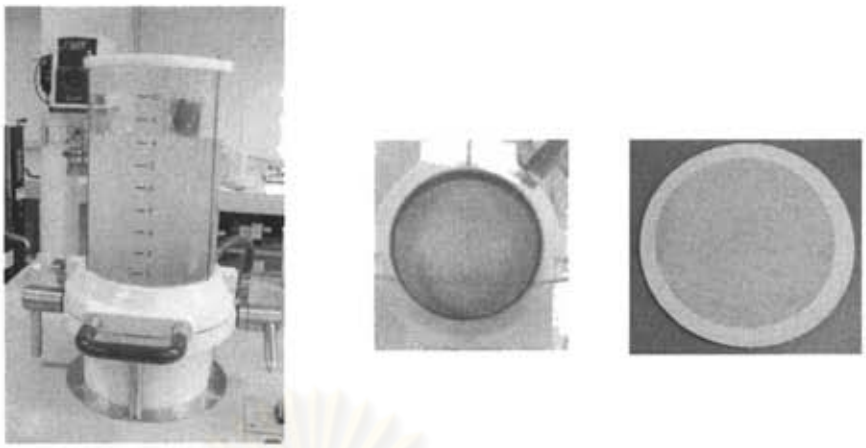
โดยมีขั้นตอนการขึ้นแผ่นกระดาษเป็นดังนี้

3.2.1.4.1 ปรับน้ำเยื่อให้มีความเข้มข้นร้อยละ 0.3 ดังแสดงในภาพที่ 3-12 และขึ้นแผ่นกระดาษโดยกำหนดให้กระดาษมีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งวิธีการคำนวณปริมาณเยื่อที่จะใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษแต่ละแผ่น ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก

ภาพที่ 3-12 น้ำเยื่อที่ใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษแต่ละแผ่น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.1.4.2 เทน้ำเยื่อลงในส่วนขึ้นแผ่นกระดาษ ซึ่งจะทำให้น้ำเยื่อเกิดการจัดเรียงตัวกลายเป็นแผ่นกระดาษ โดยที่เครื่องจะทำการกระจายเยื่อเพื่อให้เยื่ออยู่กระจายทั่วแผ่นเท่าๆ กัน จากนั้นจะมีการระบายน้ำออก ซึ่งลักษณะกระดาษที่ได้ออกมาจะมีลักษณะเป็นแผ่นกระดาษวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3-13



ภาพที่ 3-13 การขึ้นแผ่นกระดาษและลักษณะของกระดาษที่ได้จากเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ

3.2.1.4.3 นำกระดาษที่ขึ้นแผ่นเรียบร้อยแล้วมาปิดประกบด้วยกระดาษขึ้นแผ่น แล้วนำมาอบแห้งในส่วนอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-6 นาที ดังแสดงในภาพที่ 3-14

ภาพที่ 3-14 ลักษณะของกระดาษที่จะอบแห้งและส่วนอบแห้งของกระดาษของเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.1.5 การทดสอบสมบัติของกระดาษ

นำแผ่นกระดาษที่ผลิตได้จากต้นข้าวโพดทั้ง 3 ส่วนมาชั่งน้ำหนัก เพื่อหาน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ (basis weight) และตัดกระดาษให้มีขนาดตามมาตรฐาน TAPPI T220 sp-01 เพื่อทดสอบสมบัติเชิงแสงและเชิงกลของกระดาษ ดังต่อไปนี้

3.2.1.5.1 สมบัติทั่วไปของกระดาษ ได้แก่

3.2.1.5.1.1 ความหนาของกระดาษ (caliper) เป็นระยะห่างที่ตั้งฉากระหว่างผิวด้านบนและผิวด้านล่างของกระดาษภายใต้ภาวะการทดสอบที่กำหนด หน่วยที่วัดได้เป็นมิลลิเมตร (mm) โดยทำการวัดด้วยเครื่องวัดความหนา

3.2.1.5.1.2 ความหนาแน่นของกระดาษ (apparent density) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและน้ำหนักมาตรฐาน หน่วยที่วัดได้เป็นกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (g/m^3)

3.2.1.5.1.3 สมบัติเชิงแสงของกระดาษ ทั้งความขาวสว่าง(brightness) และความทึบแสง (opacity) วัดด้วยเครื่องวัดสมบัติเชิงแสง ดังแสดงในภาพที่ 3-15 ตามมาตรฐาน TAPPI T525 om-02 และ T519 om-02 ตามลำดับ โดยในแต่ละสภาวะจะทำการทดสอบแผ่นกระดาษทดสอบจำนวน 10 แผ่นและวัดค่าแผ่นละ 5 ตำแหน่ง

ภาพที่ 3-15 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสงของกระดาษ (Color Touch PC)

3.2.1.5.3 สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ (strength properties) ได้แก่

3.2.1.5.3.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) เป็นความแข็งแรงต่อแรงเค้นที่กระทำต่อกระดาษในแนวยาว (tensile stress) โดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง ตามมาตรฐาน TAPPI T494 om-01 โดยในแต่ละสภาวะจะทำการทดสอบแผ่นกระดาษจำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 2 ครั้ง จากนั้นนำค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile Index) โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน เพื่อเป็นการลดปัจจัยทางด้านความแปรปรวนของน้ำหนักมาตรฐานแต่ละแผ่น

3.2.1.5.3.2 ความต้านทานแรงฉีก (tear resistance) ความสามารถของกระดาษที่จะต้านแรงกระทำซึ่งจะทำให้กระดาษทดสอบหนึ่งชิ้นขาดออกจากรอยฉีกนำเดิม หน่วยที่วัดได้เป็นมิลลินิวตัน (mN) โดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีก ตามมาตรฐาน TAPPI T414 om-98 ในแต่ละสภาวะจะทำการทดสอบแผ่นกระดาษจำนวน 10 แผ่น วัดค่าของแต่ละแผ่นกระดาษจำนวน 1 จุดทดสอบ จากนั้นนำค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear Index) โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกมาหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน เพื่อเป็นการลดปัจจัยทางด้านความแปรปรวนของน้ำหนักมาตรฐานแต่ละแผ่น

3.2.1.5.3.3 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength) จะเป็นการทดสอบความต้านทานต่อแรงที่กระทำกับพื้นที่ของกระดาษในแนวตั้งฉากก่อนที่กระดาษจะเกิดการขาดทะลุ มีหน่วยเป็นกิโลปาสกาล (kPa) ด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T403 om-97 โดยในแต่ละสภาวะทำการทดสอบแผ่นกระดาษจำนวน 5 แผ่น วัดค่าของแต่ละแผ่นกระดาษจำนวน 2 จุดทดสอบ โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมาหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน เพื่อเป็นการลดปัจจัยทางด้านความแปรปรวนของน้ำหนักมาตรฐานแต่ละแผ่น ได้เป็นค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index)

3.2.1.6 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเส้นใยและกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเส้นใยและกระดาษ โดยจะวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของกระดาษ การแนบชิดและการสร้างพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษ ทั้งแนวภาคตัดขวาง (cross-section) และพื้นผิว (surface section) ของกระดาษ

3.2.1.7 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากการทดลองตามข้อ 3.2.1 มาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค Two-way ANOVA with Replication ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อเปรียบเทียบส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพด

เปรียบเทียบความแตกต่างของผลการทดลอง โดยโปรแกรม Microsoft Office Excel 2007 ซึ่งวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองโดยใช้ One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.2.2 การทดลองตอนที่ 2: เปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ (พันธ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์)

มีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

3.2.2.1 เตรียมต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ คือ พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ จากส่วนของต้นข้าวโพดที่ดีที่สุดที่ได้จากตอนที่ 1 มาทำการเตรียมชิ้นไม้สำหรับต้มเยื่อตามข้อ 3.2.1.1 ในตอนที่ 1

3.2.2.2 ทำการต้มเยื่อต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์จากส่วนของต้นข้าวโพดที่ดีที่สุดที่ได้จากตอนที่ 1 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10, 15 และ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง อุณหภูมิที่ใช้คือ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ด้วยเครื่องต้มเยื่อ ตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.2.1 – 3.2.1.2.5

3.2.2.3 นำเยื่อที่ได้มาทำความสะอาด จากนั้นนำมาตีกระจายเยื่อด้วยเครื่องตีกระจายเยื่อ ตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.2.6

3.2.2.4 แบ่งน้ำเยื่อส่วนหนึ่งจากการตีกระจายเยื่อ เพื่อนำไปวัดความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.3.1

3.2.2.5 หาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ ตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.3.2

3.2.2.6 วิเคราะห์องค์ประกอบของเยื่อ ตามการทดลองในตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.3.3

3.2.2.7 นำเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ที่ผลิตได้ในแต่ละความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มาทำการขึ้นแผ่นกระดาษ ด้วยเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ ตามมาตรฐาน ISO 5269-2 โดยน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ คือ 60 กรัมต่อตารางเมตร ตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.4

3.2.2.8 นำแผ่นทดสอบมาวัดสมบัติทั่วไป สมบัติเชิงแสงและสมบัติด้านความแข็งแรงต่างๆ ของกระดาษ เช่นเดียวกับการทดสอบในตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.5

3.2.2.9 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเส้นใยและกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) เช่นเดียวกับการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.6

3.2.2.10 วิเคราะห์ผลทางสถิติ เช่นเดียวกับการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.7

3.2.3 การทดลองตอนที่ 3: ศึกษาผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษ

มีขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

3.2.3.1 นำเยื่อที่เตรียมได้จากสภาวะที่ดีที่สุดของต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ มาหาปริมาณความชื้น เพื่อใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักเยื่อแห้ง (ก่อนฟอกเยื่อ) และปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ ได้แก่ สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 3 เพื่อใช้ในการกำจัดลิกนินที่อยู่ในเยื่อออก สารละลายโซเดียมซิลิเกตร้อยละ 2 เพื่อช่วยในการจับโลหะหนัก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อช่วยในการปรับความเป็นกรด-เบสของเยื่อที่ใช้ในการฟอกเยื่อให้เหมาะสม ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ได้ตามภาคผนวก ก

3.2.3.2 ทำการผสมเยื่อและสารเคมี โดยเริ่มจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสารละลายโซเดียมซิลิเกต ทำการนวดเยื่อกับสารเคมีให้เข้ากัน และทำการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของเยื่อ ด้วยเครื่อง pH meter โดยค่าความเป็นกรด-เบสของเยื่อที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อนั้น คือ pH 10±0.2 (สภาวะเป็นเบส) หากค่า pH ของเยื่อยังไม่ถึง 10 ให้ทำการปรับค่า pH ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จนได้ค่า pH ที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อ

3.2.3.3 ทำการฟอกเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ที่อุณหภูมิ 80-85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในอ่างน้ำร้อน โดยจะทำการฟอกเยื่อในถุงพลาสติกทนความร้อนและจะทำการนวดเยื่อทุกๆ 5 นาที เพื่อให้สารเคมีสามารถทำปฏิกิริยากับเยื่อได้อย่างสมบูรณ์

3.2.3.4 เมื่อทำการฟอกเยื่อจนครบระยะเวลาแล้ว นำเยื่อที่ผ่านการฟอกเยื่อแล้วมาทำความสะอาด เพื่อกำจัดสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อออกจากเยื่อให้หมด

3.2.3.5 นำเยื่อที่ได้มาชั่งน้ำหนักหลังฟอกเยื่อ รวมทั้งหาปริมาณความชื้นของเยื่อ เพื่อใช้ในการคำนวณน้ำหนักเยื่อแห้ง (หลังฟอกเยื่อ) และคำนวณหาผลผลิตของเยื่อที่ผ่านการฟอกเยื่อแล้ว โดยวิธีการคำนวณอย่างละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ก

3.2.3.6 นำเยื่อที่ผ่านการฟอกเยื่อเรียบร้อยแล้วมาทำการตีกระจายเยื่อ ด้วยเครื่องตีกระจายเยื่อ เช่นเดียวกับการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.2.6

3.2.3.7 แบ่งน้ำเยื่อส่วนหนึ่งจากการตีกระจายเยื่อ เพื่อนำไปวัดความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย เช่นเดียวกับตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.3.1

3.2.3.8 นำน้ำเยื่อที่ได้ไปวัดค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ เช่นเดียวกับการทดลองในตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.3.2

3.2.3.9 นำเยื่อที่เตรียมได้ในแต่ละความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มาทำการขึ้นแผ่นกระดาษ ด้วยเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ ตามมาตรฐาน ISO 5269-2 โดยน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษคือ 60 กรัมต่อตารางเมตร เช่นเดียวกับการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.4

3.2.3.10 นำแผ่นทดสอบมาวัดสมบัติทั่วไป สมบัติเชิงแสงและสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ เช่นเดียวกับการทดสอบในตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.5

3.2.3.11 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเส้นใยและกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดที่ผ่านการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 3 ทั้งสองพันธุ์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เช่นเดียวกับการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.6

3.2.3.12 วิเคราะห์ผลทางสถิติ เช่นเดียวกับการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.7

3.2.4 การทดลองที่ 4: ศึกษาหาสัดส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อทางการค้าที่เหมาะสมในการผลิตกระดาษ เพื่อให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่ดี

การทดลองในตอนนี้เป็นการนำเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์มาทดแทนเยื่อทางการค้า คือ เยื่อจากไม้เนื้อแข็ง (เยื่อใยสั้น) และเยื่อจากไม้เนื้ออ่อน (เยื่อใยยาว) ในอัตราส่วนเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ต่อเยื่อทางการค้าร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เพื่อใช้ในการผลิตกระดาษ แล้วทดสอบสมบัติต่างๆ ของกระดาษ แล้วศึกษาดูว่าเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดจากทั้งสองพันธุ์นั้นมีความสามารถในการปรับปรุงสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อการค้าได้หรือไม่ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

1. กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการปรับปรุงสมบัติของกระดาษโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

2. กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการปรับปรุงสมบัติของกระดาษโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
3. กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการปรับปรุงสมบัติของกระดาษโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง
4. กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการปรับปรุงสมบัติของกระดาษโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

สำหรับขั้นตอนในการทดลองมีดังนี้

3.2.4.1 การเตรียมเยื่อใยสั้น

มีขั้นตอนดังนี้

3.2.4.1.1 หาความชื้นของเยื่อใยสั้น โดยฉีกเยื่อใยสั้นเป็นชิ้นเล็กๆ และนำมาใส่ในเครื่องวัดความชื้น

3.2.4.1.2 ชั่งเยื่อใยสั้นให้มีน้ำหนักเยื่อแห้งเท่ากับ 360 กรัม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความชื้นของเยื่อใยสั้นที่หาได้ ดังวิธีการคำนวณแสดงไว้ที่ภาคผนวก ก จากนั้นนำมาฉีกเป็นชิ้นเล็กๆ และนำมาแช่ในถังที่บรรจุน้ำไว้ 5 ลิตร และปิดฝาถัง ทิ้งไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง ถึง 24 ชั่วโมง

3.2.4.1.3 นำเยื่อมาบดกระจายเยื่อด้วยเครื่องบดเยื่อ จนเส้นใยแยกออกจากกันเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ แล้วจึงทำการบดเยื่อตามมาตรฐาน TAPPI T200 sp-01 หยุดเครื่องเป็นระยะเพื่อนำน้ำเยื่อมาหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ ตามมาตรฐาน TAPPI T227 om-99 และหยุดการบดเยื่อเมื่อได้ค่าการระบายน้ำประมาณ 300 - 350 มิลลิลิตร จากนั้นเก็บเยื่อที่ได้ไว้ผสมกับเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดเพื่อใช้ในขั้นตอนการขึ้นแผ่นต่อไป

3.2.4.2 การเตรียมเยื่อใยยาว

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการเตรียมเยื่อใยสั้น ในข้อ 3.2.4.1 แล้วเก็บเยื่อที่ผลิตไว้ เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษต่อไป

3.2.4.3 การเตรียมเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการเตรียมเยื่อใยสั้น ในข้อ 3.2.2.1– 3.2.2.5 แล้วเก็บเยื่อที่ผลิตไว้ เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษต่อไป

3.2.4.4 การขึ้นแผ่นกระดาษ

มีขั้นตอนดังนี้

3.2.4.4.1 นำเยื่อใยสั้น เยื่อใยยาวและเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ มาหาปริมาณความชื้น เพื่อใช้ในการคำนวณหาน้ำหนักของเยื่อที่จะใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษ ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก

3.2.4.4.2 ชั่งเยื่อที่ใช้ในการผสมแต่ละอัตราส่วน ตามที่ได้คำนวณไว้ มาทำการตีกระจายเยื่อ เช่นเดียวกับการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.2.6 แล้วนำน้ำเยื่อที่ได้มาผสมกัน

3.2.4.4.3 ทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อ (%consistency) ก่อนทำการขึ้นแผ่นกระดาษให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.3 ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก

3.2.4.4.4 นำน้ำเยื่อที่ได้จากข้อ 3.2.4.4.3 มาทำการขึ้นแผ่นกระดาษ ด้วยเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ ตามมาตรฐาน ISO 5269-2 โดยน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ คือ 60 กรัมต่อตารางเมตร เช่นเดียวกับการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.4

3.2.4.4.5 นำแผ่นทดสอบมาวัดสมบัติทั่วไป สมบัติเชิงแสงและสมบัติด้านความแข็งแรงต่างๆ ของกระดาษ เช่นเดียวกับการทดสอบในตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.5

3.2.4.4.6 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเส้นใยและกระดาษที่ผลิตจากของต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเช่นเดียวกับการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.6

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเยื่อจากต้นข้าวโพด และส่วนของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ที่ให้สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ดีที่สุด

ผลการทดลองที่แสดงภายใต้หัวข้อ 4.1 นี้เป็นผลการทดลองที่ได้จากการทดลองในตอนที่ 1 ซึ่งเป็นการนำส่วนของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวทั้ง 3 ส่วนมาผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา โดยใช้สภาวะในการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละต่างๆ คือ 10, 15 และ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง โดยอุณหภูมิที่ใช้ต้มเยื่อคือ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที แล้วทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลผลิตของเยื่อ (%yield)

ปกติแล้วเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น ผลผลิตของเยื่อจะมีค่าลดลง เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของพืช โดยทำให้พันธะภายในลิกนินและพันธะระหว่างลิกนินกับคาร์โบไฮเดรตถูกทำลาย ส่งผลให้ผลผลิตของเยื่อหลังจากการต้มเยื่อนั้นมีค่าลดลง [22] แต่จากการทดลองนี้พบว่า ส่วนของต้นข้าวโพดทั้งต้นและส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพด เมื่อทำการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าผลผลิตของเยื่อที่ได้กลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4-1 ซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎีที่ได้กล่าวมาข้างต้น มีเพียงส่วนของแกนกลางต้นข้าวโพดเท่านั้นที่เป็นไปตามทฤษฎี ทั้งนี้เนื่องมาจากหลังจากการต้มเยื่อในส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพดและส่วนต้นข้าวโพดทั้งต้น ที่สภาวะในการต้มเยื่อที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 และ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง พบว่า มีชิ้นไม้บางส่วนที่ต้มไม่สุก เมื่อนำเยื่อที่ต้มได้มาล้างทำความสะอาดจึงต้องทำการแยกส่วนชิ้นไม้ที่ไม่สุกออกไป (reject) ส่งผลให้ผลผลิตของเยื่อในสภาวะดังกล่าวต่ำกว่าที่ควรจะเป็น โดยที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง จะมีสัดส่วนของเยื่อที่ไม่สุกสูงกว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ทั้งส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพดและส่วนต้นข้าวโพดทั้งต้น

ตารางที่ 4-1 สมบัติของเยื่อที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่อต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

NaOH (%)	ค่าผลผลิตของเยื่อ (%yield ± SD)			ความยาวของเส้นใย (มิลลิเมตร ± SD)			เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (ไมโครเมตร ± SD)			ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%fines ± SD)			ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ (มิลลิลิตร)		
	ทั้งต้น	เปลือกนอก	แกนกลาง	ทั้งต้น	เปลือกนอก	แกนกลาง	ทั้งต้น	เปลือกนอก	แกนกลาง	ทั้งต้น	เปลือกนอก	แกนกลาง	ทั้งต้น	เปลือกนอก	แกนกลาง
10	20.17	27.10	20.74	0.89	1.01	0.79	20.40	22.61	18.20	40.04	31.00	50.43	286.60	473.83	56.25
	± 2.51	± 3.20	± 1.94	± 0.05	± 0.07	± 0.02	± 0.16	± 1.85	± 0.21	± 3.59	± 3.32	± 0.42	± 5.70	± 4.83	± 0.75
15	34.91	31.79	20.09	0.93	0.99	0.74	20.97	21.18	18.21	37.17	29.76	50.06	211.50	462.25	64.20
	± 2.02	± 0.67	± 2.05	± 0.02	± 0.04	± 0.01	± 0.07	± 0.24	± 0.28	± 1.26	± 3.87	± 0.49	± 5.50	± 3.45	± 1.00
20	35.60	37.05	16.74	0.94	0.98	0.71	20.45	21.44	18.07	39.07	29.41	52.77	190.25	392.75	73.55
	± 2.19	± 2.39	± 3.13	± 0.004	± 0.03	± 0.01	± 0.12	± 0.26	± 0.12	± 0.92	± 1.20	± 0.31	± 2.75	± 5.25	± 0.25

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อพิจารณาผลผลิตของเยื่อที่ผลิตจากส่วนต่างๆของต้นข้าวโพด จะพบว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากัน เยื่อที่ผลิตจากส่วนของแกนกลางต้นข้าวโพดมีค่าผลผลิตของเยื่อต่ำที่สุด ทำให้สันนิษฐานได้ว่าเส้นใยเริ่มต้นของส่วนแกนกลางนี้น่าจะมีขนาดสั้น บอบบาง จึงถูกทำลายได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น ทำให้ผลผลิตของเยื่อต่ำ

4.1.2 ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย และปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (fine)

จากตารางที่ 4-1 ขนาดความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้ง 3 ส่วนนั้น พบว่า เมื่อทำการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ขนาดความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ผลิตจากต้นข้าวโพดแต่ละส่วนมีค่าที่ใกล้เคียงกัน หากพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อเท่ากัน จะพบว่าส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพดนั้นจะมีความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่มากที่สุด รองลงมาคือ ต้นข้าวโพดทั้งต้นและแกนกลางของต้นข้าวโพด ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยขนาดเล็กของส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด พบว่า ส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพดนั้นจะมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กอยู่ในปริมาณที่สูงที่สุด คือ ประมาณร้อยละ 50 รองลงมาคือ ส่วนของต้นข้าวโพดทั้งต้น ประมาณร้อยละ 37-40 และสุดท้ายคือ ส่วนของเปลือกนอกต้นข้าวโพดมีประมาณร้อยละ 29-31

4.1.3 ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness)

โดยปกติแล้วค่าสภาพการระบายได้ซึ่งบอกถึงการระบายน้ำของเยื่อนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อทำให้เส้นใยเกิดการแยกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ มากขึ้น อีกทั้งยังทำให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดเล็ก (fines) หลุดออกมามากขึ้นด้วย [22] ซึ่งเส้นใยที่มีขนาดเล็กๆ ทำให้พื้นที่ผิวในการสัมผัสน้ำมาก การอุ้มน้ำของเส้นใยจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งจากตารางที่ 4-1 พบว่าค่าสภาพระบายได้ของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งต้นและเยื่อที่ผลิตจากเปลือกนอกของต้นข้าวโพดสอดคล้องกับทฤษฎีข้างต้น แต่ในส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพดนั้นจะมีค่าสภาพการระบายได้ของเยื่อเป็นไปในทิศตรงกันข้าม ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยในส่วนแกนกลางมีขนาดสั้นและบางกว่าเส้นใยในส่วนอื่นๆ เมื่อผ่านการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงอาจทำให้เส้นใยส่วนนี้มีขนาดเล็กลงมาก และอาจลอดผ่านตะแกรงในช่วงการระบายน้ำได้

เมื่อพิจารณาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อจากแต่ละส่วนของต้นข้าวโพด พบว่าเยื่อที่ผลิตจากเปลือกนอกของต้นข้าวโพดมีค่าสภาพระบายได้สูงสุด รองลงมาคือเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งต้นและแกนกลางของต้นข้าวโพด ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความยาวของเส้นใยดังแสดงในตารางที่ 4-1 นั่นคือ เยื่อที่ผลิตจากเปลือกนอกของต้นข้าวโพดมีความยาวของเส้นใยที่สูงกว่าเยื่อที่ผลิตจากส่วนอื่นๆ ทำให้มีพื้นที่ผิวของเยื่อในการสัมผัสกับน้ำน้อยลง การอุ้มน้ำของเยื่อต่ำ เป็นผลให้ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อสูง ในขณะที่เยื่อที่ผลิตได้จากต้นข้าวโพดทั้งต้นและแกนกลางของต้นข้าวโพดมีขนาดของเส้นใยสั้นกว่า ทำให้เส้นใยมีพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับน้ำได้มากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสภาพระบายได้ของเยื่อที่ผลิตจากแกนกลางของต้นข้าวโพดนั้นมีค่าที่ต่ำมาก รวมถึงลักษณะของเยื่อที่ผลิตได้นั้นมีเนื้อค่อนข้างละเอียดและมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กๆ เป็นจำนวนมาก ทำให้ในขั้นตอนการขึ้นแผ่นกระดาษเยื่อที่ผลิตจากแกนกลางของต้นข้าวโพดมีความสามารถในการระบายน้ำที่ไม่ดีนัก

4.1.4 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โฮโลเซลลูโลส แอลฟาเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของเส้นใยที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ทั้งที่ยังไม่ผ่านการต้มเยื่อและที่ผ่านการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ กัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า ในทุกๆ ส่วนของต้นข้าวโพด เมื่อทำการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น สัดส่วนของแอลฟาเซลลูโลสในเยื่อมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากสัดส่วนของแอลฟาเซลลูโลสในชิ้นไม้ (ก่อนต้มเยื่อ) แต่อย่างไรก็ตามปริมาณเฮมิเซลลูโลสและลิกนินในเยื่อกลับมีแนวโน้มลดต่ำลง นั่นก็แสดงว่าเมื่อทำการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ทำให้ส่วนของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยถูกกำจัดหรือละลายออกไปได้มากขึ้น และส่งผลให้สัดส่วนของเซลลูโลส (แอลฟาเซลลูโลส) ที่เหลืออยู่ในเยื่อหลังจากการต้มเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-2 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ก่อนและหลังการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

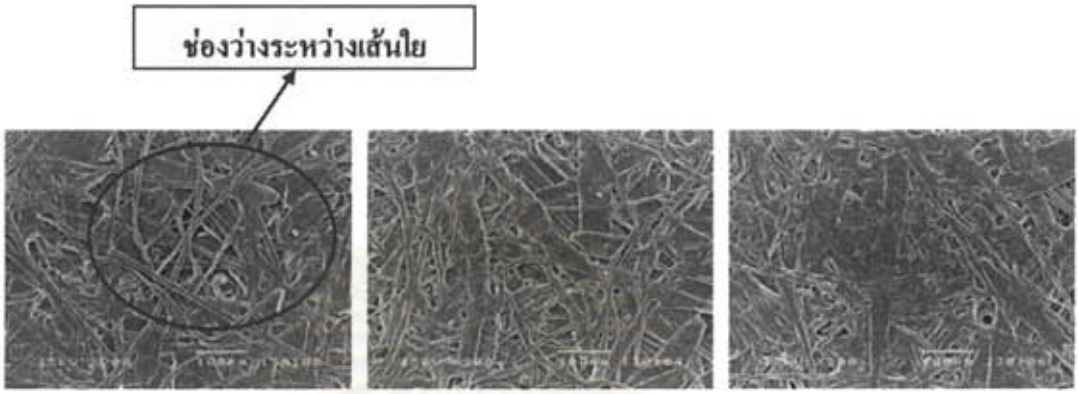
ตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (ร้อยละเทียบกับวัตถุดิบ)				
	โฮโลเซลลูโลส	แอลฟาเซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	อื่นๆ
ต้นข้าวโพดทั้งต้น	73.21	38.30	34.91	22.10	4.69
เปลือกนอกของต้นข้าวโพด	71.12	40.06	31.06	23.81	5.07
แกนกลางของต้นข้าวโพด	48.80	26.43	22.37	19.87	31.33
เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งต้น					
1. 10% NaOH	86.16	56.74	29.42	5.61	8.23
2. 15% NaOH	87.50	59.63	27.87	4.27	8.23
3. 20% NaOH	89.86	61.91	27.95	4.36	5.78
เยื่อที่ผลิตจากเปลือกนอกของต้นข้าวโพด					
1. 10% NaOH	86.38	57.72	28.66	4.82	8.80
2. 15% NaOH	87.97	62.56	25.41	3.78	8.25
3. 20% NaOH	89.82	64.63	25.19	3.01	7.17
เยื่อที่ผลิตจากแกนกลางของต้นข้าวโพด					
1. 10% NaOH	89.64	39.06	50.58	5.81	4.55
2. 15% NaOH	92.81	63.97	28.21	3.95	3.24
3. 20% NaOH	92.48	65.46	27.02	3.51	4.01

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

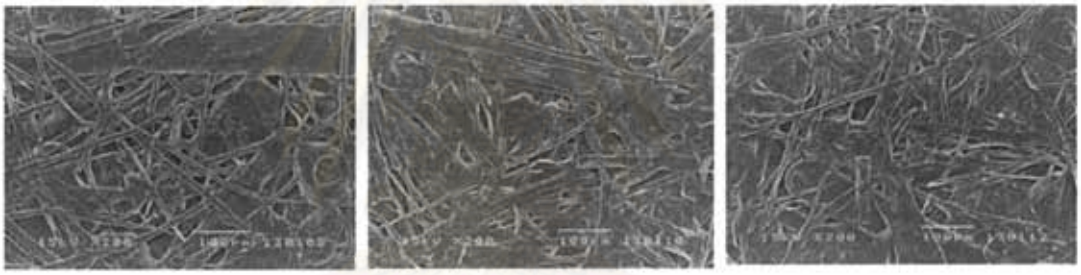
4.1.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกระดาษ

ลักษณะการสร้างพันธะหรือการแนบชิดกันของเส้นใยในเนื้อกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด ได้แก่ ส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพด ส่วนต้นข้าวโพดทั้งต้นและส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพด ตามลำดับ เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้นร้อยละ

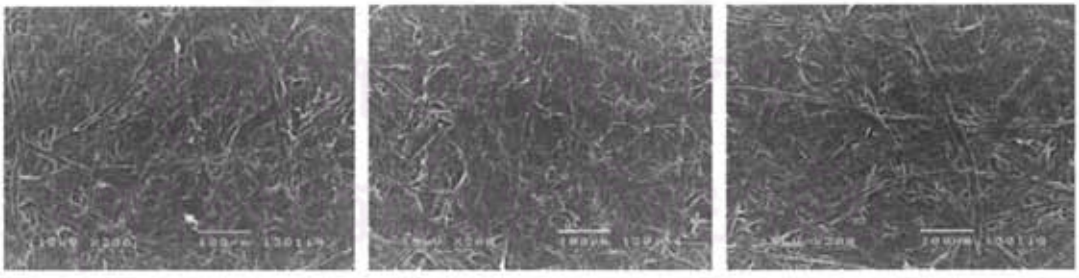
10, 15 และ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ตามลำดับ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงไว้ในภาพที่ 4-1 และ 4-2 ซึ่งแสดงลักษณะของกระดาษทั้งพื้นผิวและภาคตัดขวางของกระดาษ ตามลำดับ



(ก) เปลือกนอก+NaOH 10% (ข) เปลือกนอก+NaOH 15% (ค) เปลือกนอก+NaOH 20%



(ง) ทั้งต้น+NaOH 10% (จ) ทั้งต้น+NaOH 15% (ฉ) ทั้งต้น+NaOH 20%



(ช) แกนกลาง+NaOH 10% (ซ) แกนกลาง+NaOH 15% (ฌ) แกนกลาง+NaOH 20%

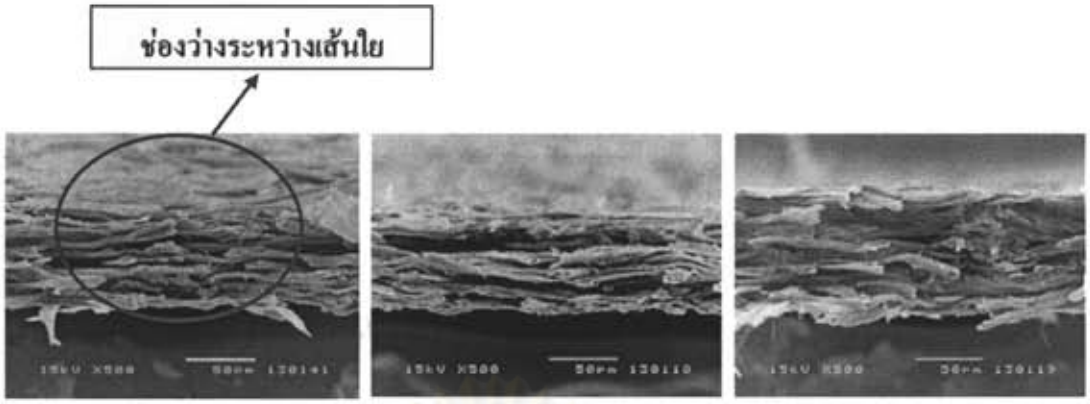
ภาพที่ 4-1 ลักษณะพื้นผิวของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ที่กำลังขยาย 200 เท่า

จากภาพที่ 4-1 (ก)-(ฌ) จะเห็นว่า เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น เส้นใยในเนื้อกระดาษที่ผลิตจากส่วนเปลือกนอก (ภาพที่ 4-1 (ก)-(ค)) และต้นข้าวโพดทั้งต้น (ภาพที่ 4-1 (ง)-(ฉ)) มีการยุบตัวและแผ่ขยายออกได้มากขึ้น ความเป็นเนื้อเดียวกันของเส้นใยมากขึ้น ช่องว่างระหว่างเส้นใยน้อยลง การสร้างพันธะของเส้นใยทำได้มากขึ้นเรื่อยๆ แต่สำหรับกระดาษที่ผลิตจากส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพด (ภาพที่ 4-1 (ช)-(ฌ)) นั้น เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้น ลักษณะพื้นผิวของกระดาษในแต่ละความเข้มข้นแทบจะไม่มีความแตกต่างกัน คือ เส้นใยในเนื้อกระดาษมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากจนไม่เห็นความแตกต่าง

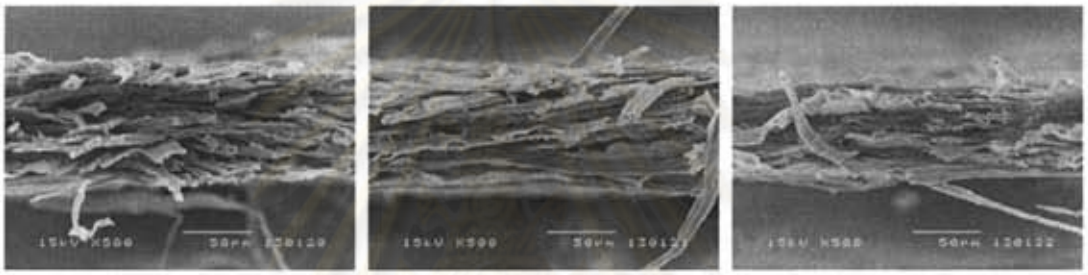
เมื่อพิจารณาลักษณะพื้นผิวของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเท่ากัน จะเห็นว่า กระดาษที่ผลิตจากส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพด (ภาพที่ 4-1 (ช)-(ฌ)) จะมีพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด ช่องว่างระหว่างเส้นใยในเนื้อกระดาษน้อยและการสร้างพันธะของเส้นใยทำได้มากกว่าส่วนอื่นๆ ของต้นข้าวโพด รองลงมาคือ ต้นข้าวโพดทั้งต้น (ภาพที่ 4-1 (ง)-(ฉ)) และส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพด (ภาพที่ 4-1 (ก)-(ค)) ตามลำดับ

จากภาพที่ 4-2 (ก)-(ฌ) ซึ่งเป็นลักษณะภาคตัดขวางของกระดาษ ที่กำลังขยาย 500 เท่า จะเห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น เส้นใยในเนื้อกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้ง 3 ส่วน จะมีการแนบชิดกันได้มากขึ้น ช่องว่างระหว่างเส้นใยแต่ละเส้นและแต่ละชั้นเริ่มที่จะน้อยลง มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น การสร้างพันธะของเส้นใยจึงทำได้ดีขึ้นด้วย และจะยิ่งเห็นได้ชัดเจนในส่วนของกระดาษที่ผลิตจากส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพด ดังแสดงในภาพที่ 4-2 (ช)-(ฌ)

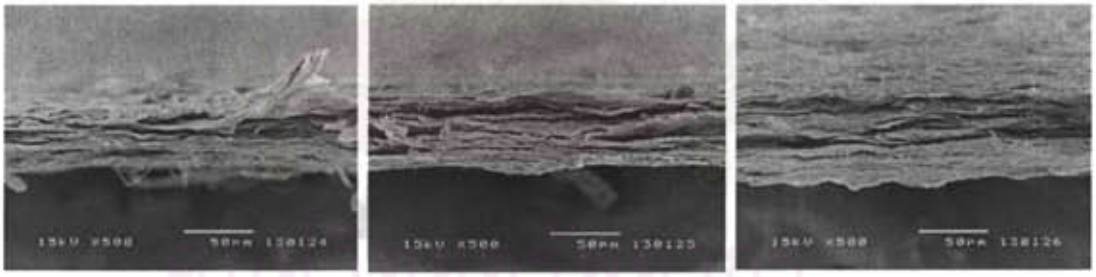
เมื่อพิจารณาลักษณะภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเท่ากัน จะเห็นว่า การแนบชิดกันของเส้นใยในเนื้อกระดาษที่ผลิตจากส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพด (ภาพที่ 4-2 (ช)-(ฌ)) จะดีกว่า ช่องว่างระหว่างเส้นใยในเนื้อกระดาษน้อยกว่าและการสร้างพันธะของเส้นใยทำได้มากกว่าส่วนอื่นๆ ของต้นข้าวโพดอย่างเห็นได้ชัด รองลงมาคือ ต้นข้าวโพดทั้งต้น (ภาพที่ 4-2 (ง)-(ฉ)) และส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพด (ภาพที่ 4-2 (ก)-(ค)) ตามลำดับ



ก) เปลือกนอก+NaOH 10%　(ข) เปลือกนอก+NaOH 15%　(ค) เปลือกนอก+NaOH 20%



(ง) ทั้งต้น+NaOH 10%　(จ) ทั้งต้น+NaOH 15%　(ฉ) ทั้งต้น+NaOH 20%



(ช) แกนกลาง+NaOH 10%　(ซ) แกนกลาง+NaOH 15%　(ฌ) แกนกลาง+NaOH 20%

ภาพที่ 4-2 ลักษณะพื้นผิวของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.6 ความหนาของกระดาษ (thickness)

ความหนาของกระดาษ เป็นการวัดระยะห่างในแนวตั้งฉากระหว่างผิวหน้าทั้ง 2 ด้านของแผ่นกระดาษ ภายใต้ภาวะที่กำหนด จากตารางที่ 4-3 จะเห็นว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากัน กระดาษที่ผลิตจากส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพด มีความหนาของกระดาษน้อยที่สุด ซึ่งจากค่าความหนาของกระดาษนี้ทำให้ทราบว่าที่น้ำหนักมาตรฐานเท่ากัน กระดาษที่ผลิตจากแกนกลางของต้นข้าวโพดนั้น มีเนื้อของกระดาษที่แน่นและบางกว่ากระดาษที่ผลิตจากส่วนอื่นของต้นข้าวโพด รองลงมาคือ ต้นข้าวโพดทั้งต้นและส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพด ตามลำดับ

ตารางที่ 4-3 ความหนาของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่อต้มเยื่อด้วยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

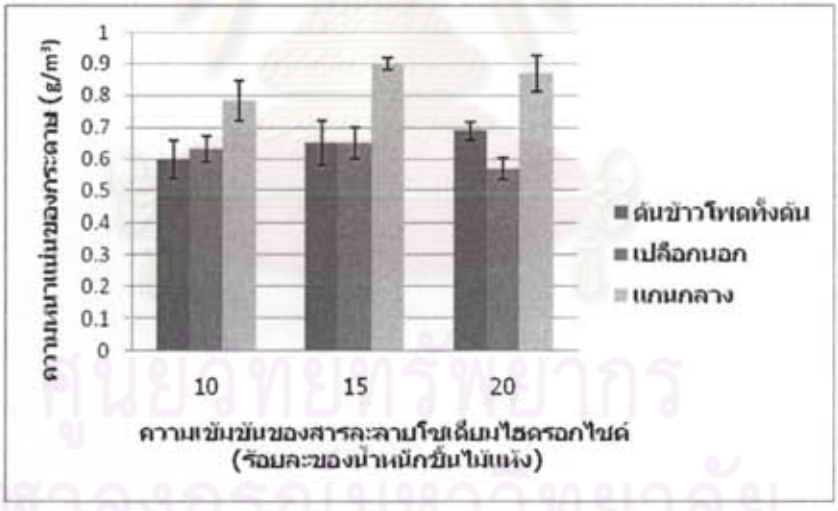
ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง)	ความหนาของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว, มิลลิเมตร ± SD		
	ต้นข้าวโพดทั้งต้น	เปลือกนอก	แกนกลาง
10	0.107 ± 0.0139	0.092 ± 0.0061	0.077 ± 0.0059
15	0.084 ± 0.0081	0.081 ± 0.0067	0.069 ± 0.0154
20	0.089 ± 0.0040	0.103 ± 0.0052	0.072 ± 0.0049

4.1.7 ความหนาแน่นของกระดาษ (density)

ความหนาแน่นของกระดาษ เป็นค่าที่สามารถคำนวณหาได้จากการนำน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษมาหารด้วยค่าความหนาของกระดาษ ซึ่งความหนาแน่นของกระดาษนี้มีความสัมพันธ์กับการสร้างพันธะหรือการแนบชิดกันของเส้นใยในเนื้อกระดาษ หากความหนาแน่นของกระดาษมีค่ามาก แสดงว่าเส้นใยในเนื้อกระดาษมีการสร้างพันธะกันหรือแนบชิดกันได้เป็นอย่างดี ความแข็งแรงของกระดาษจะสูง แต่อย่างไรก็ตามการที่กระดาษมีค่าความหนาแน่นที่สูง กระดาษจะมีโพรงอากาศลดลง เป็นผลให้ความทึบแสงของกระดาษลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งความหนาแน่นของกระดาษจะเป็นค่าที่ผกผันกับความหนาของกระดาษ ที่น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษเท่ากัน กระดาษที่มีเนื้อแน่นจะบางกว่ากระดาษที่มีความฟ่าม (ฟู) [9, 22] ซึ่งจากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4-3 พบว่า กระดาษที่ผลิตจากส่วนของแกนกลางของต้นข้าวโพด มีค่า

ความหนาแน่นของกระดาษที่สูงที่สุด เนื่องจากการแนบชิดของเส้นใยในเนื้อกระดาษทำได้มากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4-2 (ช)-(ฌ) ส่วนความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากส่วนเปลือกนอกและต้นข้าวโพดทั้งต้นนั้นมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

เมื่อพิจารณาแนวโน้มของความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด จะเห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 เป็น 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ความหนาแน่นของกระดาษในทุกส่วนของต้นข้าวโพดจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ปรากฏว่าความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต้นข้าวโพดทั้งต้นยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากความเข้มข้นร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 4-1 (ง)-(ฉ) และภาพที่ 4-2 (ง)-(ฉ) ในขณะที่กระดาษที่ผลิตจากส่วนเปลือกนอกมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนกระดาษที่ผลิตจากแกนกลางของต้นข้าวโพดมีค่าที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณค่าความหนาแน่นของกระดาษนั้นไม่สอดคล้องกับภาพที่ 4-1 (ก)-(ค) ของส่วนเปลือกนอก และภาพที่ 4-2 (ช)-(ฌ) ของส่วนแกนกลาง ทั้งนี้อาจจะมีตัวแปรมาจากช่วงขึ้นแผ่นกระดาษ ซึ่งแรงที่ใช้ในการกดรีดน้ำออกอาจไม่สม่ำเสมอ



ภาพที่ 4-3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด

4.1.8 สมบัติเชิงแสงของกระดาษ

สมบัติเชิงแสงของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ได้แก่ ความขาวสว่างและความทึบแสงของกระดาษ แสดงไว้ในตารางที่ 4-4

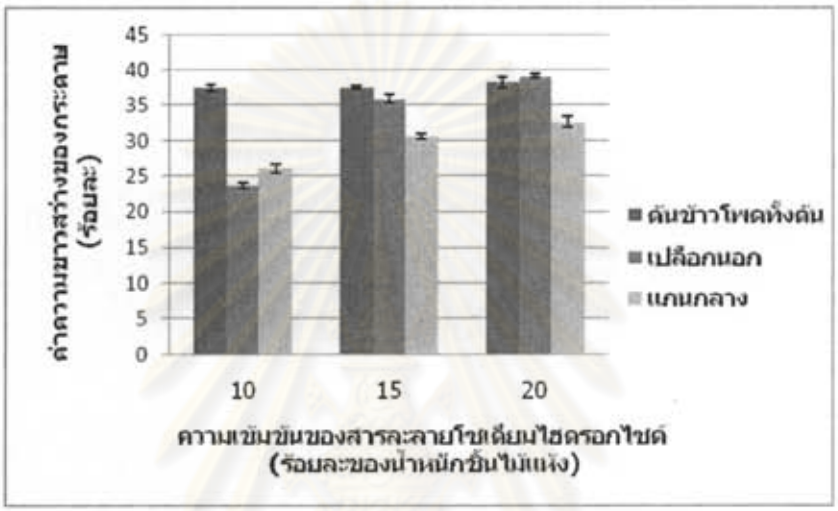
ตารางที่ 4-4 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อสมบัติเชิงแสงของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว

NaOH (%)	ความขาวสว่าง (% ± SD)			ความทึบแสง (% ± SD)		
	ข้าวโพดทั้งต้น	เปลือกนอก	แกนกลาง	ข้าวโพดทั้งต้น	เปลือกนอก	แกนกลาง
10	37.46 ± 0.48	23.73 ± 0.36	26.11 ± 0.62	84.66 ± 0.89	93.30 ± 0.92	74.68 ± 5.62
15	37.50 ± 0.24	35.88 ± 0.63	30.70 ± 0.41	75.80 ± 0.74	83.04 ± 2.40	72.80 ± 0.84
20	38.28 ± 0.76	39.13 ± 0.33	32.61 ± 0.78	68.23 ± 2.24	86.48 ± 0.62	72.28 ± 1.77

4.1.8.1 ความขาวสว่างของกระดาษ (brightness)

จากตารางที่ 4-4 และภาพที่ 4-4 แสดงค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ได้ จะเห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากทุกๆ ส่วนของต้นข้าวโพดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษโดยตรงถูกกำจัดออกไปมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4-2 และเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 และ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งต้นจะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือกระดาษที่ผลิตจากเปลือกนอกและแกนกลางของต้นข้าวโพด ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลมาจากส่วนของต้นข้าวโพดทั้งต้นนั้น ประกอบด้วยส่วนของเปลือกนอกที่มีสีเหลืองอมเขียวและส่วนของแกนกลางที่มีสีขาว ทำให้เยื่อที่ผลิตได้มีความขาวสว่างที่สูงเยื่อกว่าเยื่อจากเปลือกนอกเพียงอย่างเดียว และเมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 และ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากส่วนของเปลือกนอกและต้นข้าวโพดทั้งต้นนั้นมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปริมาณลิกนินของส่วนเปลือกนอกและต้นข้าวโพดทั้งต้นนั้นมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 22.10 และ 23.81 เทียบกับวัตถุดิบ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4-2 ดังนั้น เมื่อทำการต้มเยื่อโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นเรื่อยๆ ค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากส่วนของเปลือกนอกและต้นข้าวโพดทั้งต้นจึงมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะลิกนินถูกกำจัดออกไปในปริมาณที่มาก ตั้งแต่การต้มเยื่อโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่ำไปเรียบร้อยแล้ว อย่างไรก็ตาม จะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนในกรณีของกระดาษที่ผลิตจากส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพด แม้ว่าส่วนแกนกลางจะเป็นส่วนที่มีปริมาณลิกนินที่น้อยกว่าส่วนอื่นๆ ก็ตาม ทั้งนี้อาจ

เนื่องมาจากส่วนแกนกลางอาจมีองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ เช่น สารแทรก เถ้า หรือสารให้สี ในปริมาณที่สูงกว่าส่วนอื่นๆ โดยมีมากถึงร้อยละ 31.33 เทียบกับวัตถุดิบ แม้ว่าหลังจากการต้มเยื่อที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น องค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีปริมาณลดลงกว่าส่วนอื่นๆ แต่ก็อาจมีองค์ประกอบที่ทำให้เกิดสีอยู่ในปริมาณที่มากกว่าส่วนอื่นๆ ของต้นข้าวโพดก็เป็นได้ ทำให้ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพดต่ำกว่าส่วนอื่นๆ ของต้นข้าวโพดอย่างเห็นได้ชัด



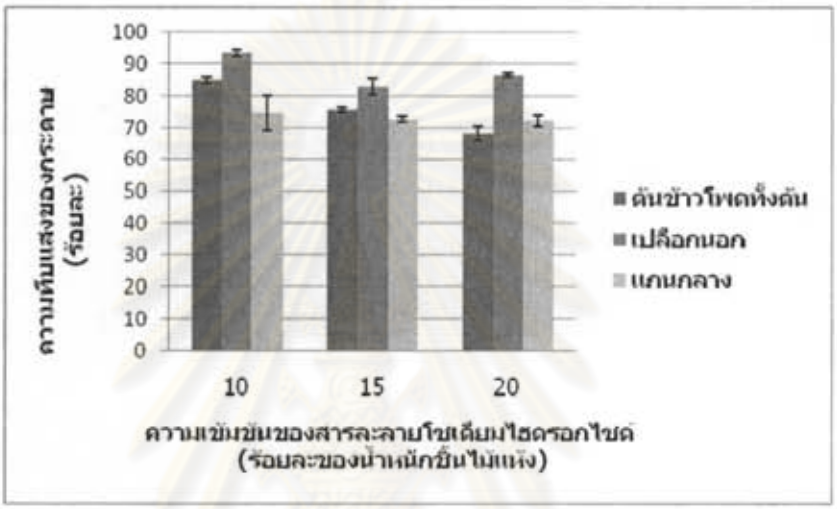
ภาพที่ 4-4 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด

4.1.8.2 ความทึบแสงของกระดาษ (opacity)

เมื่อพิจารณาค่าความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด ดังแสดงในตารางที่ 4-4 และภาพที่ 4-5 พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น ความทึบแสงของกระดาษจะลดลง เนื่องมาจากเส้นใยสามารถสร้างพันธะชิดกันได้มากขึ้นหลังจากที่ลิกนินถูกกำจัดออกไป [22] และจะเห็นได้ชัดในกรณีของกระดาษที่ผลิตจากส่วนเปลือกนอกและต้นข้าวโพดทั้งต้น ส่วนกระดาษที่ผลิตจากแกนกลางของต้นข้าวโพด พบว่า มีความทึบแสงของกระดาษไม่แตกต่างกันมากนัก

เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเท่ากัน จะพบว่า กระดาษที่ผลิตจากเปลือกนอกของต้นข้าวโพดนั้นมีค่าความทึบแสงที่สูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งต้นและส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพด ตามลำดับ เนื่องจากเยื่อที่ผลิตจากเปลือกนอกของต้นข้าวโพดมีสีที่ค่อนข้างเข้ม การดูดกลืนแสงของเส้นใยจึงทำได้มาก

ส่งผลให้แสงทะลุผ่านกระดาษได้น้อยลง ค่าความทึบแสงของกระดาษจึงมีค่าสูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดส่วนอื่นๆ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลความหนาแน่นของกระดาษ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยกระดาษที่มีความหนาแน่นต่ำ จะมีความทึบแสงของกระดาษที่สูง เนื่องจากกระดาษมีช่องว่างในการกระเจิงแสงมากนั่นเอง ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะการสร้างพันธะหรือการแนบชิดกันของเส้นใยในเนื้อกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงไว้ในภาพที่ 4-1 และ 4-2



ภาพที่ 4-5 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด

4.1.9 สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ

4.1.9.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ

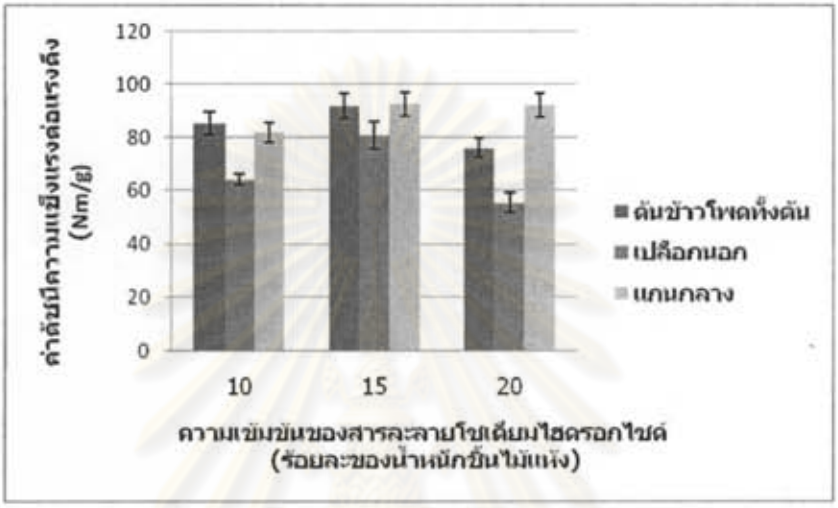
โดยปกติความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษนั้นจะขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างเส้นใย จากภาพที่ 4-6 จะเห็นว่า ที่สภาวะในการผลิตเยื่อที่มีการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง จะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าสภาวะในการผลิตเยื่ออื่นๆ ทั้งในส่วนของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งต้น ส่วนเปลือกนอกและแกนกลางของต้นข้าวโพด ทั้งนี้เป็นเพราะว่าลิกนินถูกกำจัดออกมากขึ้น เส้นใยจึงมีความเป็นอิสระมากขึ้นด้วย ส่งผลให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยในเนื้อกระดาษทำได้มากขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง จะเห็นว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้ง 3 ส่วน เริ่มมีค่าลดลงจาก

สภาวะในการผลิตเยื่อที่มีการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง โดยจะเห็นชัดในกรณีของส่วนเปลือกนอกและต้นข้าวโพดทั้งต้น ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากสภาวะในการผลิตเยื่อมีการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินไป โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบทางเคมีที่อยู่ในแต่ละส่วนของต้นข้าวโพด แล้วทำให้โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ส่งผลต่อความแข็งแรงและการสร้างพันธะของเส้นใย และบางส่วนของเซลลูโลสถูกทำลาย เป็นผลให้การสร้างพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษทำได้น้อยลง [40] ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ กัน ดังตารางที่ 4-2 จะเห็นว่า เฮมิเซลลูโลสหลังจากการต้มเยื่อมีปริมาณลดลงจากก่อนทำการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ปริมาณของเฮมิเซลลูโลสก็ยิ่งลดลง

เมื่อเปรียบเทียบกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด พบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากัน คือ ร้อยละ 10 และ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง กระดาษที่ผลิตจากส่วนแกนกลางและต้นข้าวโพดทั้งต้นจะให้ทั้งค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่แตกต่างกันไม่มากนัก แต่จะมีต่างกันในกรณีของกระดาษที่ผลิตจากส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพด ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากกระดาษที่ผลิตจากส่วนแกนกลางและต้นข้าวโพดทั้งต้น มีการสร้างพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษได้แข็งแรงมากกว่า เส้นใยมีการแนบชิดกันได้สูง ดังผลที่ได้จากการวิเคราะห์ลักษณะการสร้างพันธะหรือการแนบชิดกันของเส้นใยในเนื้อกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4-1 และ 4-2 อย่างไรก็ตาม กระดาษที่ผลิตจากส่วนแกนกลางต้นข้าวโพดนั้นไม่ค่อยเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นกระดาษ เนื่องจากผลผลิตของเยื่อที่ได้หลังจากการต้มเยื่อและสภาพระบายได้ของเยื่อค่อนข้างต่ำและต่ำกว่าส่วนอื่นๆ ของต้นข้าวโพดมาก ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในผลการทดลองข้อ 4.1.1 และ 4.1.3 นั่นเอง

ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากเปลือกนอกของต้นข้าวโพดและต้นข้าวโพดทั้งต้น ดังแสดงในภาพที่ 4-6 จะพบว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากัน กระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งต้นจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่สูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากเปลือกนอกของต้นข้าวโพดอย่างมีนัยสำคัญ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากส่วนของต้นข้าวโพดทั้งต้นนั้นจะประกอบไปด้วยส่วนของเปลือกนอกที่มีเส้นใยขนาดยาวเป็นส่วนใหญ่และส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพดที่มีเส้นใยขนาดสั้น ซึ่งมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงเป็นจำนวนมาก โดยเส้นใยในส่วนของแกนกลางที่อยู่ในต้นข้าวโพด

ทั้งต้นนี้น่าจะมีความสามารถในการแนบตัวและสร้างพันธะในเนื้อกระดาษที่ดีกว่าเส้นใยขนาดยาวจากส่วนของเปลือกนอกของต้นข้าวโพดเพียงอย่างเดียว จึงเป็นผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษเพิ่มขึ้น [40] ดังผลการวิเคราะห์ลักษณะการสร้างพันธะหรือการแนบชิดกันของเส้นใยในเนื้อกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงไว้ในภาพที่ 4-1 และ 4-2



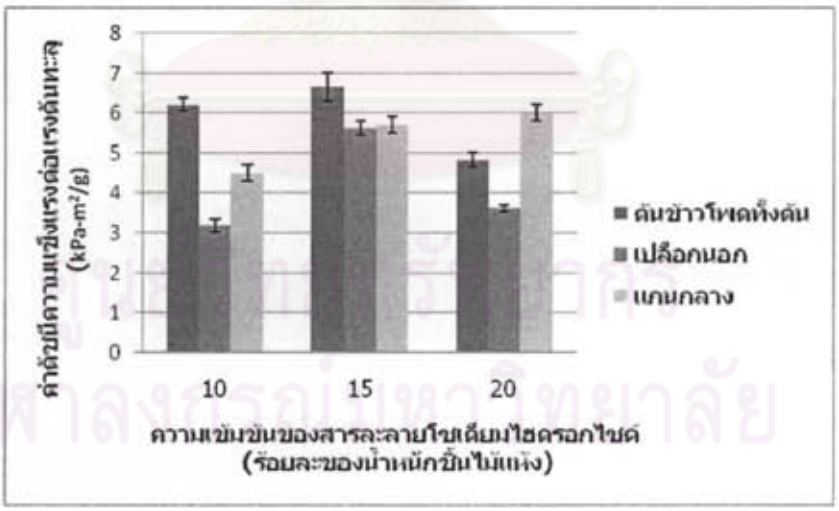
ภาพที่ 4-6 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าความดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด

4.1.9.2 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ

ปกติความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษนั้นจะขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างเส้นใย เช่นเดียวกับความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ จากผลการทดลองในภาพที่ 4-7 แสดงถึงผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ จะเห็นว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งต้นและส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพดมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่จะมีค่าลดลงเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ส่วนกระดาษที่ผลิตจากส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพดนั้น เมื่อเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากลิกนินถูกกำจัดออกมากขึ้น เส้นใยจึงมีความเป็นอิสระมากขึ้นด้วย ส่งผลให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยในเนื้อกระดาษทำได้มากขึ้นเช่นกัน [22] แต่หากสารเคมีที่ใช้ในการ

ต้มเยื่อมากเกินไป จะทำให้โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสและบางส่วนของเซลลูโลสถูกทำลาย เป็นผลให้การสร้างพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษด้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ กัน ดังตารางที่ 4-2

เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเท่ากัน กระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งต้นมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมากที่สุด และมีค่ามากกว่ากระดาษที่ผลิตจากส่วนเปลือกนอกและแกนกลางของต้นข้าวโพด อย่างไรก็ตาม กระดาษที่ผลิตจากส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพดนั้นมีแนวโน้มที่ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุเพิ่มสูงขึ้นได้อีก เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น แต่จากผลการทดลองข้อ 4.1.1 และ 4.1.3 กระดาษที่ผลิตจากส่วนแกนกลางนั้นไม่ค่อยเหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นกระดาษ เนื่องจากผลผลิตของเยื่อที่ได้หลังจากการต้มเยื่อและสภาพระบายได้ของเยื่อค่อนข้างต่ำ โดยต่ำกว่าส่วนอื่นๆ ของต้นข้าวโพดมาก ดังนั้นในการทดลองถัดไปจึงเลือกใช้ส่วนของต้นข้าวโพดทั้งต้นในการผลิตเยื่อและกระดาษ และสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้กระดาษที่ผลิตจากส่วนต้นข้าวโพดทั้งต้นของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว คือ ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง

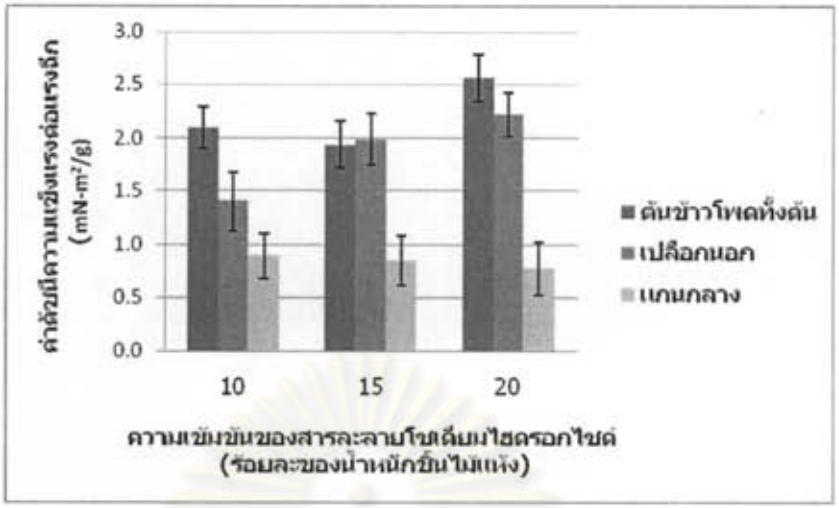


ภาพที่ 4-7 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าความดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด

4.1.9.3 ความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ

จากภาพที่ 4-8 แสดงถึงผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด ซึ่งโดยปกติความแข็งแรงต่อแรงฉีกขึ้นอยู่กับความแข็งแรง ความยาวของเส้นใยมากกว่าพันธะระหว่างเส้นใย จากผลการทดลองพบว่า สำหรับกระดาษที่ผลิตจากส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพด เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละความเข้มข้นที่ใช้ และจะมีค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนอื่นๆ ของต้นข้าวโพด ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยขนาดสั้นและเล็กมีปริมาณสูงมาก และสูงกว่าส่วนอื่นๆ ของต้นข้าวโพด ดังแสดงในตารางที่ 4-1 ในขณะที่กระดาษที่ผลิตจากส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพดนั้น เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ค่าดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีกของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะว่าลิกนินที่อยู่ในเส้นใยถูกกำจัดออกไปมากขึ้น เส้นใยเกิดการแยกออกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ มากขึ้น เป็นผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยเดี่ยวๆ สูงขึ้น [22] แต่การที่ค่าดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพดที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง มีค่าต่ำกว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งต้น อาจเพราะที่ความเข้มข้นนี้ทำให้ส่วนเปลือกนอกไม่สุก การแยกย่อยออกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ทำได้ไม่ดี ส่งผลให้ค่าดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีกต่ำกว่า และสำหรับกระดาษที่ผลิตจากส่วนต้นข้าวโพดทั้งต้นนั้นไม่พบแนวโน้มที่ชัดเจนในแต่ละสภาวะการต้มเยื่อ คือ เมื่อต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ค่าดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีกมีค่าลดลงจากความเข้มข้นร้อยละ 10 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง และกลับมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น จะทำให้เฮมิเซลลูโลสที่เหลืออยู่ในเยื่อน้อยลง ส่งผลให้สัดส่วนของเซลลูโลสที่เหลืออยู่ในเยื่อเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4-2 เป็นผลให้เส้นใยมีความแข็งแรงขึ้น ค่าดัชนีความต้านทานต่อแรงฉีกของกระดาษจึงมีค่าสูงขึ้นนั่นเอง

เมื่อเปรียบเทียบส่วนของต้นข้าวโพดที่ส่งผลถึงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก จะเห็นว่า กระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งต้นมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ ส่วนเปลือกนอกและส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพด ตามลำดับ



ภาพที่ 4-8 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าความดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพด

4.1.10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

จากผลของค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่อต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน โดยใช้ Two-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงในตารางที่ 4-5 จะเห็นว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน (A) มีผลต่อสมบัติทุกอย่างของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$) กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลให้สมบัติทุกอย่างของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเปลี่ยนแปลงไปเช่นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาค่า F คำนวณ (F_{cal}) และค่า F ที่ได้จากตาราง (F_{crit}) ดังแสดงในตารางที่ 4-6 จะเห็นว่า สมบัติทุกอย่างของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวจะมีค่า F_{cal} มากกว่า F_{crit} ($F_{cal} > F_{crit}$) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 นั่นแสดงว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ส่งผลต่อสมบัติทุกอย่างของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว

สำหรับการวิเคราะห์ผลของส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (B) ที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษ โดยใช้ Two-way ANOVA ดังแสดงในตารางที่ 4-5 พบว่า สมบัติทุกอย่างของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวทั้ง 3 ส่วน คือ ส่วนเปลือกนอก ส่วนแกนกลางและส่วนต้นข้าวโพดทั้งต้นนั้น มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-value $\leq$ 0.05) แสดงว่า ต้นข้าวโพดในแต่ละส่วนให้สมบัติต่างๆ ของกระดาษที่ต่างกัน และเมื่อพิจารณาค่า F คำนวณ (F_{cal}) และค่า F ที่ได้จากตาราง (F_{crit}) ดังแสดงในตารางที่ 4-6 จะเห็นว่า สมบัติทุกอย่างของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวจะมีค่า F_{cal} มากกว่า F_{crit} ($F_{cal} > F_{crit}$) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 นั่นแสดงว่า ต้นข้าวโพดทั้ง 3 ส่วน ส่งผลต่อสมบัติทุกอย่างของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4-5 ค่า P-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่อต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

สมบัติต่างๆ ของกระดาษ	A	B	A*B
1. ความหนา	0.000103*	9.63E-09*	0.002166*
2. ความหนาแน่น	0.007848*	1.83E-13*	0.02428*
3. ความขาวสว่าง	1.51E-63*	3.46E-64*	4.2E-55*
4. ความทึบแสง	9.38E-25*	2.17E-39*	4.16E-16*
5. ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	1.01E-07*	1.2E-12*	9.48E-05*
6. ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	8.58E-08*	1.81E-09*	7.28E-07*
7. ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก	0.011364*	8.76E-13*	0.01198*

หมายเหตุ A คือ ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน

B คือ ผลของส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว

A*B คือ ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กันและส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว

* คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-value $\leq$ 0.05)

ตารางที่ 4-6 ค่า F ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่อต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

สมบัติต่างๆ ของกระดาษ	A		B		A*B	
	F_{cal}	F_{crit}	F_{cal}	F_{crit}	F_{cal}	F_{crit}
1. ความหนา	11.9838	3.259446	32.18997	3.259446	5.160015	2.633532
2. ความหนาแน่น	5.562937	3.259446	73.82144	3.259446	3.18943	2.633532
3. ความขาวสว่าง	1400.176	3.109311	1453.621	3.109331	467.9134	2.484441
4. ความทึบแสง	118.2567	3.109311	324.3536	3.109331	32.3656	2.484441
5. ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	26.05319	3.259446	64.69641	3.259446	8.06383	2.633532
6. ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	26.44981	3.259446	37.08221	3.259446	13.64017	2.633532
7. ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก	5.08339	3.259446	66.16565	3.259446	3.745733	2.633532

หมายเหตุ A คือ ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน

B คือ ผลของส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว

A*B คือ ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กันและส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว

จากผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเยื่อจากต้นข้าวโพดทั้ง 3 ส่วนและหาส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ที่ให้สมบัติของกระดาษที่ดีที่สุด จะพบว่า เยื่อที่ผลิตจากส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพดไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการผลิตกระดาษ เนื่องจากมีปริมาณเส้นใยขนาดสั้นอยู่เป็นจำนวนมาก ค่าสภาพการระบายได้ของเยื่อและผลผลิตของเยื่อต่ำกว่าส่วนอื่นๆ ของต้นข้าวโพด แม้ว่าจะให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่ดีก็ตาม ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ส่วนต้นข้าวโพดทั้งต้นในการผลิตเยื่อและกระดาษจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เนื่องจากกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งต้นนั้นจะมีความขาวสว่าง ค่าดัชนี

ความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุของกระดาษที่ดีที่สุด อีกทั้งผลผลิตของเยื่อและสภาพระบายได้ของเยื่อก็อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม แม้ว่าจะมีความทึบแสงของกระดาษต่ำกว่ากระดาษที่ผลิตจากส่วนอื่นๆ ของต้นข้าวโพดก็ตาม

สำหรับสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อและกระดาษจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุดีที่สุดคือ การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง

ดังนั้น ในขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติของกระดาษทางการค้าที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ในการทดลองในตอนที่ 4 นั้น จึงเลือกใช้ต้นข้าวโพดทั้งต้น ที่ต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง

4.2 ผลการศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเยื่อจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ที่ให้สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ดีที่สุด

ผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 นี้เป็นส่วนหนึ่งของผลการทดลองที่ได้จากการทดลองตอนที่ 2 ซึ่งในส่วนแรกนี้เป็นการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ที่ให้สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ดีที่สุด จากนั้นจะนำผลที่ได้จากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ไปเปรียบเทียบกับต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ซึ่งจากผลการทดลองหาส่วนของต้นที่ดีที่สุดของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวในข้อ 4-1 พบว่า ส่วนของต้นข้าวโพดที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อและกระดาษ คือ ต้นข้าวโพดทั้งต้น ดังนั้น การผลิตเยื่อและกระดาษจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ จึงเลือกใช้ในส่วนของต้นข้าวโพดทั้งต้นในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อและกระดาษ โดยผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา ที่มีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ได้ผลการทดลองดังนี้

4.2.1 สมบัติทั่วไปของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

สมบัติต่างๆ ของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ได้แก่ ผลผลิตของเยื่อ ความยาวของเส้นใยและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กและสภาพระบายได้ของเยื่อได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-7

4.2.1.1 ผลผลิตของเยื่อ (%yield)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-7 จะเห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮ ดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มมากขึ้น ผลผลิตของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ นั่นแสดงว่า องค์ประกอบทางเคมีที่อยู่ในต้นข้าวโพดถูกกำจัดออกไปมากขึ้น ดังแสดงในผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพดทั้งก่อนและหลังการต้มเยื่อในตารางที่ 4-8 อย่างไรก็ตาม ผลผลิตของเยื่อไม่ได้แตกต่างกันมากนัก เมื่อใช้สารเคมีในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น

4.2.1.2 ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

จากตารางที่ 4-7 แสดงความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ที่ต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ กัน พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง แต่ไม่แตกต่างกันมากนัก และเมื่อพิจารณาปริมาณเส้นใยที่มีขนาดเล็กๆ จะเห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ปริมาณเส้นใยที่มีขนาดเล็กๆ มีปริมาณเพิ่มขึ้น นั่นแสดงว่า สารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อเข้าไปทำให้เส้นใยเกิดการแยกย่อยเป็นเส้นใยขนาดเล็กและสั้นมากขึ้น

4.2.1.3 สภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness)

จากผลการทดลองในตารางที่ 4-7 จะเห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มมากขึ้น สภาพระบายได้ของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ นั่นแสดงว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อทำให้เส้นใยเกิดการแยกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ มากขึ้น อีกทั้งยังทำให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดเล็กหลุดออกมามากขึ้นด้วย ซึ่งเส้นใยที่มีขนาดเล็กๆ ทำให้พื้นที่ผิวในการสัมผัสน้ำมาก การอุ้มน้ำของเส้นใยจึงเพิ่มขึ้น [22] ส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้ของเส้นใยมีค่าลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อมากขึ้น

ตารางที่ 4-7 สมบัติของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เมื่อต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

NaOH (%)	ค่าผลผลิตของเยื่อ (%yield ± SD)	ความยาวของเส้นใย (มิลลิเมตร ± SD)	เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (ไมโครเมตร ± SD)	ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (%fine ± SD)	ค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ (มิลลิลิตร)
10	39.04 ± 1.85	1.10 ± 0.10	22.85 ± 0.22	31.77 ± 2.92	488.25 ± 3.05
15	37.06 ± 0.17	1.08 ± 0.03	22.57 ± 0.20	33.43 ± 1.93	393.55 ± 1.65
20	36.96 ± 4.44	1.08 ± 0.01	22.45 ± 0.21	33.23 ± 1.71	358.70 ± 4.30
25	36.55 ± 0.09	1.05 ± 0.01	22.06 ± 0.23	35.50 ± 0.95	337.30 ± 4.20
30	36.22 ± 1.01	1.05 ± 0.02	21.41 ± 0.23	36.25 ± 1.13	301.40 ± 1.10

4.2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ โฮโลเซลลูโลส แอลฟาเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ของเส้นใยที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ทั้งที่ยังไม่ผ่านการต้มเยื่อและผ่านการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอดไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-8 ซึ่งจะเห็นว่า เมื่อทำการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น สัดส่วนของแอลฟาเซลลูโลสในเยื่อมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม สัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินในเยื่อกลับมีแนวโน้มลดต่ำลง นั่นก็แสดงว่าเมื่อทำการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ทำให้สัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยถูกกำจัดหรือละลายออกไปได้มากขึ้น และส่งผลให้สัดส่วนของเซลลูโลส (แอลฟาเซลลูโลส) ที่เหลืออยู่ในเยื่อหลังจากการต้มเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

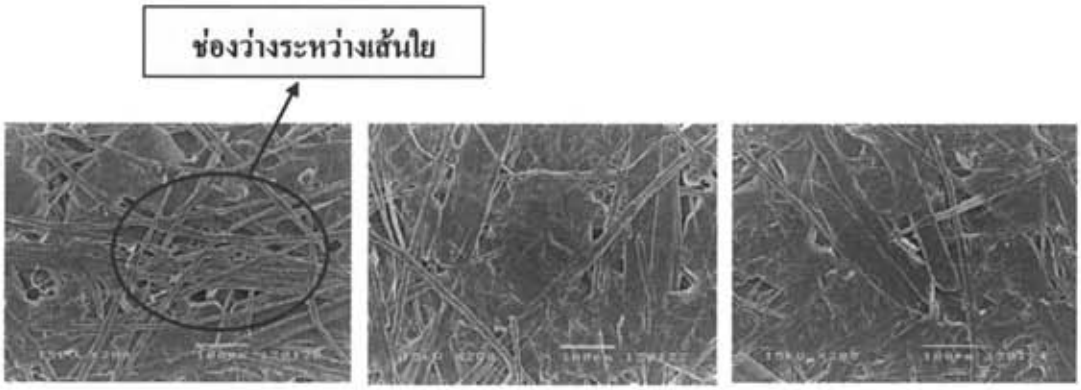
ตารางที่ 4-8 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ก่อนและหลังการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

ตัวอย่าง	องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (ร้อยละเทียบกับวัตถุดิบ)				
	โฮโลเซลลูโลส	แอลฟาเซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	อื่นๆ
ต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	74.68	42.08	32.60	20.31	5.01
เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์					
1. 10% NaOH	86.52	60.73	25.79	6.78	6.70
2. 15% NaOH	89.23	63.83	25.40	4.51	6.26
3. 20% NaOH	90.79	65.54	25.25	3.98	5.23
4. 25% NaOH	89.39	65.72	23.67	3.30	7.31
5. 30% NaOH	90.87	68.05	22.82	3.13	6.00

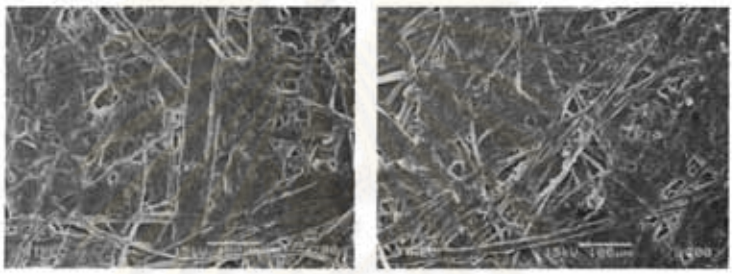
4.2.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกระดาษ

ลักษณะการสร้างพันธะหรือการแนบชิดกันของเส้นใยในเนื้อกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ได้แก่ ร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง โดยมองผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงไว้ในภาพที่ 4-9 และ 4-10 ซึ่งแสดงลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของกระดาษ ตามลำดับ

จากลักษณะพื้นผิวของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มมากขึ้น พื้นผิวของกระดาษมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น คือ ช่องว่างระหว่างเส้นใยแต่ละเส้นใยในเนื้อกระดาษน้อยลง การสร้างพันธะของเส้นใยทำได้มากขึ้นนั่นเอง ดังแสดงในภาพที่ 4-9 (ก)-(จ)



(ก) NaOH 10%　　(ข) NaOH 15%　　(ค) NaOH 20%



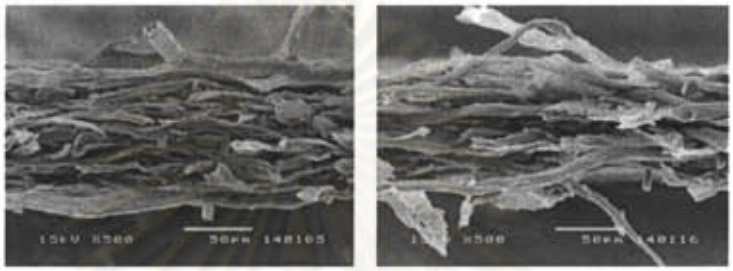
(ง) NaOH 25%　　(จ) NaOH 30%

ภาพที่ 4-9 ลักษณะพื้นผิวของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ที่กำลังขยาย 200 เท่า

สำหรับลักษณะภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มมากขึ้น เส้นใยแต่ละเส้นแต่ละชั้นมีลักษณะที่แนบชิดกันมากยิ่งขึ้น ช่องว่างระหว่างเส้นใยในแต่ละชั้นลดลงน้อยลง การสร้างพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษจึงเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 4-10 (ก)-(จ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ก) NaOH 10% (ข) NaOH 15% (ค) NaOH 20%



(ง) NaOH 25% (จ) NaOH 30%

ภาพที่ 4-10 ลักษณะภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์) เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ที่กำลังขยาย 200 เท่า

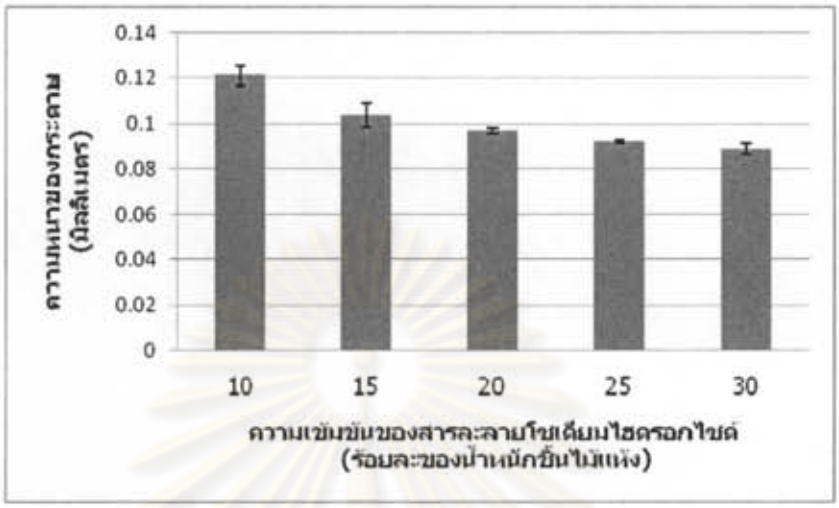
4.2.4 สมบัติต่างๆ ของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ผลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ส่งผลสมบัติต่างๆ ของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ได้แก่ ความหนา ความหนาแน่น สมบัติเชิงแสง และสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษต่างๆ มีดังต่อไปนี้

4.2.4.1 ความหนาของกระดาษ

ความหนาของกระดาษ โดยทั่วไปขึ้นอยู่กับการแนบชิดและความสามารถในการยุบตัวของเส้นใยในเนื้อกระดาษ หากน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษเท่ากัน กระดาษที่มีเนื้อแน่นการแนบชิดของเส้นใยสูง ความหนาของกระดาษจะน้อยลง ซึ่งจากผลการทดลองในภาพที่ 4-11 จะพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น ความหนาของกระดาษมีแนวโน้มลดต่ำลงเรื่อยๆ อย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นของ

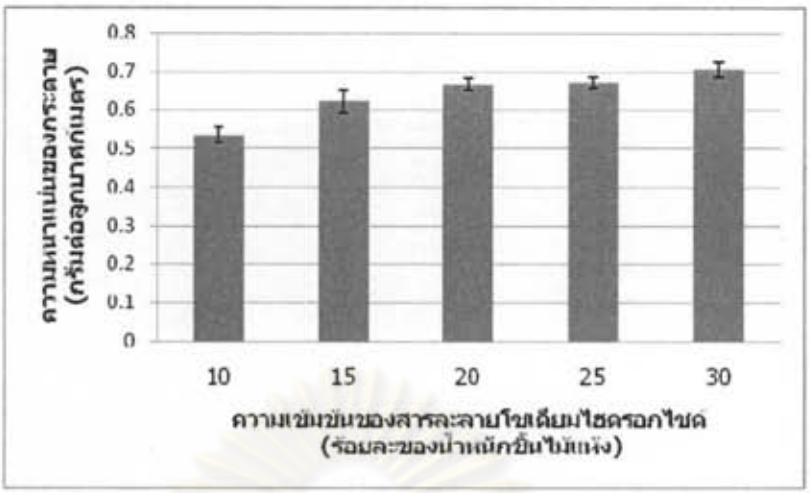
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 25 เป็น 30 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ความหนาของกระดาษจะเริ่มคงที่



ภาพที่ 4-11 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความหนาของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

4.2.4.2 ความหนาแน่นของกระดาษ

ความหนาแน่นของกระดาษจะมีค่ามากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับการแนบชิดกันของเส้นใยในเนื้อกระดาษ หากความหนาแน่นของกระดาษมีค่ามาก แสดงว่าเส้นใยในเนื้อกระดาษมีการแนบชิดกันได้เป็นอย่างดี ซึ่งส่งผลให้มีการสร้างพันธะระหว่างกันทำได้ดี ความแข็งแรงของกระดาษจึงสูง โดยความหนาแน่นของกระดาษจะเป็นค่าที่ผกผันกับความหนาของกระดาษ ที่น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษเท่ากัน กระดาษที่มีเนื้อแน่นจะบางกว่ากระดาษที่มีความฟ่าม (ฟู) [9, 22] ซึ่งจากผลการทดลองในภาพที่ 4-12 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นั่นแสดงว่า เส้นใยในเนื้อกระดาษมีการแนบชิด ยุบตัวและสร้างพันธะกันได้มากขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและความหนาของกระดาษ ดังแสดงในภาพที่ 4-10 และ 4-11 ตามลำดับ อีกทั้งยังสอดคล้องกับปริมาณองค์ประกอบทางเคมี คือ ลิกนินที่เหลืออยู่ในเส้นใยหลังการต้มเยื่อด้วยสารเคมีมีปริมาณน้อยลง ทำให้เส้นใยสามารถสร้างพันธะและแนบชิดกันได้มากยิ่งขึ้นด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4-8



ภาพที่ 4-12 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

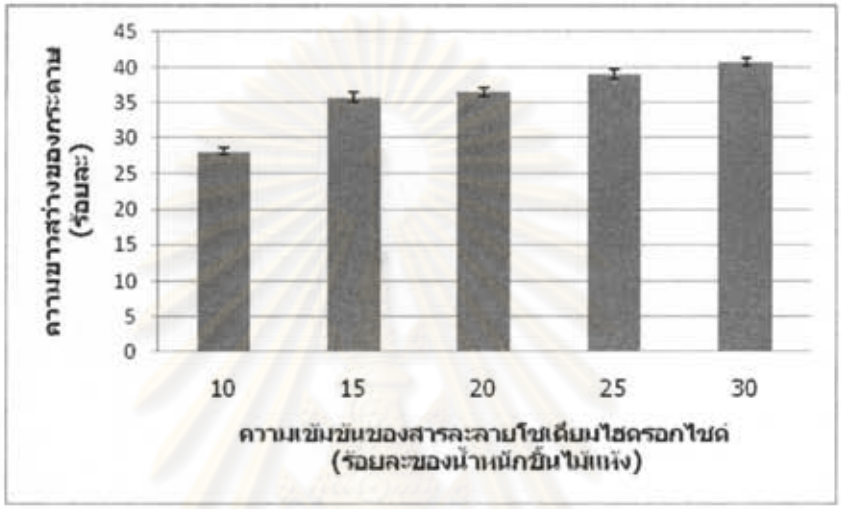
4.2.4.3 ความขาวสว่างของกระดาษ

จากภาพที่ 4-13 แสดงค่าความขาวสว่างของกระดาษ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น ค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษโดยตรงถูกกำจัดออกไปมากขึ้น [9, 10] ดังแสดงในผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ในตารางที่ 4-8 และค่าความขาวสว่างของกระดาษเริ่มที่จะมีแนวโน้นคงที่เมื่อมีการใช้สารเคมีในการต้มเยื่อมากขึ้น เป็นเพราะลิกนินเหลืออยู่ในเยื่อในปริมาณที่น้อยลงนั่นเอง

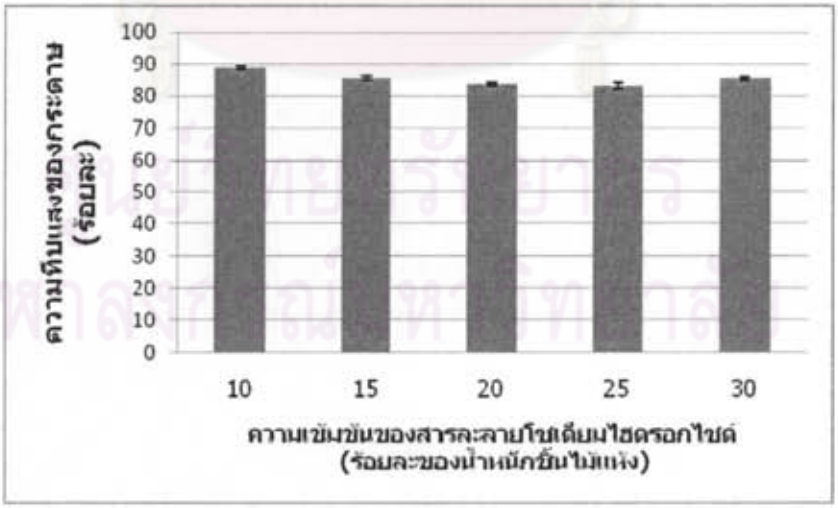
4.2.4.4 ความทึบแสงของกระดาษ

ความทึบแสงของกระดาษ ขึ้นอยู่กับความสามารถในการให้แสงทะลุผ่าน โดยกระดาษที่ทึบแสงอย่างสมบูรณ์ จะไม่มีแสงทะลุผ่านกระดาษจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่งได้ เมื่อพิจารณาค่าความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ดังแสดงในภาพที่ 4-14 จะพบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 ถึง 25 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ความทึบแสงของกระดาษจะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องมาจากเส้นใยสามารถแนบชิดกันได้มากขึ้น หลังจากที่ลิกนินถูกกำจัดออกไป [9, 10, 22] ทำให้ช่องว่างระหว่างเส้นใยน้อยลง การกระเจิงแสงของเส้นใยในเนื้อกระดาษจึงทำได้น้อยลง ส่งผลให้กระดาษมีความทึบแสงน้อยลง ดังแสดงในผลการวิเคราะห์

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย ในตารางที่ 4-8 อย่างไรก็ตาม เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ค่าความทึบแสงของกระดาษกลับมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีปริมาณที่สูงมากกว่าที่ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่ออื่นๆ ซึ่งเส้นใยที่มีขนาดเล็ก จะทำให้พื้นที่ผิวของเส้นใยในการกระเจิงแสงในเนื้อกระดาษทำได้มากขึ้น ส่งผลให้ความทึบแสงของกระดาษกลับมีค่าที่สูงขึ้น



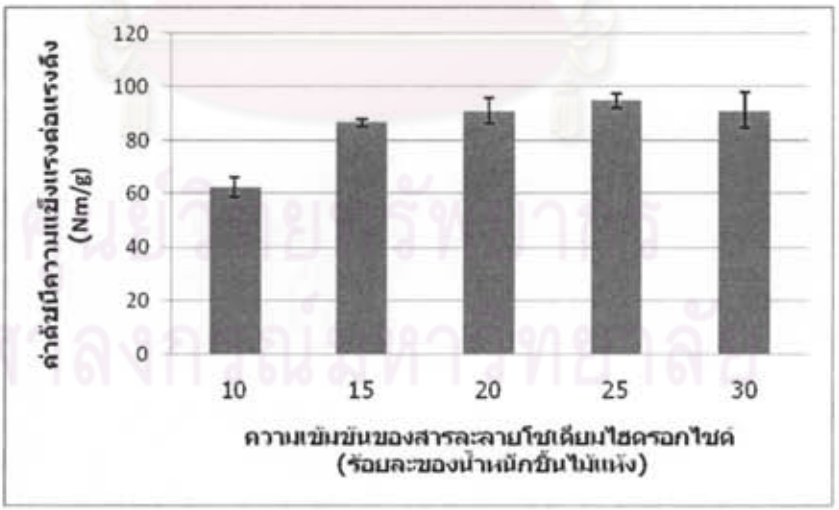
ภาพที่ 4-13 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์



ภาพที่ 4-14 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

4.2.4.5 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index)

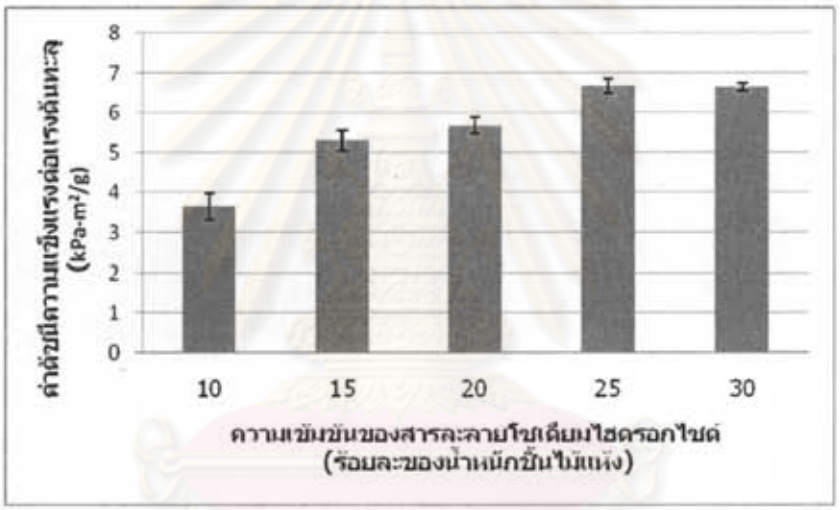
ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ เป็นความแข็งแรงที่ขึ้นกับพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษเป็นสำคัญ จากผลการทดลองในภาพที่ 4-15 จะเห็นว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 ถึง 25 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่จะมีแนวโน้มลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญมากนัก เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากลิกนินถูกกำจัดออกมากขึ้น เส้นใยจึงมีความเป็นอิสระมากขึ้นด้วย ส่งผลให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยในเนื้อกระดาษทำได้มากขึ้น แต่การที่ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษกลับมามีแนวโน้มลดลงนั้น อาจเนื่องจากสภาวะในการผลิตเยื่อมีการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินไป โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบทางเคมีที่อยู่ในต้นข้าวโพดแล้วทำให้โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสและบางส่วนของเซลลูโลสถูกทำลาย เป็นผลให้การสร้างพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษทำได้น้อยลง [40] นั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ กัน ดังตารางที่ 4-8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เฮมิเซลลูโลสหลังจากการต้มเยื่อมีปริมาณลดลงจากก่อนทำการต้มเยื่อ เมื่อมีการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง



ภาพที่ 4-15 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

4.2.4.6 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index)

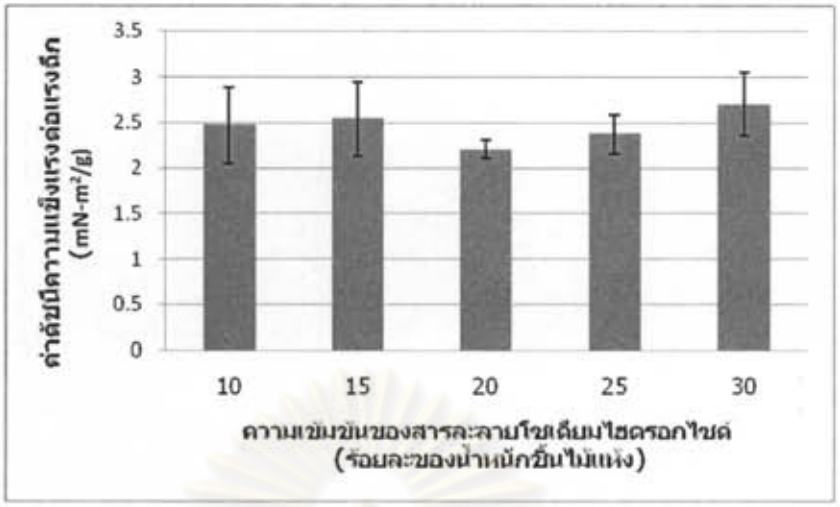
ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ เป็นความแข็งแรงที่ขึ้นกับพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษเป็นสำคัญ เช่นเดียวกับความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ จากผลการทดลองในภาพที่ 4-16 จะเห็นว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 ถึง 25 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่จะมีแนวโน้มเริ่มที่จะคงที่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง คือ เริ่มไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เหตุผลเช่นเดียวกับผลของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงในข้อ 4.2.4.5 ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น



ภาพที่ 4-16 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

4.2.4.7 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index)

ความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ โดยปกติจะมีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ความยาว ความแข็งแรง การสร้างพันธะของเส้นใย และทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยในเนื้อกระดาษ โดยปัจจัยที่มีผลอย่างมากคือ ความแข็งแรงของเส้นใย ซึ่งจากผลการทดลองในภาพที่ 4-17 จะเห็นว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน



ภาพที่ 4-17 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

4.2.5 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เมื่อต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน โดยใช้ One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงในตารางที่ 4-9 จะเห็นว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน จะส่งผลต่อสมบัติส่วนใหญ่ของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-value $\leq$ 0.05) แสดงว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน สามารถทำให้สมบัติต่างๆ ของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีความแตกต่างกัน ยกเว้นค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และเมื่อพิจารณาค่า F คำนวณ (F_{cal}) และค่า F ที่ได้จากตาราง (F_{crit}) จะเห็นว่า สมบัติส่วนใหญ่ของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะมีค่า F_{cal} มากกว่า F_{crit} ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ยกเว้นค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก นั่นแสดงว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ส่งผลต่อสมบัติส่วนใหญ่ของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ยกเว้นค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก

ตารางที่ 4-9 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เมื่อต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

สมบัติต่างๆ ของกระดาษ	P-value	F_{cal}	F_{crit}
1. ความหนา	1.16E-10*	57.1388	2.866081
2. ความหนาแน่น	3.44E-09*	39.12721	2.866081
3. ความขาวสว่าง	7.69E-39*	565.843	2.578739
4. ความทึบแสง	2.8E-16*	51.80535	2.578739
5. ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	3.41E-09*	39.16388	2.866081
6. ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	8.99E-14*	122.684	2.866081
7. ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก	0.300416	1.309372	2.866081

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

ดังนั้น จากผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ที่ให้สมบัติของกระดาษที่ดีที่สุด ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ทำให้ทราบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ คือ การใช้สารละลายที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 25 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง เนื่องจากเป็นสภาวะที่ให้สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ดีที่สุด คือให้สมบัติด้านความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุของกระดาษที่ดีที่สุด ในขณะที่ผลผลิตและสภาพระบายได้ของเยื่อที่ไม่ต่ำมากเกินไป อีกทั้งกระดาษที่ผลิตได้มีความขาวสว่างและความทึบแสงของกระดาษที่ดีอีกด้วย ดังนั้น จึงเลือกสภาวะนี้ในการผลิตเยื่อและกระดาษจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

อย่างไรก็ตาม ในการเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์นั้น จะใช้ผลที่ได้จากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10-20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้งเท่านั้น เนื่องจากสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว คือ สภาวะที่มีการใช้

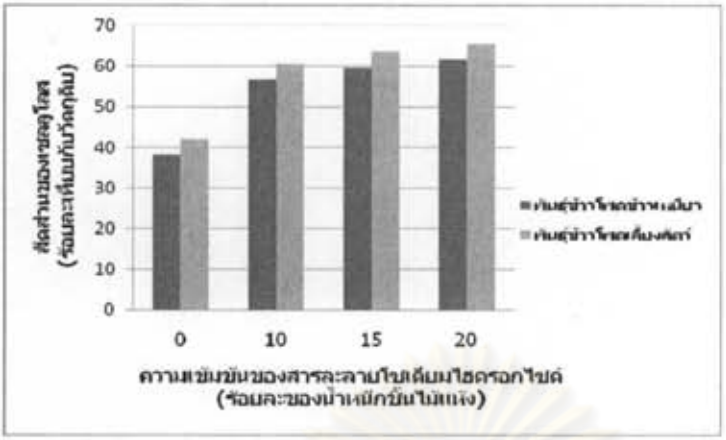
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ดังนั้นในการเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ จึงทำการเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใกล้เคียงกัน เพื่อที่จะศึกษาว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ใดที่ให้สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ดีกว่ากัน

4.3 ผลการเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ (พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์)

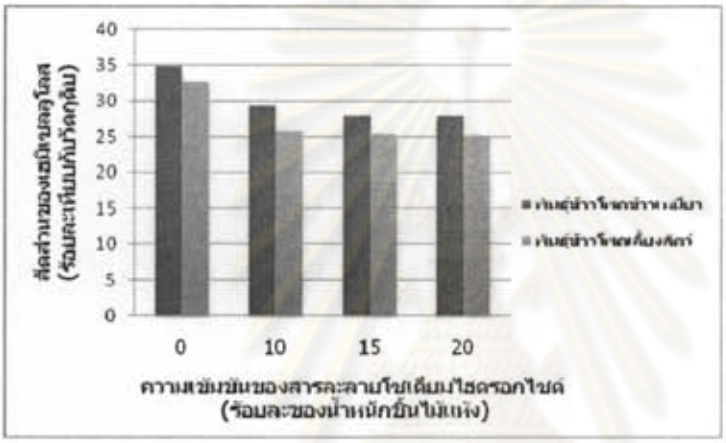
การเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ ในที่นี้คือ พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เป็นส่วนหนึ่งของการทดลองตอนที่ 2 เพื่อที่จะศึกษาว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ใดที่ให้สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ดีกว่ากัน เนื่องจากต้นข้าวโพดสองพันธุ์นี้เป็นข้าวโพดที่นิยมปลูกกันทั่วไปในประเทศไทย ซึ่งการทดลองให้ผลดังนี้

4.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ

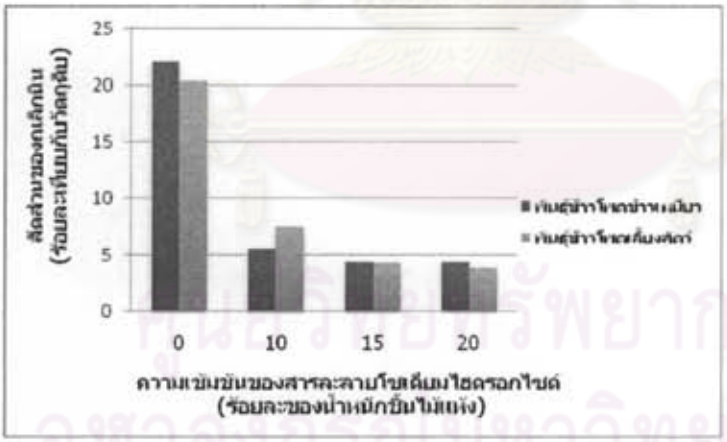
เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์กับพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ดังแสดงในภาพที่ 4-18 จะเห็นว่า เมื่อทำการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น สัดส่วนของเซลลูโลสที่เหลืออยู่ในเยื่อมีปริมาณเพิ่มขึ้น ในขณะที่เฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อมีสัดส่วนที่ลดลง และเมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อเท่ากัน พบว่า เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะมีเซลลูโลสในสัดส่วนที่สูงกว่าเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ดังแสดงในภาพที่ 4-18 (ก) สำหรับเฮมิเซลลูโลสและลิกนินหลังจากการต้มเยื่อ จะพบว่า ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะมีสัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่ต่ำกว่าต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ดังแสดงในภาพที่ 4-18 (ข) และ (ค) ซึ่งการที่ต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันนี้ จะส่งผลให้สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์มีความแตกต่างกันไม่มากก็น้อย โดยเฉพาะสมบัติเชิงแสงและสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ



(ก) สัดส่วนของเซลลูโลส



(ข) สัดส่วนของเฮมิเซลลูโลส



(ค) สัดส่วนของลิกนิน

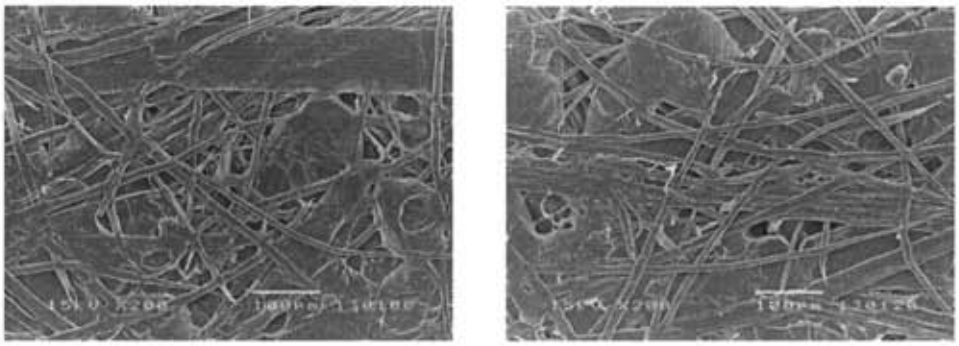
ภาพที่ 4-18 ผลการเปรียบเทียบปริมาณองค์ประกอบทางเคมีระหว่างต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวกับพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

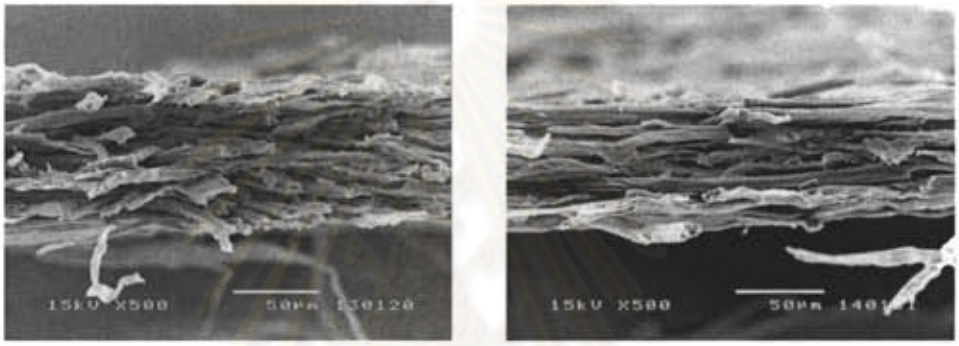
4.3.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกระดาษ

เมื่อทำการเปรียบเทียบลักษณะการสร้างพันธะหรือการแนบชิดกันของเส้นใยในเนื้อกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ทำให้สังเกตเห็นว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อร้อยละ 10 และ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้งเท่ากัน กระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ จะมีพื้นผิวของกระดาษ ช่องว่างระหว่างเส้นใย การแนบชิดและการสร้างพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังแสดงในภาพที่ 4-19 (ก)-(ง) และ 4-20 (ก)-(ง) ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง พื้นผิวและภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์เริ่มที่จะมีลักษณะที่แตกต่างกัน คือ พื้นผิวของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า นอกจากนั้นการแนบชิดและการสร้างพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษก็ทำได้มากกว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ดังแสดงในภาพที่ 4-21 (ก)-(ง)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



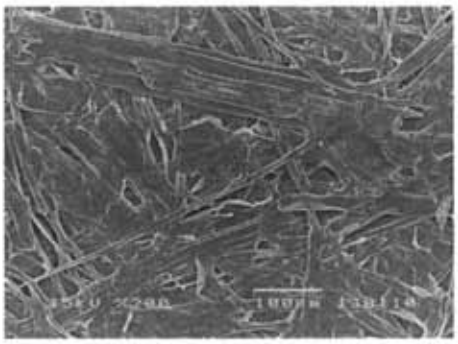
(ก) พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (ข) พันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์



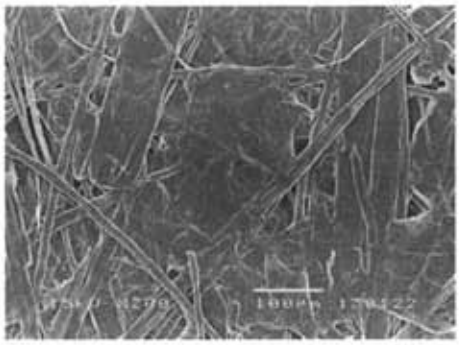
(ค) พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (ง) พันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ภาพที่ 4-19 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อร้อยละ 10 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง โดย (ก) และ (ข) ที่กำลังขยาย 200 เท่า ส่วน (ค) และ (ง) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

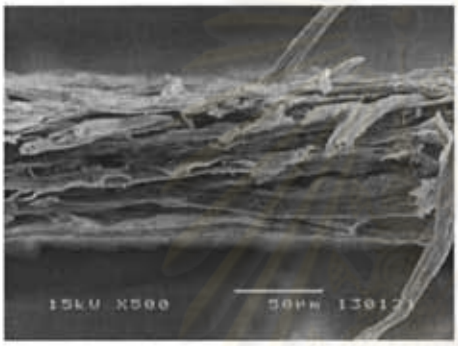
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



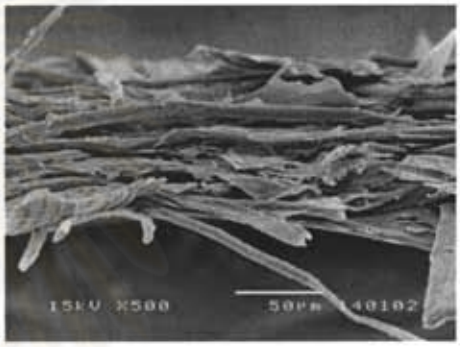
(ก) พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว



(ข) พันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์



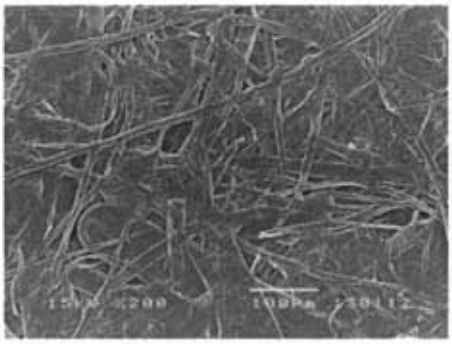
(ค) พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว



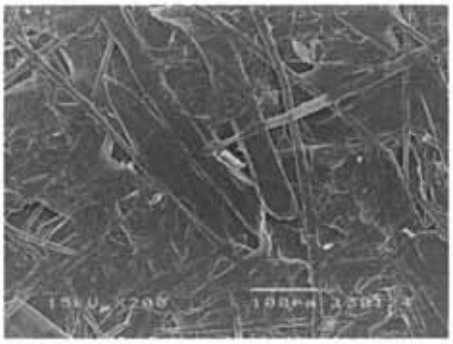
(ง) พันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ภาพที่ 4-20 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง โดย (ก) และ (ข) ที่กำลังขยาย 200 เท่า ส่วน (ค) และ (ง) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

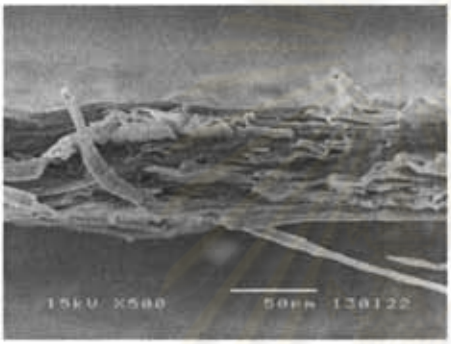
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



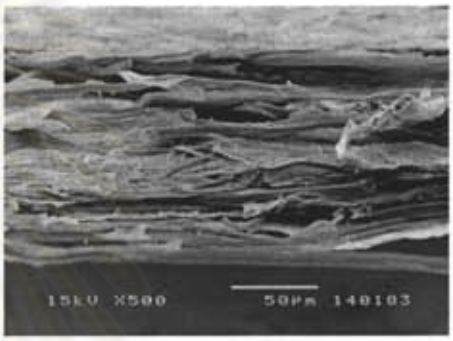
(ก) พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว



(ข) พันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์



(ค) พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว



(ง) พันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ภาพที่ 4-21 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง โดย (ก) และ (ข) ที่กำลังขยาย 200 เท่า ส่วน (ค) และ (ง) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

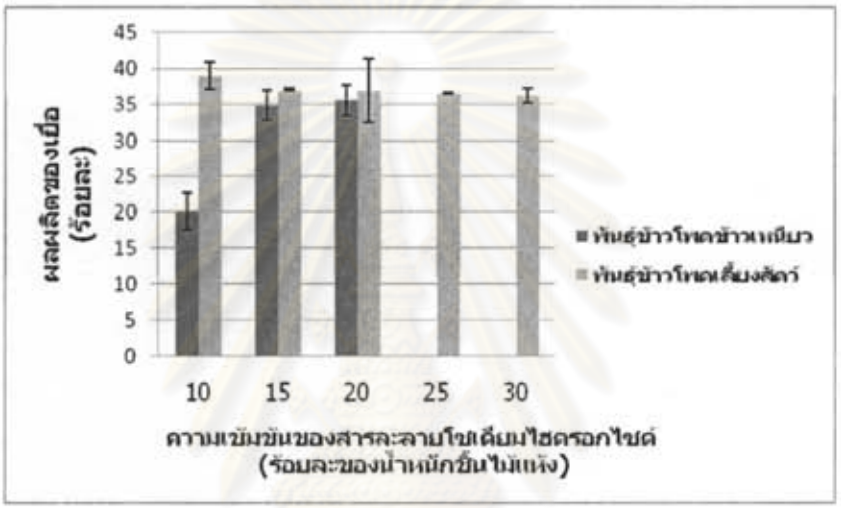
4.3.3 สมบัติทั่วไปของเยื่อ

เป็นการเปรียบเทียบสมบัติทั่วไปของเยื่อที่ผลิตได้จากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ ในที่นี้คือ พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ได้แก่ ผลผลิตของเยื่อ ความยาวของเส้นใยและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก และสภาพระบายได้ของเยื่อ ซึ่งจากการทดลองให้ผลดังนี้

4.3.3.1 ผลผลิตของเยื่อ (%yield)

เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตของเยื่อที่ผลิตได้จากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 4-22 จะ

เห็นว่า ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเท่ากัน ผลผลิตของเยื่อที่ได้จากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะสูงกว่าที่ได้จากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่สูงกว่าต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ซึ่งเป็นส่วนที่สามารถถูกทำลายได้ง่ายที่สุดในการต้มเยื่อ อีกทั้งที่ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อต่ำๆ ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวมีบางส่วนที่ต้มไม่สุก ทำให้ผลผลิตของเยื่อที่ได้หลังจากการต้มเยื่อมีค่าน้อยกว่าเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

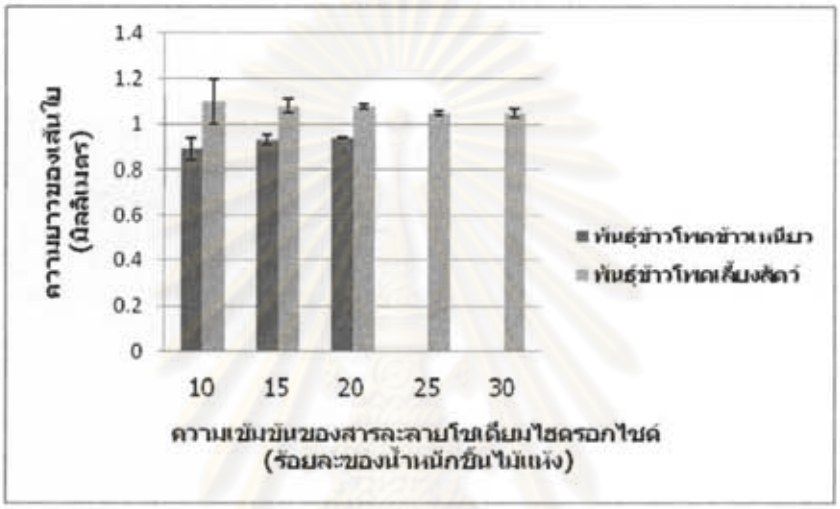


ภาพที่ 4-22 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อผลผลิตของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

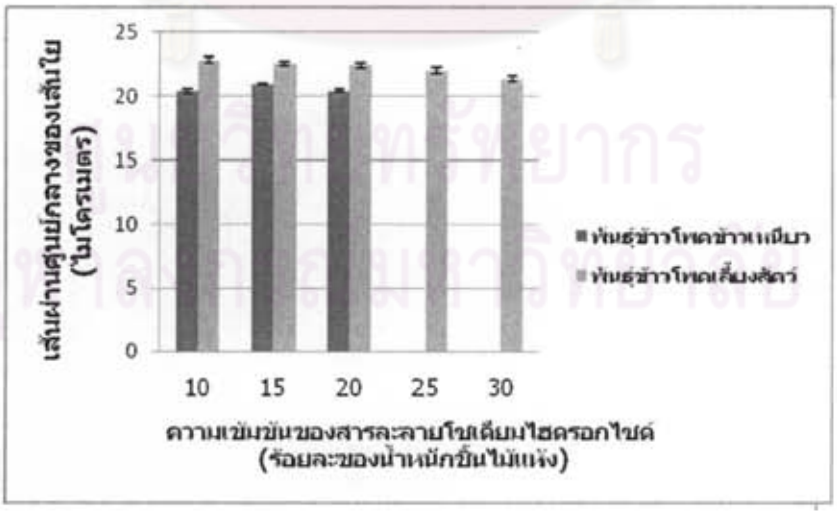
4.3.3.2 ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

เมื่อเปรียบเทียบขนาดความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 4-23 และ4-24 ตามลำดับ จะเห็นว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเท่ากัน เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะมีความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่สูงกว่าเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว และจะพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ มีความยาวของเส้นใยมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะมีขนาดที่น้อยลง เส้นใยมี

ลักษณะแคบลง ส่วนต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวนั้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ไม่เป็นแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน อาจเนื่องมาจากที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง นั้นยังมีต้นข้าวโพดบางส่วนที่ต้มไม่สุก ทำให้เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (FQA) รายงานผลออกมาเป็นค่ากระจุกเส้นใย (shives) และไม่ได้นำส่วนนี้มาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยด้วย อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันมากนักในแต่ละสภาวะ



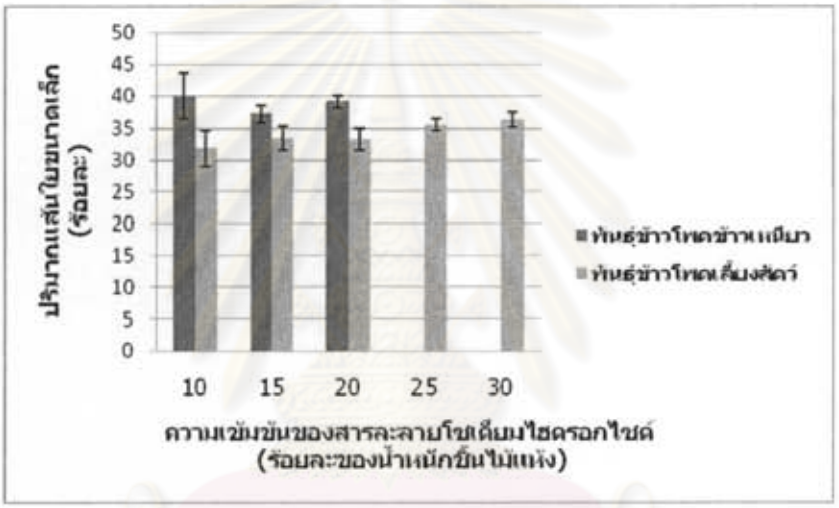
ภาพที่ 4-23 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความยาวของเส้นใยที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์



ภาพที่ 4-24 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

4.3.3.3 ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

สำหรับปริมาณของเส้นใยขนาดเล็กของต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ดังแสดงในภาพที่ 4-25 จะเห็นว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเท่ากัน ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวจะมีปริมาณของเส้นใยขนาดเล็กในปริมาณที่สูงกว่าต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ นั่นก็แสดงว่า เมื่อใช้สารเคมีในการต้มเยื่อในปริมาณที่เท่ากัน ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวอาจถูกทำลายด้วยสารเคมีได้ง่ายกว่าต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ทำให้เส้นใยเกิดการแยกย่อยเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ ได้ดี อีกทั้งยังเกิดเส้นใยที่มีขนาดสั้นๆ หลุดออกมาในปริมาณที่มากกว่าอีกด้วย

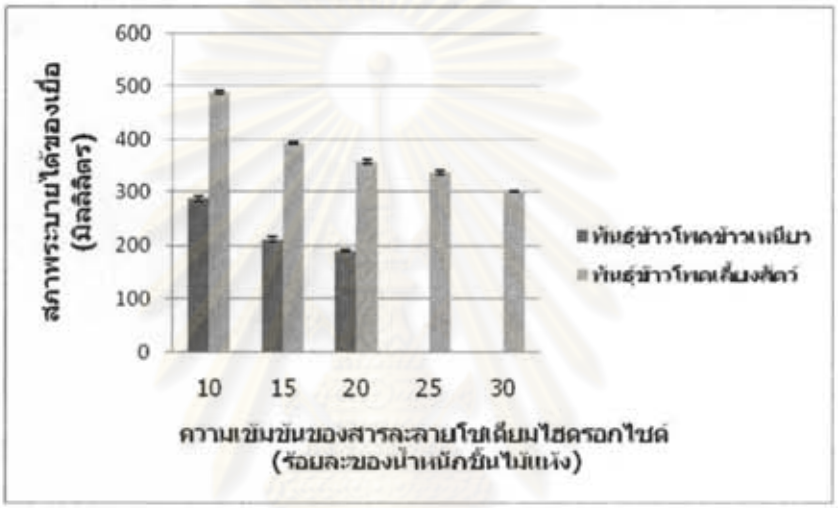


ภาพที่ 4-25 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

4.3.3.4 สภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness)

เมื่อเปรียบเทียบสภาพระบายได้ของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 4-26 จะเห็นว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเท่ากัน เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว มีสภาพระบายได้ของเยื่อที่ต่ำกว่าเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อย่างมีนัยสำคัญ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเส้นใยขนาดเล็ก (fines) มีปริมาณมาก ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4-25 ทำให้เส้นใยอุ้มน้ำได้สูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบสภาพระบายได้ของเยื่อ เมื่อมีการใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้น จะพบว่า สภาพระบายได้ของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์มีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อยๆ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อทำให้เส้นใยเกิดการแยกเป็นเส้นใยเดี่ยวๆ มากขึ้น อีกทั้งยังทำให้เกิดเส้นใยที่มีขนาดเล็กหลุดออกมามากขึ้นด้วย [22] ซึ่งเส้นใยที่มีขนาดเล็กๆ ทำให้พื้นที่ผิวในการสัมผัสน้ำมาก การอุ้มน้ำของเส้นใยจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสภาพระบายได้ของเส้นใยมีค่าลดลงเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อมากขึ้นนั่นเอง



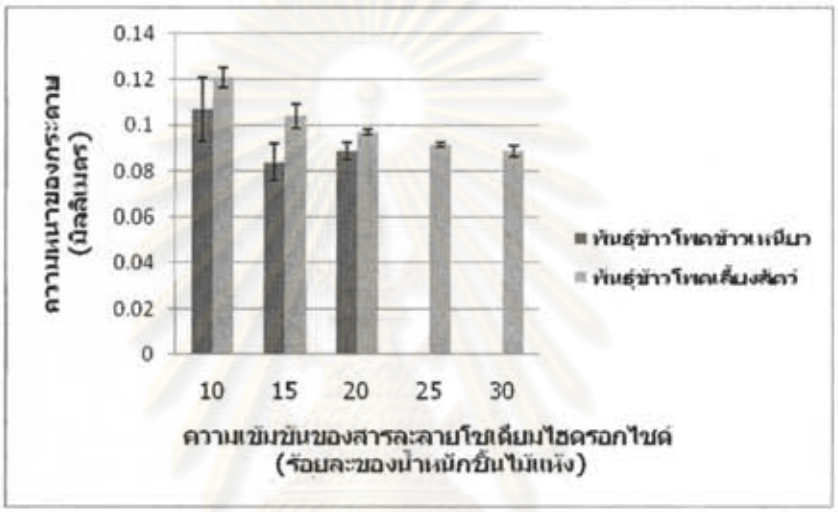
ภาพที่ 4-26 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อสภาพระบายได้ของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

4.3.4 สมบัติต่างๆ ของกระดาษ

4.3.4.1 ความหนาของกระดาษ

เมื่อเปรียบเทียบความหนาของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 4-27 จะเห็นว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเท่ากัน กระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีความหนาของกระดาษที่สูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเส้นใยจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวมีการยุบตัวได้ดี ทำให้พันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษทำได้มากขึ้น เป็นผลให้กระดาษมีความหนาลดลงนั่นเอง ดังแสดงในภาพ 4-19, 4-20 และ 4-21

อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ความหนาของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่าลดต่ำลงมากยิ่งขึ้นและจะพบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารเคมีมากกว่าร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ความหนาของกระดาษเริ่มที่จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับความหนาของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว นั่นก็แสดงว่า การแนบชิดและการสร้างพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวทำได้ดี เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อที่ต่ำกว่านั่นเอง

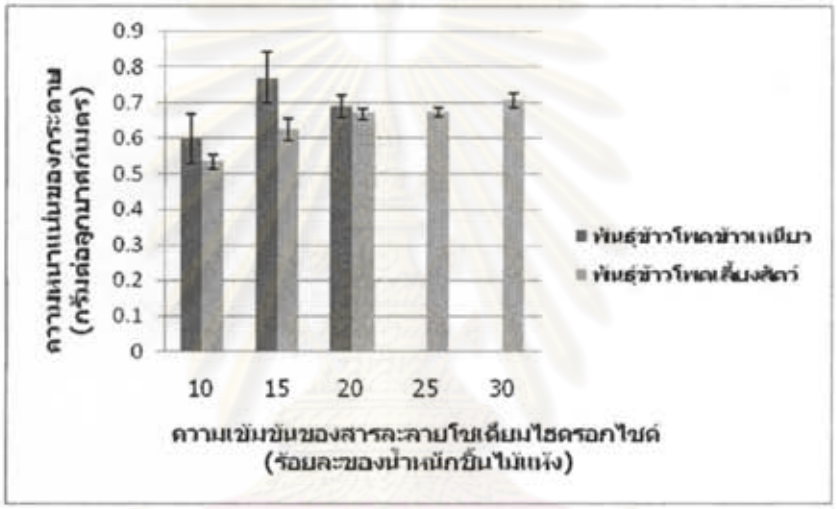


ภาพที่ 4-27 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความหนาของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

4.3.4.2 ความหนาแน่นของกระดาษ

เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 4-28 จะเห็นว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเท่ากัน ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวมีค่าสูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ส่วนความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวเหนียวกลับมีแนวโน้มที่จะลดลงมากขึ้น ซึ่งตามทฤษฎีไม่ควรเป็นเช่นนั้น เนื่องจากการใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ การกำจัดลิกนินออกน่าจะดีขึ้น เส้นใยเป็นอิสระและสามารถสร้าง

พันธะระหว่างกันได้ดีขึ้น กระดาษแนบตัวกันได้มากขึ้น ความหนาแน่นของกระดาษจึงควรเพิ่มขึ้น ดังเห็นได้จากผลผลที่ได้จากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ แต่ในกรณีของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวนั้น มีแนวโน้มตามนี้ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง แต่เมื่อเพิ่มเป็นร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง กลับให้ผลตรงข้าม คือ ความหนาแน่นของกระดาษกลับลดลง ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่ามีความคาดเคลื่อนของการใช้แรงกดรีดในการเอาน้ำออกในระหว่างช่วงของการขึ้นแผ่นกระดาษ เพราะเวลากดที่ใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษย่อมมีผลต่อความหนาและความหนาแน่นของกระดาษเช่นเดียวกัน

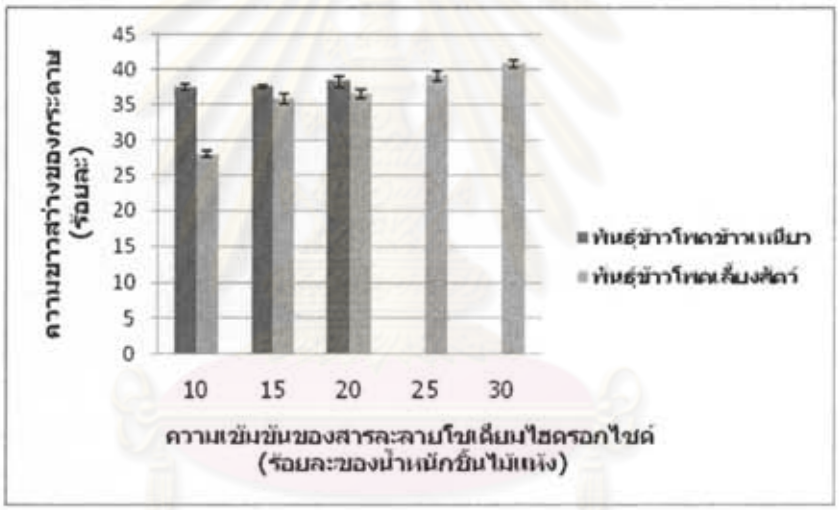


ภาพที่ 4-28 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

4.3.4.3 ความขาวสว่างของกระดาษ

เมื่อเปรียบเทียบความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 4-29 จะเห็นว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปริมาณลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ทำให้เยื่อเกิดสีเหลือง ถูกกำจัดออกไปมากยิ่งขึ้น ทำให้กระดาษมีความขาวสว่างมากขึ้นนั่นเอง [9, 10, 22] ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ดังแสดงในภาพที่ 4-18 โดยจะเห็นได้ชัดในกรณีของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเท่ากัน ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวมีค่าสูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ แม้ว่าต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวจะมีลิกนินในปริมาณที่มากกว่าต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ก็ตาม ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวมีสีค่อนข้างเขียว ในขณะที่ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีสีค่อนข้างเหลือง ซึ่งอาจเกิดจากรงควัตถุที่ทำให้เกิดสี เช่น คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) ที่มีสีเขียว แคโรทีน (carotene) ที่มีสีเหลืองและสีส้ม หรือแอนโทรไซยานิน (anthocyanin) ที่มีสีแดงและสีม่วง [41] ในต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์มีปริมาณที่แตกต่างกัน ทำให้ค่าความขาวสว่างของกระดาษซึ่งเป็นการวัดการสะท้อนแสงในช่วงแสงสีน้ำเงินของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวมีค่าสูงกว่า

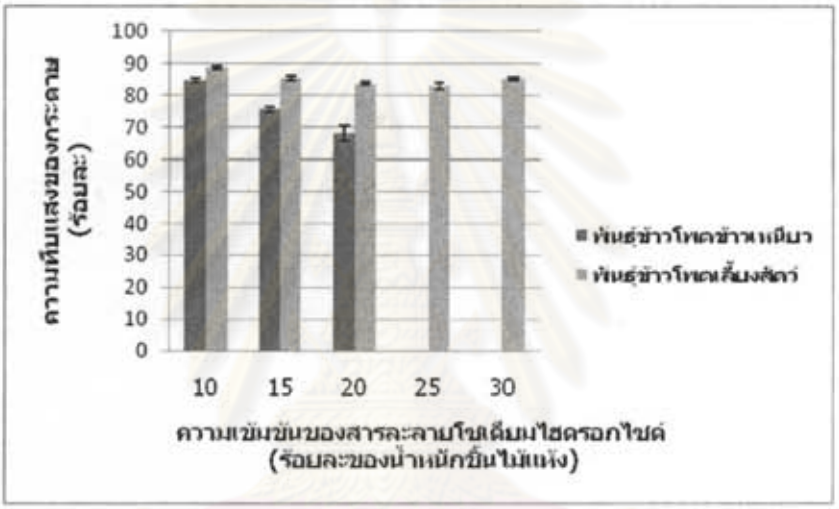


ภาพที่ 4-29 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

4.3.4.4 ความทึบแสงของกระดาษ

เมื่อเปรียบเทียบความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 4-30 จะเห็นว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเท่ากัน ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่าสูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เนื่องจากความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพด

พันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่าต่ำกว่าพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ดังแสดงในภาพที่ 4-28 ทำให้การกระเจิงแสงในเนื้อกระดาษทำได้มาก ความทึบแสงของกระดาษจึงมีค่าสูงกว่า และเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์มีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากปริมาณลิกนินถูกกำจัดออกไปมากยิ่งขึ้น ทำให้การแนบชิดและการสร้างพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษทำได้มากขึ้น ช่องว่างระหว่างเส้นใยน้อยลง การกระเจิงแสงของเส้นใยในเนื้อกระดาษทำได้ลดลง ความทึบแสงของกระดาษจึงมีค่าลดลงนั่นเอง [9, 10, 22] ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกันปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ ดังแสดงในภาพที่ 4-18

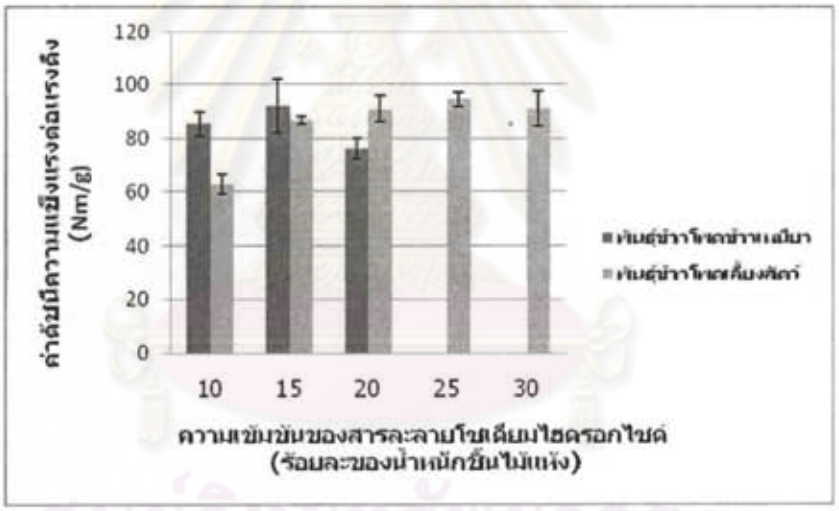


ภาพที่ 4-30 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

4.3.4.5 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index)

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 4-31 จะเห็นว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อร้อยละ 10 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง จะพบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวมีค่าสูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง จะเห็นว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ เริ่มมีแนวโน้มที่จะมีค่าใกล้เคียงกันจนไม่มีความแตกต่างกันมากนัก และเมื่อพิจาณาที่ความเข้มข้น

ร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง จะเห็นว่า กระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์กลับมีค่าสูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวอย่างเห็นได้ชัด และจะมีความแตกต่างกันมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 25 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง นั่นแสดงว่า กระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ยังสามารถมีการสร้างพันธะกันได้มากขึ้น เมื่อมีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นได้อีก เนื่องจากลิกนินถูกกำจัดออกมากขึ้น เส้นใยสามารถสร้างพันธะระหว่างกันได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจะเริ่มมีแนวโน้มคงที่ เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง นั่นก็แสดงว่า การสร้างพันธะและการแนบชิดกันของกระดาษเริ่มทำได้น้อยลง ดังนั้น ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวจะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อได้ดีกว่าและใช้ปริมาณสารเคมีในการผลิตเยื่อปริมาณน้อยกว่าต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เมื่อต้องการค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่เท่ากันนั่นเอง

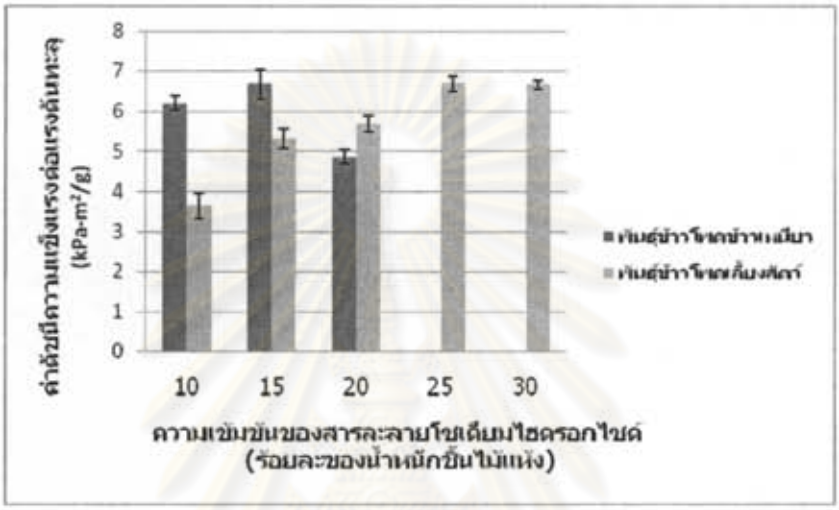


ภาพที่ 4-31 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

4.3.4.6 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index)

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 4-32 จะเห็นว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อร้อยละ 10 และ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง พบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของ

กระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวมีค่าสูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง จะเห็นว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่าสูงกว่า ซึ่งค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ ดังแสดงในภาพที่ 4-31

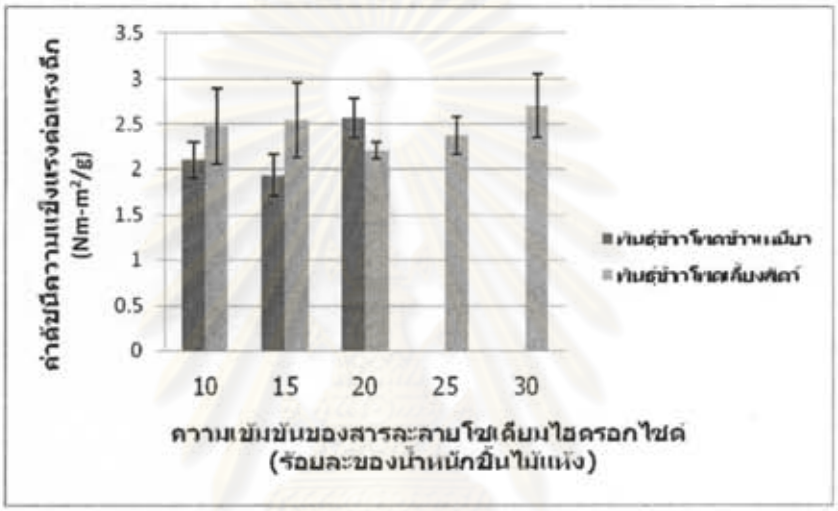


ภาพที่ 4-32 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

4.3.4.7 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index)

ความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ โดยปกติจะมีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ความยาว ความแข็งแรง การสร้างพันธะของเส้นใย และทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยในเนื้อกระดาษ โดยปัจจัยที่สำคัญที่สุด คือ ความแข็งแรงของเส้นใย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 4-33 จะเห็นว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อร้อยละ 10 และ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่าสูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากผลของความยาวของเส้นใย ดังแสดงในภาพที่ 4-23 ซึ่งจะเห็นว่า ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะมีขนาดความยาวของเส้นใยที่สูงกว่าต้นพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว แต่เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ค่าดัชนีความ

แข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวจะมีค่ามากกว่า และเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 25 และ 30 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์กลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากเส้นใยขนาดเล็กๆ สามารถลอดผ่านตะแกรงขึ้นแผ่นได้มากขึ้น เป็นผลให้ในเนื้อกระดาษมีเส้นใยขนาดยาวมากขึ้นนั่นเอง อย่างไรก็ตามค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์มีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนมากนัก



ภาพที่ 4-33 เปรียบเทียบผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

จากผลการเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ ในที่นี้คือ พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เพื่อศึกษาว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ใดที่ให้สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ดีกว่ากัน ทำให้ทราบว่า ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวสามารถผลิตเยื่อได้ที่สภาวะในการต้มเยื่อที่เบากว่า (milder condition) ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 และ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวจะให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษทั้งความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุของกระดาษที่สูงกว่าต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ รวมถึงความขาวสว่างและความหนาแน่นของกระดาษก็มีค่าที่สูงกว่าด้วย อย่างไรก็ตามค่าความทึบแสงของกระดาษ สภาพระบายได้ของเยื่อ ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะมีค่าต่ำกว่า แต่เมื่อสภาวะในการต้มเยื่อรุนแรงขึ้น (ความเข้มข้นร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักชิ้นไม้

แห้ง) ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่สูงกว่าต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว รวมถึงค่าความทึบแสง ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยก็มีค่าสูงกว่าเช่นกัน นั่นก็แสดงว่า สภาวะในการผลิตเยื่อและกระดาษของต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ที่มีความแตกต่างกัน จะส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษที่แตกต่างกันด้วยเช่นกัน

ดังนั้น หากต้องการสมบัติด้านความแข็งแรงที่เท่ากัน ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อได้ดีกว่าและใช้ปริมาณสารเคมีในการผลิตเยื่อปริมาณน้อยกว่าต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ แต่อย่างไรก็ตามต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สามารถให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่สูงกว่า เมื่อต้มเยื่อในสภาวะที่เหมาะสม

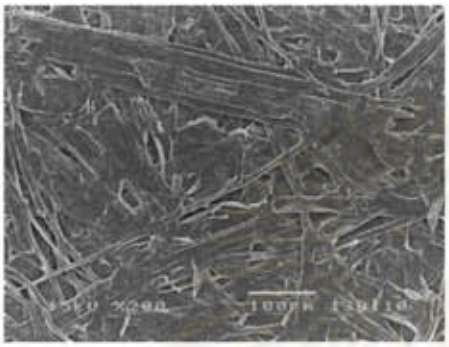
4.4 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อและกระดาษ

ผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.4 นี้ เป็นผลการทดลองที่ได้จากการทดลองในตอนที่ 3 ซึ่งเป็นการนำเยื่อที่เตรียมได้จากสภาวะที่ดีที่สุดของต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ในที่นี้คือ ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ที่ต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง และต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ที่ต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 25 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง มาทำการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง อุณหภูมิการฟอกเยื่อที่ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที และค่าความเป็นกรด-เบส (pH) คงที่ 10 ± 0.2 เพื่อศึกษาผลของการฟอกเยื่อที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ โดยจะทำการเปรียบเทียบกับสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ก่อนฟอกเยื่อ ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

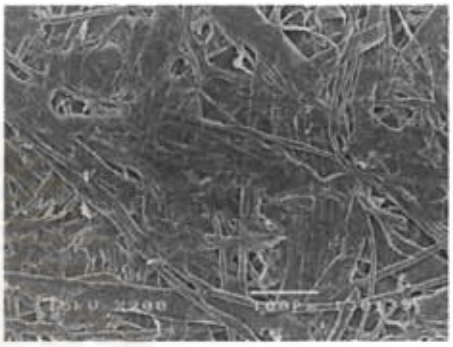
4.4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ เมื่อผ่านการฟอกเยื่อ

ภาพที่ 4-34 และภาพที่ 4-35 แสดงลักษณะการสร้างพันธะและการแนบชิดกันของเส้นใยในเนื้อกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดก่อนและหลังการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตามลำดับ จะเห็นว่า พื้นผิวของกระดาษที่ผลิต

จากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ทั้งก่อนและหลังการฟอกเยื่อมีลักษณะที่แตกต่างกัน และเมื่อสังเกตภาคตัดขวางของกระดาษ จะเห็นว่า เส้นใยในเนื้อกระดาษที่ผ่านการฟอกเยื่อมีลักษณะที่โค้งงอค่อนข้างหลุดลุ่ย และเส้นใยมีขนาดสั้นกว่าเส้นใยในกระดาษก่อนฟอกเยื่อ ซึ่งลักษณะแบบนี้อาจทำให้การสร้างพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษทำได้ไม่ดีมากนัก

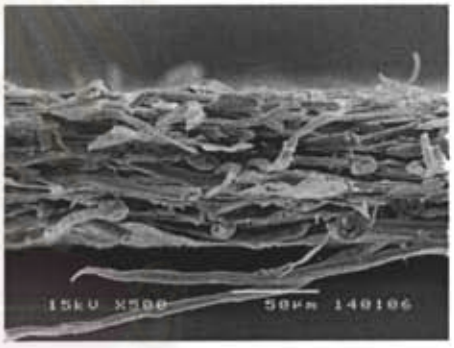


(ก) ก่อนฟอกเยื่อ



(ข) หลังฟอกเยื่อ

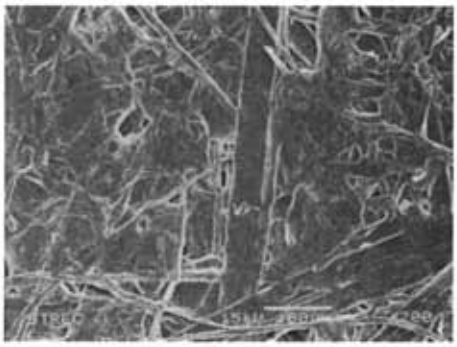
(ค) ก่อนฟอกเยื่อ



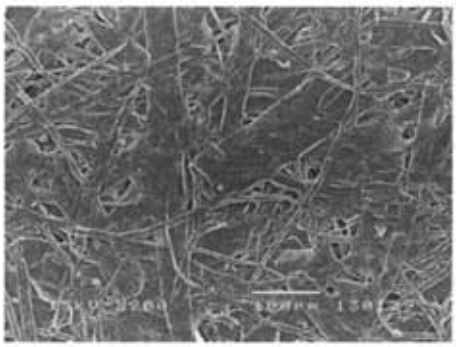
(ง) หลังฟอกเยื่อ

ภาพที่ 4-34 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ก่อนและหลังฟอกเยื่อ โดย (ก) และ (ข) ที่กำลังขยาย 200 เท่า ส่วน (ค) และ (ง) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

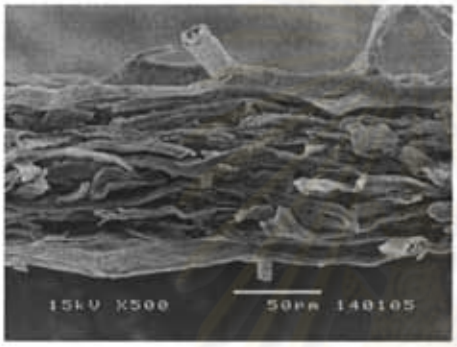
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



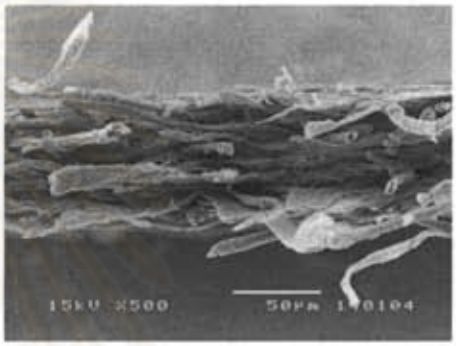
(ก) ก่อนฟอกเยื่อ



(ข) หลังฟอกเยื่อ



(ค) ก่อนฟอกเยื่อ



(ง) หลังฟอกเยื่อ

ภาพที่ 4-35 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ก่อนและหลังฟอกเยื่อ โดย (ก) และ (ข) ที่กำลังขยาย 200 เท่า ส่วน (ค) และ (ง) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

4.4.2 สมบัติทั่วไปของเยื่อ ก่อนและหลังการฟอกเยื่อ

การเปรียบเทียบผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่มีต่อสมบัติทั่วไปของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ ในที่นี้คือ ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง (15%W) และต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 25 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง (25%F) ได้แก่ ผลผลิตของเยื่อ ความยาวของเส้นใยและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กและสภาพระบายได้ของเยื่อ ซึ่งจากการทดลองให้ผลดังนี้

4.4.2.1 ผลผลิตของเยื่อ (%yield)

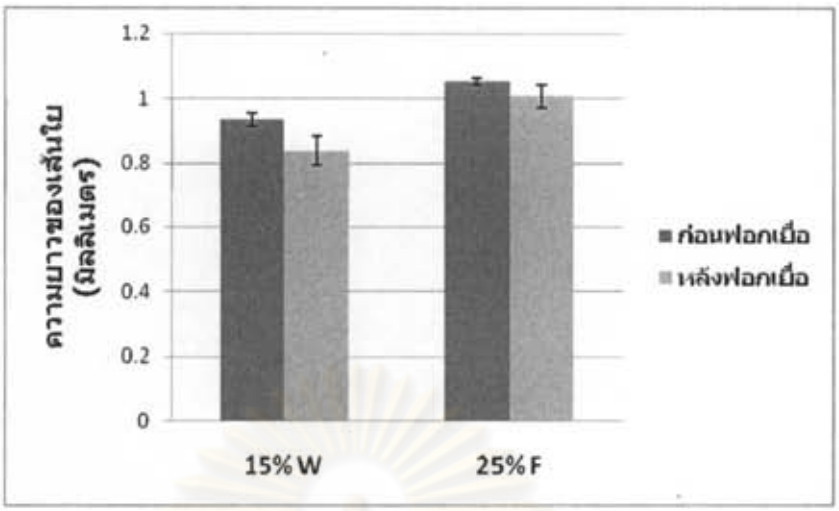
หลังจากการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง พบว่าผลผลิตของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวลดลงไปเท่ากับร้อยละ 19.60 ส่วนเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ผลผลิตของเยื่อจะลดลงเท่ากับร้อยละ 22.31 นั่นก็แสดงว่า เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ หายไปในขณะฟอกเยื่อในปริมาณที่สูงกว่าเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว

4.4.2.2 ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดความยาวของเส้นใยที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ทั้งก่อนและหลังฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4-36 และ 4-37 จะเห็นว่า ความยาวของเส้นใยหลังจากการฟอกเยื่อมีค่าลดลงทั้งต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ แต่จะเห็นได้ชัดในกรณีของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจาก ความสัมพันธ์ของปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (fines) คือ ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวหลังจากการฟอกเยื่อ มีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้นจากก่อนฟอกเยื่อ (ภาพที่ 4-38) ทำให้สัดส่วนของความยาวและความกว้างของเส้นใยหลังการฟอกเยื่อมีค่าลดลง แต่สำหรับต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์นั้นปริมาณเส้นใยขนาดเล็กก่อนและหลังการฟอกเยื่อไม่แตกต่างกัน ทำให้ความยาวและความกว้างของเส้นใยก่อนและหลังการฟอกเยื่อไม่มีความแตกต่างกันนั่นเอง

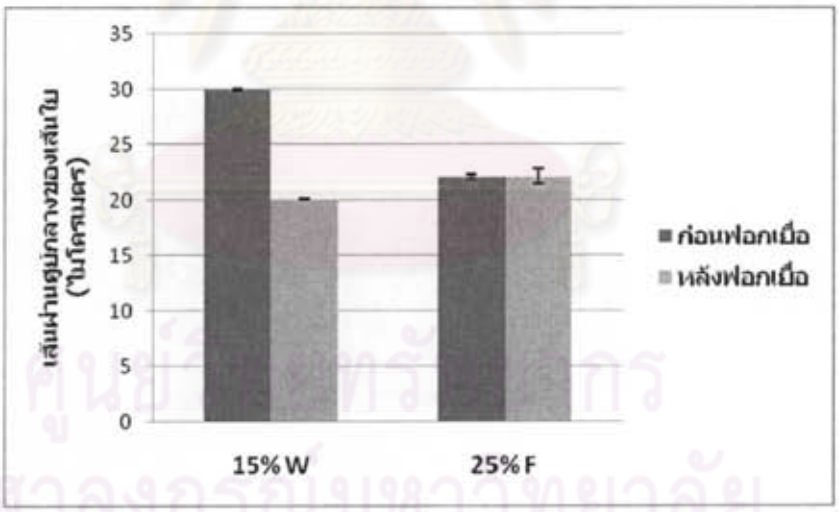
4.4.2.3 ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณของเส้นใยขนาดเล็กที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ทั้งก่อนและหลังฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4-38 จะเห็นว่า ปริมาณของเส้นใยขนาดเล็กหลังจากการฟอกเยื่อทั้งต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นได้มากในกรณีของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว



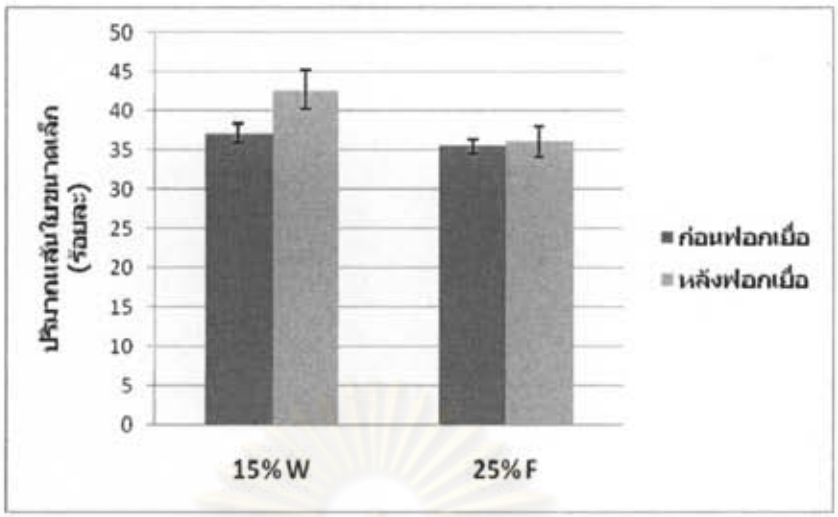
หมายเหตุ : 15%W = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ต้มเยื่อด้วย 15% NaOH , 25%F = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ต้มเยื่อด้วย 25% NaOH

ภาพที่ 4-36 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อความยาวของเส้นใยที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์



หมายเหตุ : 15%W = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ต้มเยื่อด้วย 15% NaOH , 25%F = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ต้มเยื่อด้วย 25% NaOH

ภาพที่ 4-37 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์



หมายเหตุ : 15%W = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ต้มเยื่อด้วย 15% NaOH , 25%F = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ต้มเยื่อด้วย 25% NaOH

ภาพที่ 4-38 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อปริมาณของเส้นใยขนาดเล็กที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

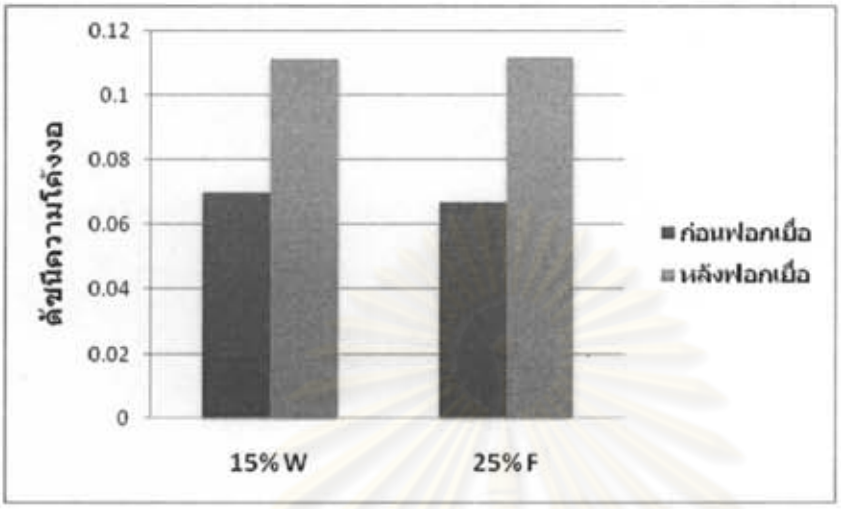
4.4.2.4 ความโค้งงอ (curl) และหักงอ (kink) ของเส้นใย

เมื่อทำการเปรียบเทียบดัชนีความโค้งงอ (curl index) และดัชนีความหักงอ (kink index) ที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ทั้งก่อนและหลังฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4-39 จะเห็นว่า หลังจากการฟอกเยื่อทั้งต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์นั้น เส้นใยมีการโค้งงอและหักงอมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเส้นใยถูกทำลายด้วยสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ

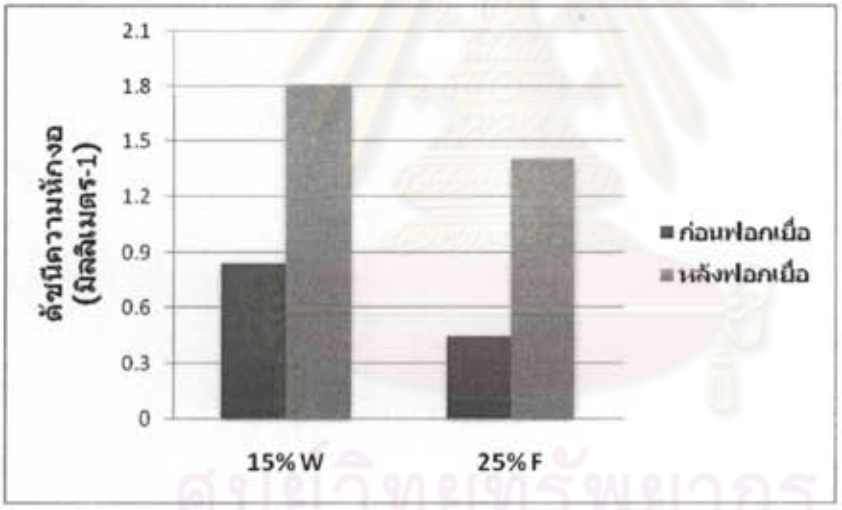
4.4.2.5 สภาพระบายได้ของเยื่อ (freeness)

สำหรับสภาพระบายได้ของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์หลังจากการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4-40 จะพบว่า สภาพระบายได้ของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์มีค่าที่ลดต่ำลงเล็กน้อยหลังจากการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นผลมาจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้เส้นใยที่มีขนาดสั้น เล็กและแคบในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้เส้นใยมี

พื้นที่ในการสัมผัสกับน้ำมากขึ้น เส้นใยอุ้มน้ำได้ดีขึ้น เป็นผลให้สภาพระบายได้ของเยื่อมีค่าลดลงนั่นเอง



(ก)

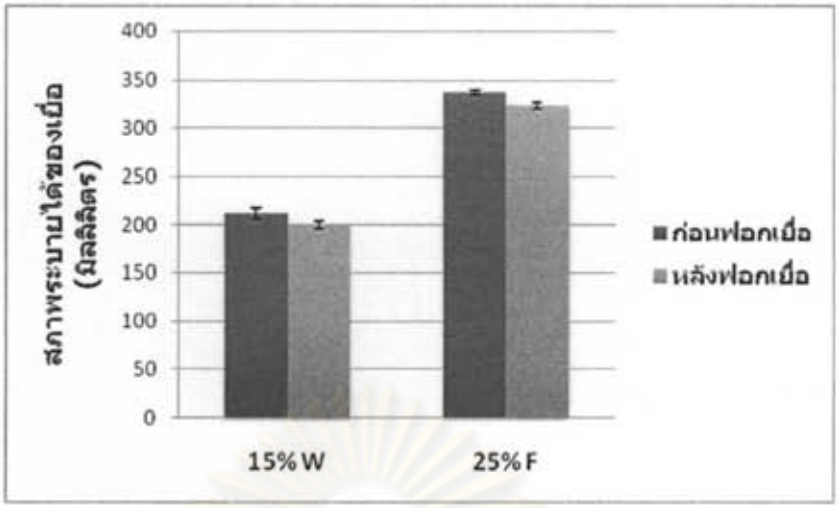


(ข)

หมายเหตุ : 15%W = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ต้มเยื่อด้วย 15% NaOH , 25%F = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ต้มเยื่อด้วย 25% NaOH

ภาพที่ 4-39 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อ (ก) ดัชนีความโค้งงอ และ (ข) ดัชนีความหักงอของเส้นใย ที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



หมายเหตุ : 15%W = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ต้มเยื่อด้วย 15% NaOH , 25%F = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ต้มเยื่อด้วย 25% NaOH

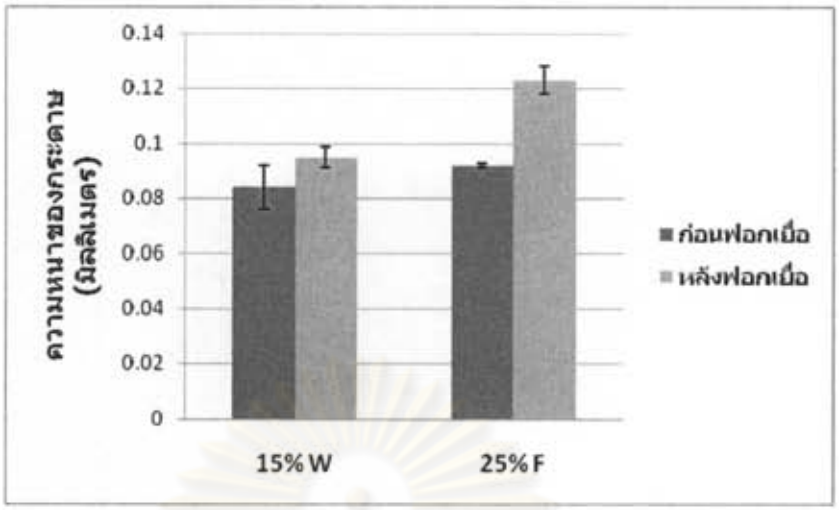
ภาพที่ 4-40 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อสภาพระบายได้ของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

4.4.3 สมบัติทั่วไปของกระดาษก่อนและหลังการฟอกเยื่อ

การเปรียบเทียบผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่มีต่อสมบัติทั่วไปของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ ในที่นี้คือต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (15%W) และต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง (25%F) ได้ผลการทดลองดังนี้

4.4.3.1 ความหนาของกระดาษ

เมื่อเปรียบเทียบความหนาของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ หลังจากการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4-41 จะเห็นว่า ความหนาของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากฟอกเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ นั่นก็แสดงว่า การฟอกเยื่อทำให้เส้นใยในเนื้อกระดาษมีการแนบชิดและสร้างพันธะกันได้ด้อยลง เนื่องจากหลังจากการฟอกเยื่อเส้นใยมีลักษณะโค้งงอและหักงอมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4-39 ทำให้เนื้อกระดาษฟูขึ้น ความหนาของกระดาษจึงเพิ่มขึ้นนั่นเอง [42]

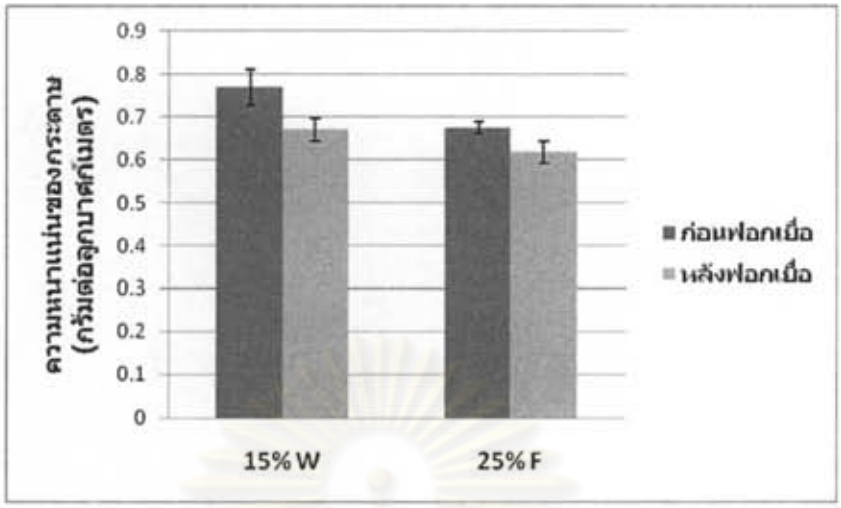


หมายเหตุ : 15%W = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ต้มเยื่อด้วย 15% NaOH , 25%F = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ต้มเยื่อด้วย 25% NaOH

ภาพที่ 4-41 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ที่มีต่อความหนาของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

4.4.3.2 ความหนาแน่นของกระดาษ

เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ หลังจากการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4-42 จะเห็นว่า หลังจากการฟอกเยื่อความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่กระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นั่นก็แสดงว่า หลังจากการฟอกเยื่อเส้นใยมีลักษณะโค้งงอและหักงอมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4-39 ทำให้เนื้อกระดาษฟูขึ้น ความหนาแน่นของกระดาษจึงลดลง [42, 43] ซึ่งผลที่ได้จะมีความผกผันกับค่าความหนาของกระดาษ ดังแสดงในภาพที่ 4-41

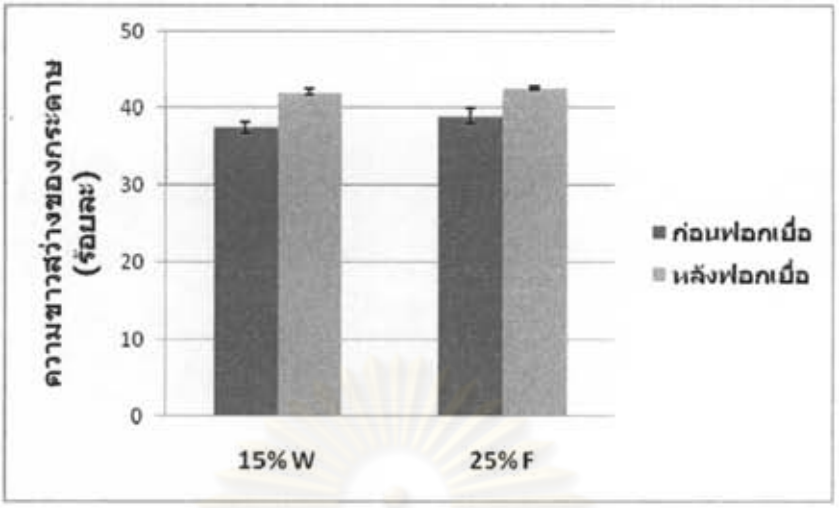


หมายเหตุ : 15%W = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ต้มเยื่อด้วย 15% NaOH , 25%F = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ต้มเยื่อด้วย 25% NaOH

ภาพที่ 4-42 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

4.4.3.3 ความขาวสว่างของกระดาษ

เมื่อเปรียบเทียบความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์หลังจากการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4-43 จะเห็นว่า ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากฟอกเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโครงสร้างของหมู่โครโมฟอร์ (chromophore) ที่อยู่ในโครงสร้างของลิกนิน ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เยื่อเกิดสี แล้วทำให้โครงสร้างนี้เปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างที่ไม่สามารถกลับมามีสีได้อีกเมื่อสัมผัสกับความชื้นและแสงแดด [25, 26] นอกจากนั้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถกำจัดลิกนินออกจากเยื่อเพิ่มขึ้นอีกด้วย ทำให้กระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความขาวสว่างมากขึ้น ซึ่งหลังจากการฟอกเยื่อกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะมีค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 12.13 และ 9.06 ตามลำดับ

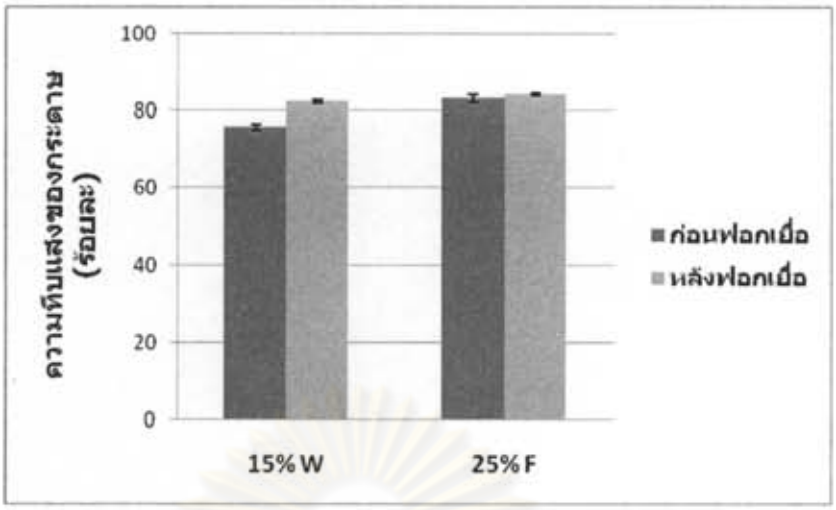


หมายเหตุ : 15%W = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ต้มเยื่อด้วย 15% NaOH , 25%F = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ต้มเยื่อด้วย 25% NaOH

ภาพที่ 4-43 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความที่มีต่อความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

4.4.3.4 ความทึบแสงของกระดาษ

เมื่อเปรียบเทียบความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ หลังจากการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4-44 จะเห็นว่า ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากฟอกเยื่อ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เส้นใยหลังจากการฟอกเยื่อมีขนาดสั้นลงและแคบขึ้น มีเส้นใยขนาดเล็กมากขึ้น มีการโค้งงอและหักงอของเส้นใยเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวในการกระเจิงแสงของเส้นใยในเนื้อกระดาษทำได้มากขึ้น ความทึบแสงของกระดาษจึงมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง [42, 43] และจะเห็นได้ชัดในกรณีของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ทั้งนี้เนื่องจากหลังจากการฟอกเยื่อ เส้นใยของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวมีขนาดเล็ก และมีลักษณะโค้งงอและหักงอมากกว่าเส้นใยของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ดังแสดงในภาพที่ 4-38 และ 4-39 นั่นเอง

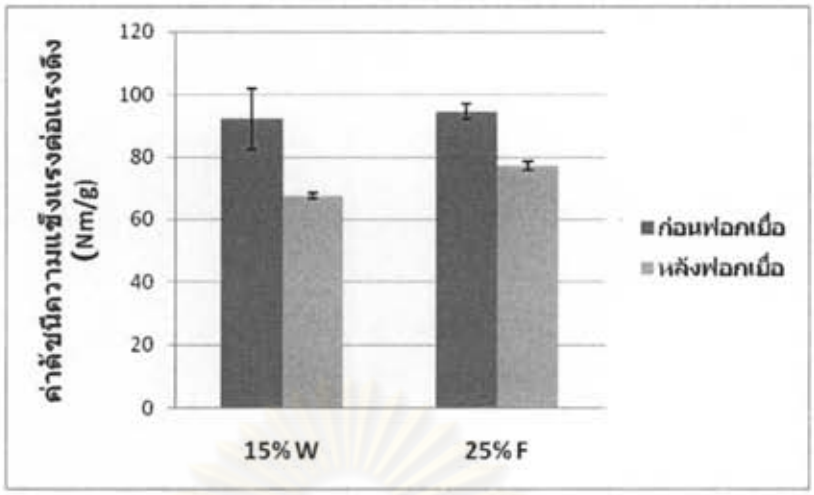


หมายเหตุ : 15%W = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ต้มเยื่อด้วย 15% NaOH , 25%F = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ต้มเยื่อด้วย 25% NaOH

ภาพที่ 4-44 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

4.4.3.5 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index)

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์หลังจากการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4-45 จะเห็นว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ มีค่าลดลงหลังจากฟอกเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากหลังจากการฟอกเยื่อ เส้นใยมีขนาดเล็ก โค้งงอและหักงอมากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวในการสร้างพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษลดลง อีกทั้งเส้นใยที่โค้งงอหรือหักงอยังทำให้การกระจายแรงของเส้นใยในเนื้อกระดาษทำได้ไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวของเส้นใย ดังนั้น เมื่อมีการดึงยืด จึงทำให้บริเวณที่มีการโค้งงอหรือหักงอของเส้นใยเกิดการขาดออกได้ง่าย เป็นผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษลดลง [42, 43] นั่นเอง ซึ่งหลังจากการฟอกเยื่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ลดลงประมาณร้อยละ 22.81 และ 18.43 ตามลำดับ



หมายเหตุ : 15%W = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ต้มเยื่อด้วย 15% NaOH , 25%F = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ต้มเยื่อด้วย 25% NaOH

ภาพที่ 4-45 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

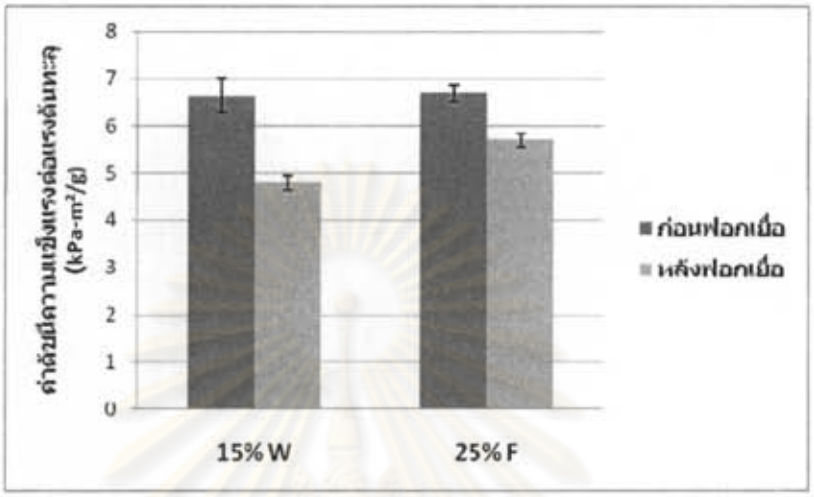
4.4.3.6 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index)

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์หลังจากการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4-46 จะเห็นว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์มีค่าลดลงหลังจากฟอกเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ ดังแสดงในภาพที่ 4-45 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ลดลงประมาณร้อยละ 26.93 และ 15.01 ตามลำดับ

4.4.3.7 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index)

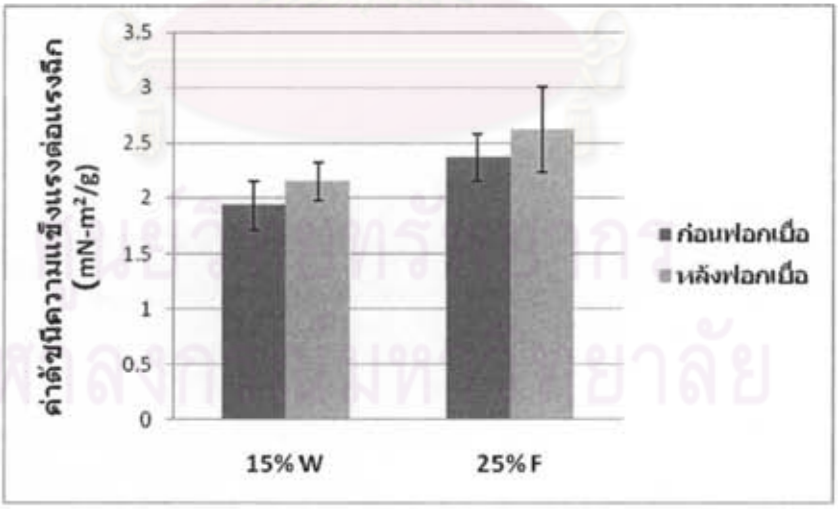
เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์หลังจากการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 4-47 จะเห็นว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากฟอกเยื่อ เป็นผลมาจากเส้นใยมีลักษณะโค้งงอและหักงอมากขึ้นหลังจากการฟอกเยื่อ ทำให้เส้นใยมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น เป็นผลให้

ความสามารถในการรับแรงฉีกเพิ่มขึ้น อีกทั้งพื้นที่ในการรับแรงฉีกขาดของเส้นใยในเนื้อกระดาษมากขึ้น ดังนั้น จึงต้องใช้แรงฉีกที่สูงเพื่อทำให้กระดาษขาดออก เป็นผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษเพิ่มขึ้นนั่นเอง [42, 43]



หมายเหตุ : 15%W = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ต้มเยื่อด้วย 15% NaOH , 25%F = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ต้มเยื่อด้วย 25% NaOH

ภาพที่ 4-46 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์



หมายเหตุ : 15%W = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ต้มเยื่อด้วย 15% NaOH , 25%F = ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ต้มเยื่อด้วย 25% NaOH

ภาพที่ 4-47 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

4.4.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

จากการศึกษาผลของการฟอกเยื่อที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์โดยจะทำการเปรียบเทียบกับสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ก่อนและหลังการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 3 เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้ Two-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงในตารางที่ 4-10 จะเห็นว่า การฟอกเยื่อ (A) มีผลต่อสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-value $\leq$ 0.05) ซึ่งสมบัติดังกล่าวได้แก่ ความขาวสว่างและค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ และเมื่อพิจารณาค่า F คำนวณ (F_{cal}) และค่า F ที่ได้จากตาราง (F_{crit}) ดังแสดงในตารางที่ 4-10 จะเห็นว่า ผลของการฟอกเยื่อ (A) มีผลต่อความขาวสว่างและค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ เนื่องจากมีค่า F_{cal} มากกว่า F_{crit} ($F_{cal} > F_{crit}$) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สำหรับการวิเคราะห์ผลของพันธุ์ต้นข้าวโพด (B) ที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษ โดยใช้ Two-way ANOVA ดังแสดงในตารางที่ 4-10 พบว่า พันธุ์ต้นข้าวโพด (B) มีผลต่อสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ได้แก่ ความขาวสว่างและค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-value $\leq$ 0.05) และเมื่อพิจารณาค่า F คำนวณ (F_{cal}) และค่า F ที่ได้จากตาราง (F_{crit}) ดังแสดงในตารางที่ 4-10 จะเห็นว่า พันธุ์ต้นข้าวโพด (B) มีผลต่อความขาวสว่างและค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ เนื่องจากมีค่า F_{cal} มากกว่า F_{crit} ($F_{cal} > F_{crit}$) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากผลการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 3 ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ที่ยังไม่ผ่านการฟอกเยื่อ ทำให้ทราบว่าสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยได้เป็นอย่างดี ทำให้กระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ มีความขาวสว่างของกระดาษที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับความขาวสว่างของกระดาษที่ไม่ผ่านการฟอกเยื่อประมาณร้อยละ 12.13 และ 9.06 ตามลำดับ ในขณะเดียวกันสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก็กลับทำให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษลดลง ประมาณร้อยละ 22.81 และ 18.43 ตามลำดับ อีกทั้งยังส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุลดลงประมาณร้อยละ 26.93 และ 15.01 ตามลำดับ ดังนั้น ในการศึกษาหาสัดส่วนระหว่างเยื่อที่ได้จากต้นข้าวโพดต่อเยื่อทางการค้าที่เหมาะสมในการ

ผลิตกระดาษ เพื่อให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่ดีในขั้นตอนต่อไป (การทดลองตอนที่ 4) **จึงเลือกที่จะไม่ทำการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์**

ตารางที่ 4-10 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ก่อนและหลังการฟอกเยื่อ

สมบัติต่างๆ ของกระดาษ	A			B		
	P-value	F_{cal}	F_{crit}	P-value	F_{cal}	F_{crit}
1. ความหนา	0.479471	1.137778	161.4476	0.545369	0.751111	161.4476
2. ความหนาแน่น	0.5	1	161.4476	0.545956	0.738997	161.4476
3. ความขาวสว่าง	0.006357*	10028.59	161.4476	0.043199*	216.5102	161.4476
4. ความทึบแสง	0.154195	16.38322	161.4476	0.080111	62.48526	161.4476
5. ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	0.10959	33.08127	161.4476	0.33815	2.897219	161.4476
6. ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	0.042379*	225	161.4476	0.021798*	852.2633	161.4476
7. ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก	0.188013	10.80447	161.4476	0.489308	1.069605	161.4476

หมายเหตุ A คือ ผลของการฟอกเยื่อ (ก่อนและหลังการฟอกเยื่อ)

B คือ ผลของพันธุ์ข้าวโพด (พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์)

* คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-value $\leq$ 0.05)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 ผลการศึกษาหาสัดส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อทางการค้าที่เหมาะสมในการผลิตกระดาษ เพื่อให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่ดี

ผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.5 นี้ เป็นผลการทดลองที่ได้จากการทดลองตอนที่ 4 ซึ่งเป็นการนำเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์มาทดแทนเยื่อทางการค้า คือ เยื่อจากไม้เนื้อแข็ง (เยื่อใยสั้น) และเยื่อจากไม้เนื้ออ่อน (เยื่อใยยาว) ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เพื่อใช้ในการผลิตกระดาษ จากนั้นทดสอบสมบัติต่างๆ ของกระดาษที่ผลิตได้ เพื่อศึกษาว่าเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์นั้น มีความสามารถในการปรับปรุงสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อทางการค้าได้หรือไม่ ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.5.1 สมบัติทั่วไปของกระดาษ

4.5.1.1 ความหนาของกระดาษ

จากตารางที่ 4-11 และภาพที่ 4-48 (ก)-(ข) แสดงความหนาของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ โดยจะพบว่า สำหรับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ เมื่อพิจาณาที่อัตราส่วนในการทดแทนเยื่อทางการค้าที่เพิ่มขึ้น จะพบว่า กระดาษมีความหนาลดลงในทุกอัตราส่วน เมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้ทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด (กระดาษควบคุม) ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากเส้นใยในเนื้อกระดาษสามารถยุบตัวและแนบชิดกันได้มากขึ้น เป็นผลให้ความหนาของกระดาษลดลง แต่อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วนร้อยละ 100 : 0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ความหนาของกระดาษจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนร้อยละ 75 : 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยจะเห็นได้ชัดในกรณีของกระดาษที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยในเนื้อกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว แนบตัวกันเองได้ไม่ดี ทำให้ความหนาของกระดาษเพิ่มขึ้น และสำหรับกรณีของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

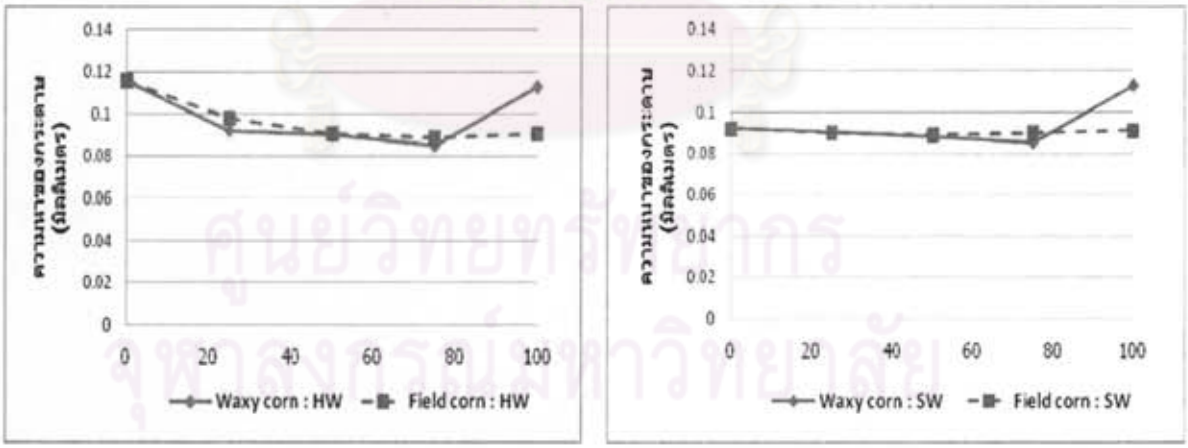
และเมื่อเปรียบเทียบพันธุ์ของต้นข้าวโพดที่มีผลต่อความหนาของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์นั้นจะพบว่า ความหนาของกระดาษมีค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในอัตราส่วนร้อยละ 0:100, 25:75, 50:50 และ 75:25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แต่มีความแตกต่างอย่าง

มีนัยที่อัตราส่วนร้อยละ 100:0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งในกรณีของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ก็เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4-11 ความหนาของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

อัตราส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อการค้า	ข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว		ข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	
	เยื่อใยสั้น	เยื่อใยยาว	เยื่อใยสั้น	เยื่อใยยาว
0 : 100	0.116 ± 0.037	0.092 ± 0.001	0.116 ± 0.037	0.092 ± 0.093
25 : 75	0.092 ± 0.004	0.090 ± 0.001	0.098 ± 0.002	0.090 ± 0.001
50 : 50	0.090 ± 0.001	0.088 ± 0.001	0.091 ± 0.001	0.089 ± 0.001
75 : 25	0.085 ± 0.002	0.085 ± 0.002	0.089 ± 0.001	0.090 ± 0.002
100 : 0	0.113 ± 0.036	0.113 ± 0.036	0.091 ± 0.001	0.091 ± 0.001

หมายเหตุ: กระดาษควบคุม คือ กระดาษที่มีอัตราส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อการค้าเท่ากับ 0 : 100 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง หรือกระดาษที่ไม่ได้ทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด



(ก) เยื่อใยสั้น (ข) เยื่อใยยาว

ภาพที่ 4-48 ความหนาของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) และพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (field corn) ในอัตราส่วนต่างๆ

4.5.1.2 ความหนาแน่นของกระดาษ

จากตารางที่ 4-12 และภาพที่ 4-49 (ก)-(ข) แสดงความหนาแน่นของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ พบว่า สำหรับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ เมื่อพิจาณาที่อัตราส่วนในการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดเพิ่มขึ้น จะพบว่า ความหนาแน่นของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกๆ อัตราส่วน เมื่อเทียบกับกระดาษควบคุม อาจเป็นผลมาจากเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดเข้าไปอุดช่องว่างระหว่าง หรือเข้าไปแทรกระหว่างเส้นใยในเนื้อกระดาษได้ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วนร้อยละ 100 : 0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ความหนาแน่นของกระดาษจะมีค่าลดลงจากอัตราส่วนร้อยละ 75 : 25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากการแนบตัวของเส้นใยในเนื้อกระดาษทำได้ไม่ดีนักเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ ทำให้ความหนาแน่นของกระดาษที่อัตราส่วนร้อยละ 100 : 0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง มีค่าลดลง โดยจะเห็นได้ชัดในกรณีของกระดาษที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่อัตราส่วนร้อยละ 100 : 0 ของน้ำหนักเยื่อแห้งนั้น ความหนาแน่นของกระดาษไม่มีความแตกต่างกันมากนัก และสำหรับกรณีของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

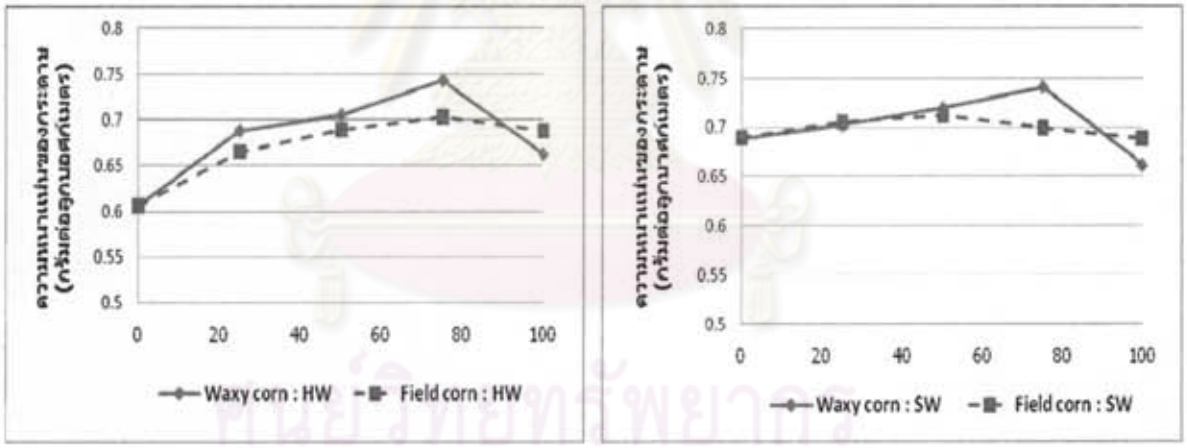
และเมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อทางการค้าที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ในอัตราส่วนที่เท่ากัน จะพบว่า กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวจะให้ค่าที่สูงกว่าพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เล็กน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-12 ความหนาแน่นของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

อัตราส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อการค้า	ข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว		ข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	
	เยื่อใยสั้น	เยื่อใยยาว	เยื่อใยสั้น	เยื่อใยยาว
0 : 100	0.606 ± 0.090	0.689 ± 0.009	0.606 ± 0.090	0.689 ± 0.009
25 : 75	0.688 ± 0.026	0.702 ± 0.005	0.665 ± 0.011	0.705 ± 0.011
50 : 50	0.705 ± 0.009	0.720 ± 0.006	0.689 ± 0.010	0.712 ± 0.082
75 : 25	0.743 ± 0.014	0.741 ± 0.017	0.703 ± 0.007	0.699 ± 0.013
100 : 0	0.662 ± 0.101	0.662 ± 0.101	0.688 ± 0.010	0.688 ± 0.010

หมายเหตุ: กระดาษควบคุม คือ กระดาษที่มีอัตราส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อทางการค้าเท่ากับ 0 : 100 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง หรือกระดาษที่ไม่ได้ทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด



(ก) เยื่อใยสั้น (ข) เยื่อใยยาว

ภาพที่ 4-49 ความหนาแน่นของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) และพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (field corn) ในอัตราส่วนต่างๆ

4.5.2 สมบัติเชิงแสงของกระดาษ

4.5.2.1 ความขาวสว่างของกระดาษ

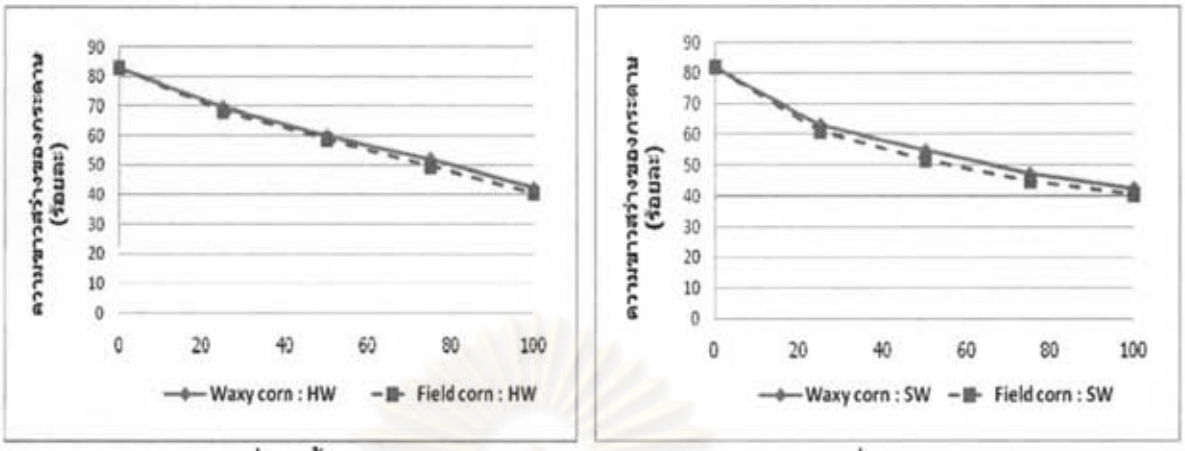
จากตารางที่ 4-13 และภาพที่ 4-50 (ก)-(ข) แสดงความขาวสว่างของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยจะพบว่า สำหรับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ เมื่อพิจาณาที่อัตราส่วนในการทดแทนเยื่อทางการค้าที่เพิ่มขึ้น จะพบว่า ความขาวสว่างของกระดาษมีค่าลดลงในทุกๆ อัตราส่วนอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับกระดาษควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดยังมีสีอมเหลืองและยังไม่ผ่านการฟอกเยื่อ ในขณะที่เยื่อทางการค้าทั้ง 2 ชนิด เป็นเยื่อฟอกเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นกระดาษเยื่อทางการค้าล้วนๆ จึงเป็นกระดาษที่มีความขาวสว่างสูง

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนในการทดแทนที่เท่ากัน จะพบว่า กระดาษที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว จะมีความขาวสว่างที่สูงกว่าพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เล็กน้อย

ตารางที่ 4-13 ความขาวสว่างของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

อัตราส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อการค้า	ข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว		ข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	
	เยื่อใยสั้น	เยื่อใยยาว	เยื่อใยสั้น	เยื่อใยยาว
0 : 100	83.14 ± 0.010	82.11 ± 1.250	83.14 ± 0.100	82.11 ± 1.250
25 : 75	69.84 ± 0.075	63.27 ± 0.821	68.24 ± 1.325	61.17 ± 1.240
50 : 50	60.05 ± 0.825	55.01 ± 0.410	58.74 ± 1.875	51.89 ± 0.010
75 : 25	52.17 ± 0.010	47.44 ± 0.280	49.56 ± 0.976	44.80 ± 0.170
100 : 0	42.54 ± 0.385	42.54 ± 0.385	40.53 ± 1.465	40.53 ± 1.465

หมายเหตุ: กระดาษควบคุม คือ กระดาษที่มีอัตราส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อทางการค้าเท่ากับ 0 : 100 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง หรือกระดาษที่ไม่ได้ทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด



(ก) เยื่อใยสั้น (ข) เยื่อใยยาว

ภาพที่ 4-50 ความขาวสว่างของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) และพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (field corn) ในอัตราส่วนต่างๆ

4.5.2.2 ความทึบแสงของกระดาษ

จากตารางที่ 4-14 และภาพที่ 4-51 (ก)-(ข) แสดงความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อทางการค้าที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ พบว่า สำหรับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว เมื่ออัตราส่วนในการทดแทนมากขึ้น ความทึบแสงของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และจะมีค่าลดลงมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนในการทดแทนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 25:75 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมากจากที่อัตราส่วนร้อยละ 25:75 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เส้นใยขนาดเล็กที่ได้จากเยื่อใยสั้นและเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดในเนื้อกระดาษเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่ในการกระเจิงแสงในเนื้อกระดาษทำได้มากขึ้น ค่าความทึบแสงของกระดาษจึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การที่ค่าความทึบแสงของกระดาษกลับมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนในการทดแทนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 50:50, 75:25 และ 100:0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง น่าจะเป็นผลมาจากความหนาแน่นของกระดาษที่มากขึ้น ส่งผลให้การกระเจิงแสงของเส้นใยในเนื้อกระดาษทำได้น้อยลง ความทึบแสงของกระดาษจึงลดลงนั่นเอง [9, 10, 22] ซึ่งในอัตราส่วน 75:25 และ 100:0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จะมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่ากระดาษควบคุม (84.81 ± 0.760) และเมื่อพิจาณาอัตราส่วนในการทดแทนที่เท่ากัน จะพบว่า กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยง

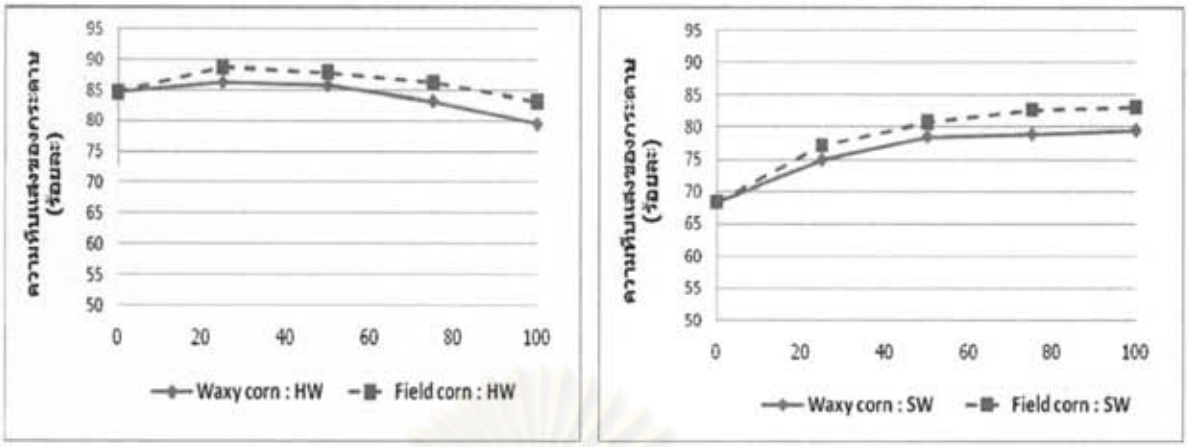
สัตว์ จะมีความทึบแสงของกระดาษที่สูงกว่าการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่า เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สามารถสร้างพันธะและเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเส้นใยได้น้อยกว่า เนื่องจากความยาวของเส้นใยสูงกว่า ดังแสดงในภาพที่ 4-23 ทำให้การกระเจิงแสงในเนื้อกระดาษทำได้ดี ความทึบแสงของกระดาษจึงมีค่าสูงกว่า

สำหรับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ดังแสดงในตารางที่ 4-14 และภาพที่ 4-51 (ข) จะพบว่า เมื่ออัตราส่วนในการทดแทนมากขึ้น ความทึบแสงของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเพิ่มสูงกว่ากระดาษทดสอบ (68.37 ± 0.650) อย่างชัดเจน ซึ่งปกติเยื่อใยยาวจะมีพื้นที่ผิวโดยรวมต่ำกว่าเยื่อใยสั้น เนื่องมาจากเส้นใยมีขนาดยาวและใหญ่ ทำให้ค่าความทึบแสงของกระดาษมีค่าต่ำ แต่เมื่อมีการทดแทนเยื่อใยยาวด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดซึ่งเป็นเยื่อที่มีขนาดสั้นเพิ่มขึ้น ทำให้สัดส่วนของเยื่อใยยาวลดลง ทำให้ค่าความทึบแสงของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจาณาอัตราส่วนในการทดแทนที่เท่ากัน จะพบว่า กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ จะมีความทึบแสงของกระดาษที่สูงกว่าการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวเล็กน้อย

ตารางที่ 4-14 ความทึบแสงของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

อัตราส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อการค้า	ข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว		ข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	
	เยื่อใยสั้น	เยื่อใยยาว	เยื่อใยสั้น	เยื่อใยยาว
0 : 100	84.81 ± 0.760	68.37 ± 0.650	84.81 ± 0.760	68.37 ± 0.630
25 : 75	86.41 ± 0.425	74.92 ± 0.655	88.89 ± 0.645	77.20 ± 0.195
50 : 50	85.86 ± 1.630	78.53 ± 1.095	87.98 ± 0.055	80.85 ± 0.085
75 : 25	83.27 ± 0.170	78.95 ± 0.950	86.34 ± 0.250	82.79 ± 0.295
100 : 0	79.52 ± 0.220	79.52 ± 0.220	83.18 ± 0.115	83.18 ± 0.115

หมายเหตุ: กระดาษควบคุม คือ กระดาษที่มีอัตราส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อทางการค้าเท่ากับ 0 : 100 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง หรือกระดาษที่ไม่ได้ทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด



(ก) เยื่อใยสั้น (ข) เยื่อใยยาว

ภาพที่ 4-51 ความทึบแสงของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) และพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (field corn) ในอัตราส่วนต่างๆ

4.5.3 สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ

4.5.3.1 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ

จากตารางที่ 4-15 และภาพที่ 4-52 (ก)-(ข) แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ โดยจะพบว่า เมื่ออัตราส่วนในการทดแทนเยื่อใยสั้นด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดมากขึ้น ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าสูงกว่ากระดาษทดสอบ (34.66 ± 5.68) อย่างมีนัยสำคัญ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์เข้าไปแทรกระหว่างเส้นใยหรือช่วยเชื่อมเส้นใยแต่ละเส้นเข้าด้วยกัน ทำให้เส้นใยสามารถสร้างพันธะกันได้มากขึ้นและแข็งแรงขึ้น นั่นแสดงว่า เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์สามารถช่วยในการปรับปรุงสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นให้มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นจากกระดาษทดสอบได้เป็นอย่างดี และสำหรับกรณีของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

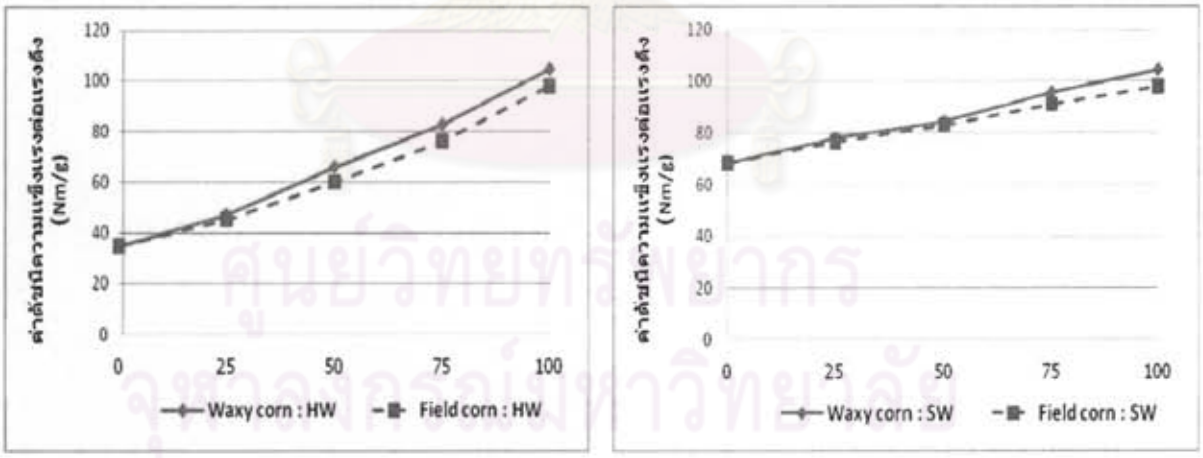
และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่อัตราส่วนในการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดเท่ากัน จะพบว่า กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวที่มีการ

ปรับปรุงสมบัติโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวจะให้ค่าที่สูงกว่าพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เล็กน้อย

ตารางที่ 4-15 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

อัตราส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อการค้า	ข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว		ข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	
	เยื่อใยสั้น	เยื่อใยยาว	เยื่อใยสั้น	เยื่อใยยาว
0 : 100	34.66 ± 5.68	68.25 ± 0.63	34.64 ± 5.68	68.25 ± 0.63
25 : 75	46.93 ± 1.52	77.99 ± 3.04	45.25 ± 1.18	76.27 ± 1.64
50 : 50	65.92 ± 1.69	84.30 ± 2.10	60.00 ± 2.22	83.08 ± 2.69
75 : 25	82.42 ± 3.41	95.65 ± 2.28	76.09 ± 1.92	91.04 ± 2.51
100 : 0	104.28 ± 2.11	104.28 ± 2.11	97.87 ± 3.53	97.87 ± 3.53

หมายเหตุ: กระดาษควบคุม คือ กระดาษที่มีอัตราส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อทางการค้าเท่ากับ 0 : 100 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง หรือกระดาษที่ไม่ได้ทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด



(ก) เยื่อใยสั้น (ข) เยื่อใยยาว

ภาพที่ 4-52 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) และพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (field corn) ในอัตราส่วนต่างๆ

4.5.3.2 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ

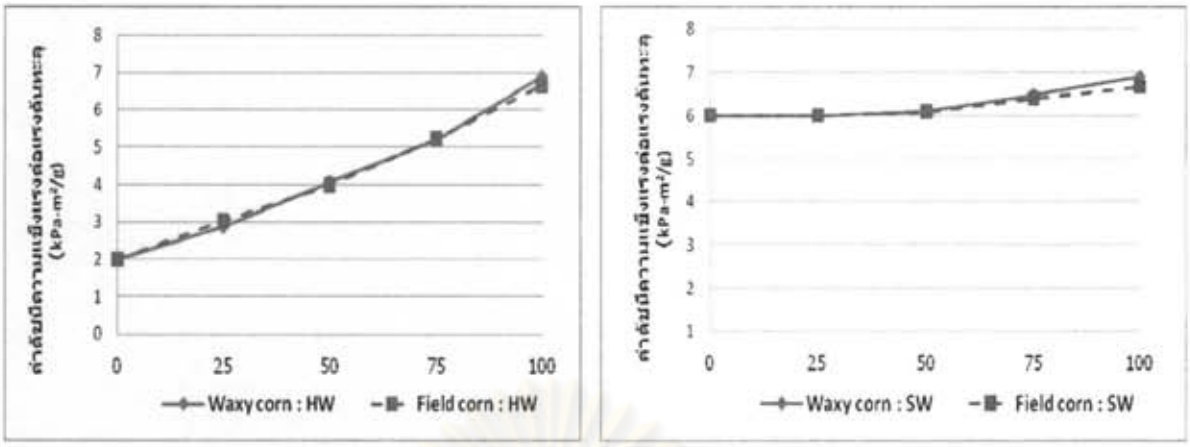
จากตารางที่ 4-16 และภาพที่ 4-53 (ก)-(ข) แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ พบว่า เมื่ออัตราส่วนในการทดแทนเยื่อใยสั้นด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดมากขึ้น ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าสูงกว่ากระดาษทดสอบ (1.99 ± 0.18) อย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องมาจากการสร้างพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษทำได้ดีขึ้น ซึ่งค่าที่ได้มีแนวโน้นไปในทิศทางเดียวกับค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ ดังแสดงในภาพที่ 4-52 (ก) และสำหรับกรณีของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุที่อัตราส่วนในการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดเท่ากัน จะพบว่า กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวจะให้ค่าที่สูงกว่าพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เล็กน้อย

ตารางที่ 4-16 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

อัตราส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อการค้า	ข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว		ข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	
	เยื่อใยสั้น	เยื่อใยยาว	เยื่อใยสั้น	เยื่อใยยาว
0 : 100	1.99 ± 0.18	6.00 ± 0.17	1.99 ± 0.18	6.00 ± 0.17
25 : 75	2.86 ± 0.06	6.00 ± 0.09	3.02 ± 0.05	6.00 ± 0.23
50 : 50	4.06 ± 0.06	6.10 ± 0.14	3.98 ± 0.13	6.10 ± 0.14
75 : 25	5.20 ± 0.09	6.48 ± 0.05	5.22 ± 0.09	6.40 ± 0.15
100 : 0	6.90 ± 0.08	6.90 ± 0.08	6.67 ± 0.03	6.67 ± 0.03

หมายเหตุ: กระดาษควบคุม คือ กระดาษที่มีอัตราส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อทางการค้าเท่ากับ 0 : 100 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง หรือกระดาษที่ไม่ได้ทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด



(ก) เยื่อใยสั้น (ข) เยื่อใยยาว

ภาพที่ 4-53 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) และพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (field corn) ในอัตราส่วนต่างๆ

4.5.3.3 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ

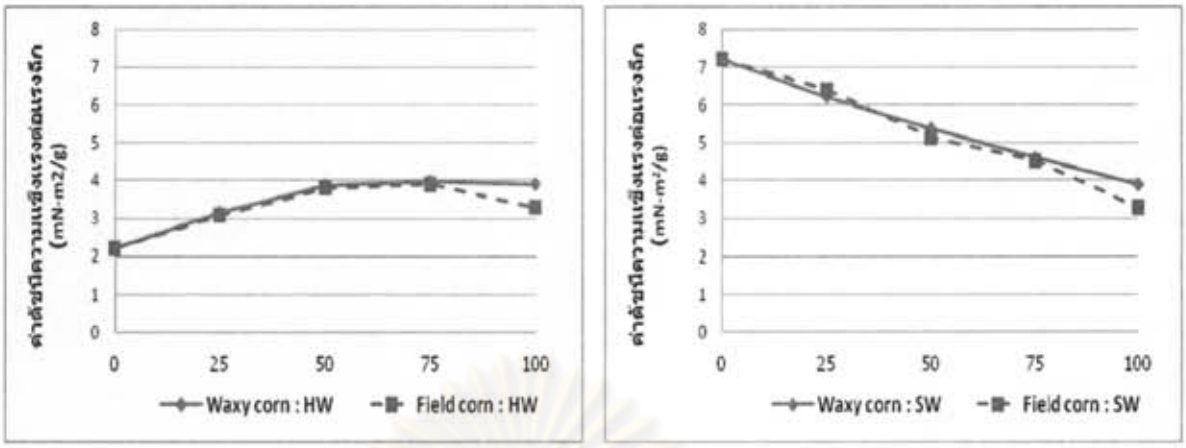
ปกติแล้วความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ ขึ้นอยู่กับ ความยาว ความแข็งแรง และการสร้างพันธะของเส้นใย โดยปัจจัยที่ค่อนข้างมีผลมากที่สุด คือ ความแข็งแรงของเส้นใย ซึ่งจากตารางที่ 4-17 และภาพที่ 4-54 (ก)-(ข) พบว่า สำหรับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เมื่ออัตราส่วนในการทดแทนมากขึ้น ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าสูงกว่ากระดาษทดสอบ (2.20 ± 0.05) อย่างมีนัยสำคัญ นั่นแสดงว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษในกรณีนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและการสร้างพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษมากกว่าความยาวของเส้นใย เพราะเส้นใยที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์มีความยาวที่ใกล้เคียงหรือเท่ากันกับเยื่อใยสั้น และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อฉีกที่อัตราส่วนในการทดแทนเท่ากัน จะพบว่า กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอัตราส่วนร้อยละ 0:100, 25:75, 50:50 และ 75:25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่จะมีค่าแตกต่างกันที่อัตราส่วนร้อยละ 100:0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยกระดาษที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดข้าวเหนียวจะมีค่าที่สูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ไม่มากนัก

สำหรับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เมื่ออัตราส่วนในการทดแทนมากขึ้น ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษมีแนวโน้มลดลง และมีค่าลดลงกว่ากระดาษทดสอบ (7.22 ± 0.25) อย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 4-17 และภาพที่ 4-54 (ข) ซึ่งผลที่ได้นี้มีแนวโน้มที่แตกต่างจากผลการทดลองที่แสดงในภาพที่ 4-54 (ก) ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลมาจากในเนื้อกระดาษมีเส้นใยขนาดสั้นในปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษมีค่าลดลงเรื่อยๆ และโดยปกติกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวจะมีความแข็งแรงมากกว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้น เนื่องจากเส้นใยที่ยาวจะมีพื้นที่ในการสร้างพันธะได้มากกว่าเส้นใยที่สั้น [9, 22, 44] ดังนั้นการที่ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษลดลง เมื่ออัตราส่วนในการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากในเนื้อกระดาษมีเส้นใยที่มีขนาดยาวลดลง และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อฉีกที่อัตราส่วนในการทดแทนเท่ากัน จะพบว่า กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการปรับปรุงสมบัติโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอัตราส่วนร้อยละ 0:100, 25:75, 50:50 และ 75:25 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่จะมีค่าแตกต่างกันที่อัตราส่วนร้อยละ 100:0 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง โดยกระดาษที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดข้าวเหนียวจะมีค่าที่สูงกว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ไม่มากนัก

ตารางที่ 4-17 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

อัตราส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อการค้า	ข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว		ข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	
	เยื่อใยสั้น	เยื่อใยยาว	เยื่อใยสั้น	เยื่อใยยาว
0 : 100	2.20 ± 0.05	7.22 ± 0.23	2.20 ± 0.05	7.22 ± 0.25
25 : 75	3.16 ± 0.21	6.23 ± 0.49	3.09 ± 0.13	6.42 ± 0.34
50 : 50	3.87 ± 0.54	5.94 ± 0.39	3.81 ± 0.38	5.15 ± 0.39
75 : 25	3.98 ± 0.41	4.61 ± 0.45	3.90 ± 0.47	4.53 ± 0.39
100 : 0	3.90 ± 0.43	3.90 ± 0.43	3.29 ± 0.06	3.29 ± 0.20

หมายเหตุ: กระดาษควบคุม คือ กระดาษที่มีอัตราส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อทางการค้าเท่ากับ 0 : 100 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง หรือกระดาษที่ไม่ได้ทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด



(ก) เยื่อใยสั้น (ข) เยื่อใยยาว

ภาพที่ 4-54 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว (waxy corn) และพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (field corn) ในอัตราส่วนต่างๆ

4.5.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติของการศึกษาหาสัดส่วนของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อทางการค้า (เยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาว) ที่มีการปรับปรุงสมบัติของกระดาษโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ (พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์) ในอัตราส่วนต่างๆ กัน โดยใช้ Two-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงในตารางที่ 4-18 จะเห็นว่า พันธุ์ของต้นข้าวโพด (A) มีผลต่อสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-value $\leq$ 0.05) โดยสมบัติของกระดาษดังกล่าวได้แก่ ความขาวสว่างและค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ ส่วนในกรณีของสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์นั้น พบว่า พันธุ์ของต้นข้าวโพด (A) จะมีผลต่อความขาวสว่างและความทึบแสงของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-value $\leq$ 0.05)

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนการทดแทนเยื่อทางการค้าด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ (B) ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษ ดังแสดงในตารางที่ 4-18 จะเห็นว่า กระดาษที่มีการทดแทนเยื่อใยสั้นด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ อัตราส่วนการทดแทนของเยื่อที่

ใช้จะส่งผลต่อสมบัติของกระดาษ ได้แก่ ความขาวสว่าง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง แรงดันทะลุและแรงฉีกของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-value $\leq$ 0.05) สำหรับกระดาษที่มีการทดแทนเยื่อใยยาวด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ พบว่าอัตราส่วนการทดแทนของเยื่อที่ใช้ จะส่งผลต่อสมบัติของกระดาษ ได้แก่ ความขาวสว่าง ความทึบแสง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง แรงดันทะลุและแรงฉีกของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-value $\leq$ 0.05)

ตารางที่ 4-18 การวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อทางการค้าที่มีการปรับปรุงสมบัติของกระดาษด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ในอัตราส่วนต่างๆ กัน

สมบัติต่างๆ ของกระดาษ	เยื่อใยสั้น			เยื่อใยยาว		
	A	B	A*B	A	B	A*B
1. ความหนา	0.814885	0.268872	0.808029	0.602976	0.618663	0.676213
2. ความหนาแน่น	0.689655	0.134839	0.941649	0.845502	0.688078	0.905233
3. ความขาวสว่าง	0.03233*	9.46E-12*	0.726068	0.005661*	4.93E-12*	0.502118
4. ความทึบแสง	0.342199	0.453685	0.451907	7.88E-05*	4.73E-09*	0.057596
5. ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง	0.019973*	8.59E-11*	0.148096	0.969185	0.0004*	0.367047
6. ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ	0.77995	7.23E-11*	0.703364	0.528769	0.001561*	0.923285
7. ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก	0.133804	0.000507*	0.218674	0.113076	3.57E-06*	0.27284

หมายเหตุ A คือ ผลของพันธุ์ของต้นข้าวโพด

B คือ ผลของอัตราส่วนการทดแทนเยื่อทางการค้าด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

A*B คือ ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ของต้นข้าวโพดและอัตราส่วนการทดแทนเยื่อทางการค้าด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์

* คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P-value $\leq$ 0.05)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อพิจารณาผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ของต้นข้าวโพดและอัตราส่วนการทดแทนเยื่อทางการค้าด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ (A*B) ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษดังแสดงในตารางที่ 4-18 จะเห็นว่า ค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 ทั้งสิ้น แสดงว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ของต้นข้าวโพดและอัตราส่วนการทดแทนเยื่อทางการค้าไม่มีผลต่อสมบัติใดๆ ของกระดาษที่มีการทดแทนเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต้นฉบับไม่มีหน้า 138 - 141

NO PAGE 138 - 141 IN ORIGINAL

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเยื่อจากต้นข้าวโพดและส่วนของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ที่ให้สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ดีที่สุด

จากผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเยื่อจากต้นข้าวโพดและส่วนของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ที่ให้สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ดีที่สุด โดยนำต้นข้าวโพดแต่ละส่วน คือ ส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพด ส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพดและต้นข้าวโพดทั้งต้นมาผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10, 15 และ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำเยื่อที่ผลิตได้ในแต่ละส่วนของต้นข้าวโพดมาขึ้นแผ่นกระดาษให้ได้น้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร ทำการทดสอบสมบัติเชิงแสงและสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษต่างๆ ซึ่งพบว่า อัตราส่วนระหว่างสารเคมีกับชิ้นไม้ที่ใช้ในการต้มเยื่อสำหรับแกนกลางของต้นข้าวโพด มีค่าเท่ากับ 39:1 รองลงมาคือต้นข้าวโพดทั้งต้นและส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพด คือ 13:1 และ 10:1 ตามลำดับ เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารเคมีในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น พบว่า ส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดจะมีความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ไม่แตกต่างกัน แต่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีความแตกต่างกันเป็นอย่างมาก โดยส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพดมีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กอยู่ในปริมาณที่สูงที่สุด คือประมาณร้อยละ 50 รองลงมาคือ ส่วนของต้นข้าวโพดทั้งต้น ประมาณร้อยละ 37-40 และสุดท้ายคือ ส่วนของเปลือกนอกต้นข้าวโพด มีประมาณร้อยละ 29-31 สำหรับค่าสภาพการระบายได้ของเยื่อและผลผลิตของเยื่อ จะพบว่า ส่วนแกนกลางจะมีค่าต่ำที่สุดและต่ำกว่าส่วนอื่นๆ ของต้นข้าวโพดอย่างชัดเจน รองลงมาคือ ต้นข้าวโพดทั้งต้นและส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพด ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติสมบัติเชิงแสงของกระดาษ พบว่า เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากัน ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต้นข้าวโพดทั้งต้นจะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ ส่วนเปลือกนอกและส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพด ตามลำดับ สำหรับความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากส่วนเปลือกนอกจะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ ต้นข้าวโพดทั้งต้นและส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพด ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ จะพบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากส่วนต้นข้าวโพดทั้งต้นและส่วนแกนกลางจะมีค่าสูงกว่าส่วนเปลือกนอกของต้นข้าวโพด แต่อย่างไรก็ตามเยื่อที่ผลิตจากจากส่วนแกนกลางของต้นข้าวโพดไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการผลิตเยื่อ เนื่องจากมีปริมาณเส้นใยขนาดสั้นอยู่เป็นจำนวนมาก จึงส่งผลให้ค่าสภาพการระบายได้ของเยื่อและผลผลิตของเยื่อต่ำกว่าส่วนอื่นๆ ของต้นข้าวโพด แม้ว่าจะให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่ดีก็ตาม ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ส่วนต้นข้าวโพดทั้งต้นในการผลิตเยื่อและกระดาษจากต้นข้าวโพด เนื่องจากกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งต้นนั้นจะมีความขาวสว่าง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุที่ดี อีกทั้งผลผลิตของเยื่อและสภาพระบายได้ของเยื่อก็อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม แม้ว่าจะมีความทึบแสงของกระดาษต่ำกว่ากระดาษที่ผลิตจากส่วนอื่นๆ ของต้นข้าวโพดก็ตาม

สำหรับสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อและกระดาษจากส่วนต่างๆ ของต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว ที่ให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุดีที่สุดคือ การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง

5.1.2 สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเยื่อจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ที่ให้สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ดีที่สุด

จากผลการศึกษาหาส่วนของต้นข้าวโพดที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อและกระดาษ ทำให้ทราบว่า ต้นข้าวโพดทั้งต้นให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุของกระดาษที่ดีที่สุด ดังนั้นในการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากต้นข้าวโพด (พันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์) ที่ให้สมบัติของกระดาษที่ดีที่สุด จึงเลือกใช้ต้นข้าวโพดทั้งต้นในการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ซึ่งพบว่า อัตราส่วนระหว่างสารเคมีกับชิ้นไม้ที่ใช้ในการต้มเยื่อสำหรับต้นข้าวโพด (พันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์) มีค่าเท่ากับ 17:1 สำหรับสมบัติทั่วไปของเยื่อ ได้แก่ ผลผลิต ความยาวของเส้นใยและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กและสภาพระบายได้ของเยื่อจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่แตกต่างกันมากนัก

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงแสงและสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อเพิ่มมากขึ้น ผลพบว่าความขาวสว่าง

ของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความทึบแสงของกระดาษมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีค่าสูงที่สุดที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง แต่กลับมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง ดังนั้น สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ คือ การใช้สารละลายที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 25 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง เนื่องจากเป็นสภาวะที่ให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ (ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุ) ของกระดาษที่ดีที่สุด ในขณะที่ผลผลิตและสภาพระบายได้ของเยื่อที่ไม่ต่ำมากเกินไป ดังนั้น จึงเลือกสภาวะนี้ในการผลิตเยื่อและกระดาษจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

5.1.3 เปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ (พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์)

จากผลการเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากต้นข้าวโพดต่างพันธุ์ ในที่นี้คือ พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เพื่อที่จะศึกษาว่ากระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ใดที่ให้สมบัติของเยื่อและกระดาษที่ดีกว่ากัน ทำให้ทราบว่า ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวสามารถผลิตเยื่อได้ที่สภาวะในการต้มเยื่อที่ต่ำกว่าต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยที่สภาวะในการต้มเยื่อต่ำๆ (ใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 และ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง) ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวจะให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษทั้งความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุของกระดาษที่สูงกว่าต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ รวมถึงความขาวสว่างและความหนาแน่นของกระดาษก็มีค่าที่สูงกว่าด้วย อย่างไรก็ตาม ค่าความทึบแสงของกระดาษ สภาพระบายได้ของเยื่อ ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจะมีค่าที่ต่ำกว่า และเมื่อสภาวะในการต้มเยื่อแรงขึ้น (ใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง) ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่สูงกว่าต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว รวมถึงค่าความทึบแสง ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยก็มีค่าสูงกว่าเช่นกัน นั่นแสดงว่า สภาวะในการผลิตเยื่อและกระดาษของต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ที่มีความแตกต่างกัน ย่อมส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษแตกต่างกัน

ดังนั้น หากต้องการสมบัติด้านความแข็งแรงที่เท่ากัน ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อได้ดีกว่าและใช้ปริมาณสารเคมีในการผลิตเยื่อปริมาณน้อยกว่าต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ อย่างไรก็ตาม ต้น

ข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สามารถให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่สูงกว่า เมื่อต้มเยื่อในสภาวะที่เหมาะสม

5.1.4 ผลของการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเยื่อและกระดาษ

เป็นการนำเยื่อที่เตรียมได้จากสภาวะที่ดีที่สุดของต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ คือ ต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง (15%W) และต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 25 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง (25%F) มาทำการฟอกเยื่อด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เพื่อศึกษาผลของการฟอกเยื่อที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ ซึ่งจากการทดลองสรุปได้ว่า หลังจากการฟอกเยื่อผลผลิตของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่าต่ำกว่าเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว อีกทั้งสภาพระบายได้ ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยหลังการฟอกเยื่อมีค่าลดต่ำลงกว่าเยื่อก่อนการฟอกเยื่อ แต่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กกลับมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นหลังจากการฟอกเยื่อ นอกจากนั้นสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยได้เป็นอย่างดี ทำให้กระดาษที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ มีความขาวสว่างของกระดาษที่เพิ่มสูงขึ้น ประมาณร้อยละ 12.13 และ 9.06 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับความขาวสว่างของกระดาษที่ไม่ผ่านการฟอกเยื่อ ในขณะเดียวกันสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก็ทำให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษลดลง ประมาณร้อยละ 22.81 และ 18.43 ตามลำดับ อีกทั้งยังส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุลดลงประมาณร้อยละ 26.93 และ 15.01 ตามลำดับ

5.1.4 สัดส่วนระหว่างเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อทางการค้าที่เหมาะสมในการผลิตกระดาษ เพื่อให้สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่ดี

เป็นการนำเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ คือ พันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มาทดแทนเยื่อทางการค้า คือ เยื่อจากไม้เนื้อแข็ง (เยื่อใยสั้น) และเยื่อจากไม้

เนื้ออ่อน (เยื่อใยยาว) ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เพื่อใช้ในการผลิตกระดาษ แล้วทดสอบสมบัติต่างๆ ของกระดาษที่ผลิตได้ เพื่อศึกษาว่าเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์นั้นมีความสามารถในการปรับปรุงสมบัติของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อทางการค้าได้หรือไม่ จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดสามารถช่วยในการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นให้ดีขึ้นได้ ทั้งความหนา ความหนาแน่น ความขาวสว่าง ความทึบแสง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง แรงดันทะลุและและแรงฉีกของกระดาษ แสดงว่า เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดสามารถช่วยในการสร้างพันธะของเส้นใยในเนื้อกระดาษได้มากขึ้น และสามารถนำมาใช้ในการทดแทนเยื่อใยสั้นได้อีกด้วย

ในกรณีของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการปรับปรุงสมบัติของกระดาษโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการปรับปรุงสมบัติของกระดาษโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ แต่จะต่างกันตรงที่ความทึบแสงของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษมีแนวโน้มค่าลดลง เมื่อมีการปรับปรุงสมบัติของกระดาษด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ อย่างไรก็ตาม เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์สามารถช่วยในการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวให้ดีขึ้นได้เช่นเดียวกับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้น

เมื่อพิจารณาความแตกต่างของพันธุ์ของต้นข้าวโพดที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวที่มีการปรับปรุงสมบัติของกระดาษโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดทั้งสองพันธุ์ พบว่า ไม่ว่าจะปรับปรุงสมบัติของกระดาษโดยการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวหรือพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ต่าง ก็สามารถช่วยในการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวได้ไม่แตกต่างกัน

ดังนั้น เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดสามารถนำมาใช้ทดแทนเยื่อทางการค้า เพื่อช่วยในการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษได้เป็นอย่างดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในส่วนของการผลิตเยื่อจากแกนกลางของต้นข้าวโพดนั้น ควรมีการทดลองใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อที่ความเข้มข้นต่ำลง เช่น ร้อยละ 5 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง หรือลดอุณหภูมิ หรือเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อให้น้อยลง เพื่อลดการทำลายเส้นใยในขณะต้มเยื่อให้น้อยลง เป็นต้น

5.2.2 ควรมีการศึกษาพันธุ์ของต้นข้าวโพดชนิดอื่นๆ เช่น พันธุ์ข้าวโพดหวาน เพื่อใช้เปรียบเทียบกับข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียวและพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ใช้ในการงานวิจัยนี้ รวมถึงควรมีการศึกษาการผลิตเยื่อและกระดาษจากต้นข้าวโพดที่มีแหล่งที่มาต่างกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] ชุมพล คุณวาสี. เอกสารประกอบการสอนวิชาความสัมพันธ์ระหว่างไม้กับน้ำ (wood-water relationships). ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

[2] Kocurek, J.M. and Stevens, F. Properties of Fibrous Raw Materials and Their Preparation for Pulping: Trees and Their Production of Wood: Pulp and Paper Manufacture: Volume 3. 3 rd ed. Montreal: The Joint Textbook Committee of Paper Industry, 1987.

[3] "vascular Cambium", Available from: http://www.palaeos.com/Plants/ , [7/03/2009]

[4] Sjostrom, E. Wood Chemistry Fundamentals and Applications. 2nd ed. London: Academic Press, 1993.

[5] Mimms, A. Kraft Pulping a Compilation of Notes. Atlanta: TAPPI Press, 1989.

[6] เทียมใจ คมกฤส. กายวิภาคของพฤกษ์. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2541.

[7] "Fiber", Available from: http://www4.ncsu.edu/~hubbe/FIBR.htm, [7/03/2009]

[8] "ผนังเซลล์ของพืช", Available from: http://th.wikipedia.org/wiki, [7/03/2009]

[9] Biermann J.C. Essentials of Pulping and Papermaking. San Diego: Academic Press, 1993.

[10] Sjostrom, E. and Alen, R. Analytical Methods in Wood Chemistry, Pulping, and Papermaking. Berlin: Springer-Verlag, 1999.

[11] วัชรา อินทุลักษณ์. การผลิตเอทิลอัลกอฮอล์จากต้นข้าวโพด. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2527.

[12] "Cellulose", Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose. [7/03/2009]

[13] "Cellulose", Available from: http://www.dentistry.leeds.ac.uk/htm. [7/03/2009]

[14] Wang, Y. Zhao, Y. and Deng. Y. Effect of Enzymatic Treatment on Cotton Fiber Dissolution in NaOH/Urea Solution at Cold Temperature. Carbohydrate Polymer 72 (1), 2008

[15] ศุภลักษณ์ โอสถานนท์. การใช้กากมันสำปะหลังเพื่อทดแทนเยื่อรีไซเคิลในการผลิตกระดาษลอนลูกฟูก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

[16] พรรณวิไล กิ่งสุวรรณรัตน์. การผลิตเอทานอลจากเหง้ามันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

[17] "Cellulose", Available from: http://cameo.mfa.org/search/results.asp?. [7/03/2009]

[18] "Lignin", Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Lignin. [8/03/2009]

[19] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. เอกสารวิชาการเรื่อง อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษในประเทศไทย ปี 2540. กรุงเทพฯ: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2540.

[20] Rowell, R.M. Han J.S. and Rowell J.S. Characterization and Factors Effecting Fiber Properties. Natural Polymers and Agrofibers Composites, 2000.

[21] Pahkala, K. Agricultural and Food Science in Finland, Non-Wood Plants as Raw Material for Pulp and Paper. Master Thesis, Faculty of Agriculture and Forestry, University of Helsinkii, 2001.

[22] Casey, J.P. , Pulping: Pulp and Paper-Chemical and Chemical Technology Volume 1, 3rd ed.. New York: Wiley – Interscience.1980.

[23] Sixta, H. Handbook of Pulp, Volume 2: Mechanical Pulping Process, 1st ed., Weinhei: Wiley-VCH, 2006.

[24] Gullichsen , J. and Fogelholm C.J. Alkaline Process: Chemical Pulping Book , 1st ed., Jyvaskyla: Gummerus Printing, 2000.

[25] Dence, W.C. and Reevw, W.D. Pulp Bleaching-Principles and Practice. Atlanta: Clearance Center, 1996.

[26] Casey,J.P., Bleaching of Chemical Pulps: Pulp and Paper-Chemical and Chemical Technology Volume 1: , 3rd ed., New York: Wiley – Interscience, 1980.

[27] พันทิพา พงษ์เพียจันทร์. หลักการอาหารสัตว์. หลักโภชนศาสตร์และการประยุกต์. ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551.

[28] กฤษฎา สัมพันธารักษ์. พืชไร่. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: บริษัทโรงพิมพ์ไทยวัฒนาพานิชย์ จำกัด, 2531.

[29] หรรษา ปุณณะพยัคฆ์และคณะ. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการแนวทางการพัฒนาการใช้ Biomass Feedstocks เพื่อผลิตเอทานอล. หน่วยปฏิบัติการวิจัยการใช้ประโยชน์จากชีวมวลพืช ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[30] พิเชษฐ์ กรุดลอยมาและสุรพงษ์ ประสิทธิ์วัฒนเสวี. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของข้าวโพด. สถาบันวิจัยพืชไร่ กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ, 2550.

[31] นพพร สายัมพลและคณะ. พืชเศรษฐกิจ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542.

[32] กรมวิชาการเกษตร. เอกสารวิชาการการปลูกพืชไร่. สถาบันวิจัยพืชไร่ กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2539.

[33] พิเชษฐ์ กรุดลอยมา. รายงานการประชุมวิชาการพืชไร่ประจำปี 2550: ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์. สถาบันวิจัยพืชไร่ จังหวัดแม่ฮ่องสอน, 2550.

[34] Ahmed, A. and Zhu, J. Y. Cornstalk as a Source of Fiber and Energy. South China University of Technology Press. Guangzhou, 2006.

[35] Hamilton, F. and Leopold, B. Pulp and Paper Manufacture Volume 3. Secondary Fiber and Non-Wood Pulping. 3rd ed. Montreal: The Joint Textbook Committee of Paper Industry, 1987.

[36] Reddy, N. and Yang,Y. Structure and Properties of High Quality Natural Cellulose Fibers from Corn stalks. Polymer 46, 2005.

[37] Ahmed, A., Won, J.-M. and Ryu, H.. Method for Producing Corn Stalk Pulp and Paper Products from Corn Stalk Pulp. United States Patent Application Publication; Pub. No.: US 2004/0256065 A1, Pub Date: Dec.23, 2004.

[38] Villar, J.C., Revilla, E., Gomez, N., Carbajo, J.M. and Simon, J.L. Improving the Use of Kenaf for Kraft Pulping by Using Mixtures of Bast and Core Fibers. Industrial Crops and Products, 29 (2-3), 2009.

[39] วิทยา ปั้นสุวรรณ. โครงการถ่ายทอดงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษจากปอสา: การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ไม่ใช่ไม้สำหรับอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2005.

[40] Kline, J.E. Paper and Paperboard Manu-facturing and Converting Fundamentals, 2nd ed., New York: Miller Freeman Publications, 1991.

[41] "ใบไม้เปลี่ยนสี", Available from: http://www.vcharkarn.com/. [7/04/2009]

[42] Joutsimo, O., Wathen, R. and Tamminen, T. Effects of Deformation on Pulp Sheet Properties and Fiber Strength. Paperi ja Puu – Paper and Timber, 87 (6), 2005.

[43] Mohlin, U.B., Dahlbom, J. Fiber Deformation and Sheet Strength. Tappi 79 (6), 1996.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณการเตรียมเยื่อและสารเคมี

วิธีการคำนวณปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อ

จากสูตรการคำนวณหาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อ

$$\text{ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)} = \frac{\text{น้ำหนักชิ้นไม้แห้ง (O.D. weight) x ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอดไซด์ที่ต้องการ}}{100}$$

---------- (1)

- หาน้ำหนักต้นข้าวโพดแห้ง (O.D. weight) ก่อนต้มเยื่อ ได้ดังนี้

สมมุติให้

ต้นข้าวโพดที่ใช้ในการต้มเยื่อมีความชื้น (% moisture content, %MC) ร้อยละ 13.91

น้ำหนักของต้นข้าวโพดที่ใส่ในแต่ละบอมบ์ เท่ากับ 174.75 กรัม

จาก

$$\text{O.D. weight} = \frac{\text{(น้ำหนักของต้นข้าวโพดที่ใส่ในบอมบ์) (100 - \%MC)}}{100}$$

$$= \frac{174.75 \text{ g } (100-13.91)}{100}$$

$$= 150.44 \text{ g O.D. weight}$$

ดังนั้น น้ำหนักต้นข้าวโพดแห้งก่อนต้มเยื่อ เท่ากับ 150.44 กรัม

- หาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อ

เมื่อต้องการใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อ เท่ากับร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง

จาก

$$\text{ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (g)} = \frac{\text{(O.D. weight)(15)}}{100}$$

$$= \frac{150.44 \text{ g x } 15}{100}$$

$$= 22.57 \text{ g}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังนั้น ต้องชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 22.57 กรัม เพื่อให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง

วิธีคำนวณร้อยละผลผลิตของเยื่อ (%Yield) ของเยื่อที่ได้หลังจากการต้มเยื่อ

จากสูตรการคำนวณหาร้อยละผลผลิตของเยื่อ

$$\%yield = \frac{\text{O.D. weight ของต้นข้าวโพดหลังต้มเยื่อ}}{\text{O.D. weight ของต้นข้าวโพดก่อนต้มเยื่อ}} \times 100$$

---------- (2)

- หาน้ำหนักเยื่อแห้งของต้นข้าวโพดหลังการต้มเยื่อ

เมื่อ เยื่อของต้นข้าวโพด (หลังต้มเยื่อ) มีความชื้นร้อยละ 84.04

น้ำหนักของเยื่อต้นข้าวโพดที่ได้หลังการต้มเยื่อ เท่ากับ 1,392.3 กรัม (น้ำหนักรวม 4 บอมบ์) จาก

$$\text{O.D. weight} = \frac{\text{(น้ำหนักของเยื่อต้นข้าวโพดหลังต้มเยื่อ) (100 - \%MC)}}{100}$$

$$= \frac{1{,}392.3 \times (100 - 84.04)}{100}$$

$$= 222.21 \text{ g O.D. weight}$$

ดังนั้น น้ำหนักเยื่อแห้งของต้นข้าวโพดหลังการต้มเยื่อ เท่ากับ 222.21 กรัม

- หาร้อยละผลผลิตของเยื่อ (%Yield) ของเยื่อต้นข้าวโพดที่ได้หลังจากการต้มเยื่อ

เมื่อ น้ำหนักต้นข้าวโพดแห้งก่อนต้มเยื่อ เท่ากับ 150.44 กรัม

น้ำหนักเยื่อแห้งของต้นข้าวโพดหลังการต้มเยื่อ เท่ากับ 222.21 กรัม

จากสมการที่ 2 จะได้

$$\%yield = \frac{222.21 \text{ g O.D. weight}}{(150.44 \text{ g O.D. weight})(4)} \times 100$$

$$= \frac{222.21}{601.76} \times 100$$

$$= 36.93 \%$$

ดังนั้น ร้อยละผลผลิตของเยื่อต้นข้าวโพดหลังต้มเยื่อ เท่ากับ 36.93 เปอร์เซ็นต์

วิธีคำนวณอัตราส่วนของของเหลว (สารเคมี) ต่อน้ำหนักต้นข้าวโพด (L/W ratio) **ที่ใช้ในการต้มเยื่อ**

เมื่อ

- ปริมาณน้ำที่ใช้ในการต้มเยื่อเฉลี่ย 4 บอมบ์ เท่ากับ 2,000 มิลลิลิตร
- น้ำหนักของต้นข้าวโพดที่ใส่ในแต่ละบอมบ์ เท่ากับ 174.75 กรัม
- ต้นข้าวโพดมีความชื้น (ก่อนต้มเยื่อ) ร้อยละ 13.91

นั่นแสดงว่า ต้นข้าวโพดหนัก 100 กรัม จะมีความชื้นอยู่ 13.91 กรัม

ถ้าต้นข้าวโพดที่ใส่ในแต่ละบอมบ์ 174.75 กรัม จะมีความชื้นอยู่เท่ากับ 24.31 กรัม

ดังนั้น น้ำหนักจริงของต้นข้าวโพดก่อนต้มเยื่อ เท่ากับ 174.75 - 24.31 = 150.44 กรัม

น้ำหนักความชื้นที่อยู่ในต้นข้าวโพด เท่ากับ 24.31 กรัม

จะได้ว่าอัตราส่วนของน้ำต่อน้ำหนักต้นข้าวโพด (L/W ratio) ที่ใช้ในการต้มเยื่อที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้งเป็น

L	:	W
ปริมาณน้ำที่ใช้ในการต้มเยื่อ	:	ปริมาณ (น้ำหนักแห้ง) ของต้นข้าวโพด
2,000 + 24.31	:	150.44
2,024.31	:	150.44
13.46	:	1
13	:	1

ดังนั้น อัตราส่วนของน้ำต่อน้ำหนักต้นข้าวโพดที่ใช้ในการต้มเยื่อที่โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 15 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง มีค่าเท่ากับ 13 ต่อ 1 (L/W ratio = 13 :1)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการคำนวณหาน้ำหนักเยื่อต้นข้าวโพดที่จะใช้ในการตีกระจายเยื่อ (disintegration)

จากสูตรการคำนวณหาน้ำหนักเยื่อต้นข้าวโพดที่จะใช้ในการตีกระจายเยื่อ

$$\text{O.D. weight} = \frac{(\text{น้ำหนักของเยื่อต้นข้าวโพดหลังต้มเยื่อ})\ (100 - \%MC)}{100}$$

$$\text{น้ำหนักของเยื่อต้นข้าวโพดหลังต้มเยื่อ} = \frac{(\text{O.D. weight}) \times 100}{(100 - \%MC)}$$

---------- (3)

เมื่อ

- น้ำหนักแห้งของเยื่อสำหรับเครื่องตีกระจายเยื่อ (disintegrator) เท่ากับ 24 g O.D. weight
- เยื่อต้นข้าวโพด (หลังต้มเยื่อ) มีความชื้นร้อยละ 84.04
- ปริมาณน้ำที่ใช้สำหรับตีกระจายเยื่อ เท่ากับ 2,000 มิลลิลิตร

แทนค่าต่างๆ ในสมการที่ 3 จะได้ว่า

$$\text{น้ำหนักของเยื่อต้นข้าวโพดหลังต้มเยื่อ} = \frac{(24 \text{ g O.D weight}) \times 100}{(100 - 84.04)}$$

$$= 150.38 \text{ g}$$

ดังนั้น น้ำหนักเยื่อต้นข้าวโพดที่จะใช้ในการตีกระจายเยื่อในแต่ละครั้ง เท่ากับ 150.38 กรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการคำนวณการหาปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการหาค่าการระบายน้ำของเยื่อ (freeness)

เมื่อ ความเข้มข้นของน้ำเยื่อจากต้นข้าวโพด (% consistency) ที่ได้หลังจากการตีกระจายเยื่อเท่ากับร้อยละ 1.14

- หาปริมาณของน้ำเยื่อที่ต้องชั่งหลังจากการตีกระจายเยื่อเพื่อวัดค่าการระบายน้ำ โดยกำหนดให้ใช้น้ำเยื่อที่มี % consistency เท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาณ 1000 มิลลิลิตร

จากสูตรการคำนวณหาปริมาณน้ำเยื่อเพื่อใช้วัดค่าการระบายน้ำของเยื่อ

$$C_1V_1 = C_2V_2 \qquad \text{---------- (4)}$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อที่เครื่องวัดสภาพการระบายได้ของเยื่อ (freeness) ต้องการ

C_2 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด (หลังการตีกระจายเยื่อ)

V_1 = ปริมาณน้ำเยื่อที่ใช้ในการวัดค่าสภาพการระบายได้ของเยื่อ เท่ากับ 1,000 มิลลิลิตร

V_2 = ปริมาณน้ำเยื่อที่ต้องการหา เพื่อใช้ในการหาค่าสภาพระบายได้ของเยื่อ

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ 4 จะได้ว่า

$$0.3 \times (1000 \text{ มิลลิลิตร}) = 1.14 \times V_2$$

$$V_2 = 263.16$$

$$V_2 \sim 263 \text{ มิลลิลิตร}$$

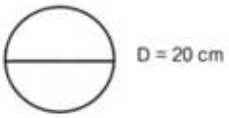
ดังนั้น ต้องชั่งน้ำเยื่อหลังจากตีกระจายเยื่อประมาณ 263 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำจนมีปริมาตรเป็น 1000 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดค่าการระบายน้ำของเยื่อ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีคำนวณน้ำหนักเยื่อจากต้นข้าวโพดเพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษ

กำหนดให้

- ต้องการกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) เท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร
- เส้นผ่านศูนย์กลางของกระดาษ เท่ากับ 20 เซนติเมตร
- ความเข้มข้นของน้ำเยื่อที่ใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษ เท่ากับร้อยละ 0.3



- หาน้ำหนักกระดาษแห้ง (O.D. weight) ได้ดังนี้

จาก กระดาษมีน้ำหนักมาตรฐานที่ต้องการ เท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของกระดาษ เท่ากับ 20 เซนติเมตร

จะได้ว่า

กระดาษมีพื้นที่ 1 ตารางเมตร จะมีน้ำหนักเยื่อแห้งเท่ากับ 60 กรัม

ถ้า กระดาษมีพื้นที่ πr^2 จะมีน้ำหนักเยื่อแห้ง เท่ากับ $(3.14)(0.2/2)^2 \times 60 = 1.884$ กรัม

ดังนั้น กระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) เท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร 1 แผ่น จะมีน้ำหนักเยื่อแห้ง เท่ากับ 1.884 กรัม

- หาน้ำหนักเยื่อจากต้นข้าวโพดที่ใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษที่ไม่มีการผสมเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาว

เมื่อ

- ความชื้นของเยื่อจากต้นข้าวโพดหลังทำการตีกระจายเยื่อเรียบร้อยแล้ว เท่ากับร้อยละ 80.82
- ต้องการขึ้นแผ่นกระดาษทั้งสิ้น 40 แผ่น ดังนั้น น้ำหนักเยื่อแห้งทั้งหมดที่ต้องการ เท่ากับ $1.884 \times 40 = 75.36$ กรัม

- หาน้ำหนักเยื่อเปียก เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษ 40 แผ่น

จากสมการที่ 3

$$\text{น้ำหนักเยื่อเปียก} = \frac{(\text{O.D. weight}) \times 100}{(100 - \%MC)}$$

$$= \frac{75.36 \times 100}{100 - 80.82}$$

$$= 392.91 \text{ g}$$

ดังนั้น ต้องชั่งเยื่อเปียกจากต้นข้าวโพดเพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษ 40 แผ่น เท่ากับ 392.91 กรัม

- หาปริมาณน้ำเยื่อที่ต้องใช้ทั้งหมดในการขึ้นแผ่นกระดาษ

จาก ความเข้มข้นของน้ำเยื่อ (% consistency) จากต้นข้าวโพด มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.33

จากสูตร $\%\ \text{consistency} = \frac{\text{O.D. weight}}{\text{water + O.D. weight}} \times 100$

$$1.33\% = \frac{75.36 \text{ กรัม}}{\text{water + O.D. weight}} \times 100$$

$$\text{water + O.D. weight} = 5{,}666.17 \sim 5{,}666 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น ต้องชั่งน้ำเยื่อที่ใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษทั้งหมด เท่ากับ 5,666 กรัม

- ปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีความเข้มข้นเป็นร้อยละ 0.3 เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษ

แทนค่าต่างๆในสมการที่ 4 จะได้ว่า

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$(1.33)(5{,}666.17) = (0.3)(V_2)$$

$$V_2 = 25{,}120.02$$

$$V_2 \sim 25{,}120$$

จะได้ว่า ปริมาณของน้ำเยื่อทั้งหมดที่ต้องใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษที่มีความเข้มข้นของน้ำเยื่อเท่ากับร้อยละ 0.3 เท่ากับ 25,120 มิลลิลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังนั้น ต้องเติมน้ำ เท่ากับ 25,120 – 5,666 = 19,453 มิลลิลิตร

และแสดงว่าต้องใช้น้ำเยื่อเท่ากับ 628 กรัม ต่อการขึ้นแผ่นกระดาษ 1 แผ่น

วิธีการคำนวณหาน้ำหนักเยื่อใยสั้น (hard wood) **ที่จะใช้ในการบดเยื่อ** (beating)

จาก เยื่อใยสั้นมีความชื้นร้อยละ 9.15 แสดงว่า เยื่อใยสั้นมีน้ำหนักเยื่อแห้ง (ส่วนที่เป็นเยื่อจริง) เท่ากับ 90.85 กรัม จากน้ำหนักเยื่อใยสั้นทั้งหมด 100 กรัม

ถ้าต้องการน้ำหนักเยื่อใยสั้น 360 กรัม จะต้องชั่งเยื่อใยสั้นเท่ากับ $\frac{360 \times 100}{90.85} = 396.26$ กรัม

ดังนั้น ต้องชั่งเยื่อใยสั้นเท่ากับ 396.26 กรัม เพื่อให้ได้เยื่อใยสั้นที่มีน้ำหนักเยื่อแห้งเท่ากับ 360 กรัม

วิธีการคำนวณหาน้ำหนักเยื่อใยยาว (soft wood) **ที่จะใช้ในการบดเยื่อ** (beating)

จาก เยื่อใยสั้นมีความชื้นร้อยละ 12.23 แสดงว่า เยื่อใยสั้นมีน้ำหนักเยื่อแห้ง (ส่วนที่เป็นเยื่อจริง) เท่ากับ 87.77 กรัม จากน้ำหนักเยื่อใยสั้นทั้งหมด 100 กรัม

ถ้าต้องการน้ำหนักเยื่อใยสั้น 360 กรัม จะต้องชั่งเยื่อใยสั้นเท่ากับ $\frac{360 \times 100}{87.77} = 410.16$ กรัม

ดังนั้น ต้องชั่งเยื่อใยสั้นเท่ากับ 410.16 กรัม เพื่อให้ได้เยื่อใยสั้นที่มีน้ำหนักเยื่อแห้งเท่ากับ 360 กรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการคำนวณการหาปริมาณน้ำเยื่อสำหรับการหาค่าการระบายน้ำ

- หาความเข้มข้นของเยื่อใยสั้นที่ได้จากการบดเยื่อ

จาก

$$\% \text{ consistency} = \frac{\text{O.D. weight}}{\text{water + O.D. weight}} \times 100$$

---------- (5)

แทนค่าต่างๆในสมการที่ 5 จะได้ว่า

$$\% \text{ consistency} = \frac{360 \text{ กรัม}}{23000 \text{ กรัม} + 360 \text{ กรัม}} \times 100$$

$$= 1.54\%$$

ดังนั้น ความเข้มข้นของเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวที่อยู่ในเครื่องบดเยื่อมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 1.54

- หาปริมาตรของน้ำเยื่อที่ต้องตวงจากเครื่องบดเยื่อ เพื่อใช้ในการวัดค่าสภาพการระบายได้ของเยื่อ (freeness)

เมื่อกำหนดให้ ความเข้มข้นของน้ำเยื่อที่ต้องการ เท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาณ 1000 มิลลิลิตร

จากสมการที่ 4 จะได้ว่า

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$0.3 \times (1000 \text{ มิลลิลิตร}) = 1.54 \times V_2$$

$$V_2 = 194.81$$

$$V_2 \sim 195 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้น ปริมาตรของน้ำเยื่อที่ต้องตวงจากเครื่องบดเยื่อ เพื่อใช้ในการวัดค่าสภาพการระบายได้ของเยื่อมีค่าเท่ากับ 195 มิลลิลิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีคำนวณหาน้ำหนักเยื่อใยสั้น (hard wood) **และเยื่อใยยาว** (soft wood) **เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษ**

โดยกำหนดให้

- กระดาษมีน้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) เท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร
- เส้นผ่านศูนย์กลางของกระดาษเท่ากับ 20 เซนติเมตร
- ความเข้มข้นของน้ำเยื่อ (% consistency) เท่ากับร้อยละ 0.3

- หาน้ำหนักกระดาษแห้ง (O.D. weight) ได้ดังนี้

จาก กระดาษมีน้ำหนักมาตรฐาน เท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางของกระดาษเท่ากับ 20 เซนติเมตร ดังนั้นจะได้ว่า

กระดาษมีพื้นที่ 1 ตารางเมตร จะมีน้ำหนักเยื่อแห้งเท่ากับ 60 กรัม

ถ้า กระดาษมีพื้นที่ πr^2 จะมีน้ำหนักเยื่อแห้ง เท่ากับ $(3.14)(0.2/2)^2 \times 60 = 1.884$ กรัม

ดังนั้น กระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) เท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร 1 แผ่น จะมีน้ำหนักเยื่อแห้ง เท่ากับ 1.884 กรัม

- หาน้ำหนักเยื่อใยสั้นที่ใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษที่ไม่มีเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดผสม

จาก % consistency ของเยื่อ ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.54

แทนค่าในสมการที่ 4 จะได้ว่า

$$\% \text{ consistency} = \frac{\text{O.D. weight}}{\text{water + O.D. weight}} \times 100$$

$$1.54\% = \frac{1.884 \text{ กรัม}}{\text{water + O.D. weight}} \times 100$$

$$\text{water + O.D. weight} = 122.34 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น น้ำหนักเยื่อใยสั้นที่ใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษ เท่ากับ 122.34 กรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 0.3 เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นต่อไป

แทนค่าต่างๆ ในสมการที่ 4 จะได้ว่า

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$(1.54)(122.34) = (0.3)(V_2)$$

$$V_2 = 628$$

ดังนั้น ต้องเติมน้ำเท่ากับ V_2 – (water + O.D. weight) = 628-122.34 = 505.66 มิลลิลิตร และแสดงว่าต้องใช้น้ำเยื่อเท่ากับ 628 กรัม ต่อ การขึ้นแผ่นกระดาษ 1 แผ่น

วิธีคำนวณหาน้ำหนักเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดที่มีการผสมเยื่อใยสั้น (hard wood) **และเยื่อใยยาว** (soft wood) **เพื่อใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษ**

- หาน้ำหนักเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดที่ใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษที่มีเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวผสมในอัตราส่วนต่างๆ กัน

<u>ตัวอย่างเช่น</u> อัตราส่วนของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อใยสั้น เท่ากับ 50 : 50

จาก กระดาษ 1 แผ่น มีน้ำหนังมาตรฐานของกระดาษเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร ดังนั้น กระดาษจะมีน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 1.884 กรัม

นั่นแสดงว่าจะได้

เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด $= \frac{50 \times 1.884}{100} = 0.942$ กรัม

เยื่อใยสั้น $= \frac{50 \times 1.884}{100} = 0.942$ กรัม

- <u>หาน้ำหนักเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดที่ต้องใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษ</u>

โดยคำนวณหาได้จากความชื้นของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด

เมื่อ เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดมีความชื้นเท่ากับร้อยละ 81.73

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จะได้ว่า เยื่อหนัก 100 กรัม จะมีส่วนที่เป็นเยื่อจริงอยู่ในปริมาณเท่ากับ 18.27 กรัม และมีน้ำอยู่ในปริมาณเท่ากับ 81.73 กรัม

ดังนั้น เนื้อของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดจริงหนัก 18.27 กรัม จะมาจากเยื่อ 100 กรัม
ถ้าต้องการเนื้อของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดจริงหนัก 0.942 กรัม จะต้องชั่งเยื่อเท่ากับ $\frac{0.942 \times 100}{18.27} = 5.16$ กรัม

หากต้องการขึ้นแผ่นกระดาษจำนวน 25 แผ่น ต้องใช้เยื่อเปียกเท่ากับ 5.16 x 25 = 129 กรัม

- <u>หาน้ำหนักเยื่อใยสั้นที่ต้องใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษ</u>

โดยคำนวณหาได้จากความชื้นของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด

เมื่อ เยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดมีความชื้นเท่ากับร้อยละ 77.89

จะได้ว่า เยื่อหนัก 100 กรัม จะมีส่วนที่เป็นเยื่อจริงอยู่ในปริมาณเท่ากับ 22.11 กรัม และมีน้ำอยู่ในปริมาณเท่ากับ 77.89 กรัม

ดังนั้น เนื้อของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดจริงหนัก 22.11 กรัม จะมาจากเยื่อ 100 กรัม
ถ้าต้องการเนื้อของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดจริงหนัก 0.942 กรัม จะต้องชั่งเยื่อเท่ากับ $\frac{0.942 \times 100}{22.11} = 4.26$ กรัม

หากต้องการขึ้นแผ่นกระดาษจำนวน 25 แผ่น ต้องใช้เยื่อเปียกเท่ากับ 4.26 x 25 = 106.5 กรัม

ดังนั้น กระดาษ 1 แผ่น จะมีน้ำหนักเยื่อทั้งหมดเท่ากับ 5.16 + 4.26 = 9.42 กรัม
ถ้าต้องการขึ้นแผ่นกระดาษ 25 แผ่น น้ำหนักเยื่อทั้งหมดที่ต้องใช้เท่ากับ 9.42 x 25 = 235.5 กรัม

- จากนั้นปรับความเข้มข้นของเยื่อ (% consistency) ก่อนขึ้นแผ่นกระดาษให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.3

เมื่อ น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษที่ต้องการ เท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร ดังนั้น กระดาษจะมีน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 1.884 กรัม

แทนค่าลงในสมการที่ 5 เพื่อคำนวณน้ำหนักน้ำเยื่อที่ต้องใช้ทั้งหมด จะได้ว่า

$$\% \text{ consistency} = \frac{\text{O.D. weight}}{\text{water + O.D. weight}} \times 100$$

$$0.3\% = \frac{1.884 \text{ กรัม}}{\text{water + O.D. weight}} \times 100$$

$$\text{water + O.D. weight} = 628 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น น้ำหนักน้ำเยื่อที่ต้องใช้ในการขึ้นแผ่นกระดาษในอัตราส่วนเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดต่อเยื่อใยสั้น 50:50 เท่ากับ 628 กรัม ต่อกระดาษ 1 แผ่น

หากต้องการขึ้นแผ่นกระดาษจำนวน 25 แผ่น จะต้องใช้น้ำเยื่อทั้งหมด เท่ากับ 628 x 25 = 15,700

ดังนั้นต้องเติมน้ำเท่ากับ 15,700 - 235.5 = 15,464.5 กรัม

<u>หมายเหตุ</u> : ในกรณีของเยื่อใยยาวก็คิดดังวิธีข้างต้นเช่นกัน

วิธีคำนวณสารเคมีและเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด เพื่อใช้ในการฟอกเยื่อ (bleaching)

สารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อจะคำนวณได้จากน้ำหนักเยื่อแห้ง (O.D. weight) ของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดก่อนการฟอกเยื่อ

เมื่อ ความชื้นของเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดก่อนฟอกเยื่อ เท่ากับร้อยละ 80.04

น้ำหนักเยื่อเปียกที่ใช้ในการฟอกเยื่อ เท่ากับ 450 กรัม

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 3 จะได้ว่า

$$\text{O.D. weight} = \frac{(\text{น้ำหนักของเยื่อต้นข้าวโพดหลังต้มเยื่อ})\ (100 - \%MC)}{100}$$

$$= \frac{450 \times (100 - 80.04)}{100}$$

= 89.82 กรัม

ดังนั้น น้ำหนักเยื่อแห้ง (O.D. weight) ของเยื่อก่อนการฟอกเยื่อเท่ากับ 89.82 กรัม

- ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ

เมื่อต้องการ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ร้อยละ 3

ความเข้มข้นของโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ร้อยละ 2

จาก

$$\text{ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อ (กรัม)} = \frac{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง (กรัม) x ความเข้มข้นของสารเคมีที่ต้องการ}}{100}$$

---------- (6)

แทนค่าต่างๆ ในสมการที่ 6 จะได้ว่า

$$\text{ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ } (H_2O_2) = \frac{89.82 \times 3}{100} = 2.695 \text{ กรัม}$$

$$\text{ปริมาณโซเดียมซิลิเกต } (Na_2SiO_3) = \frac{89.82 \times 2}{100} = 1.796 \text{ กรัม}$$

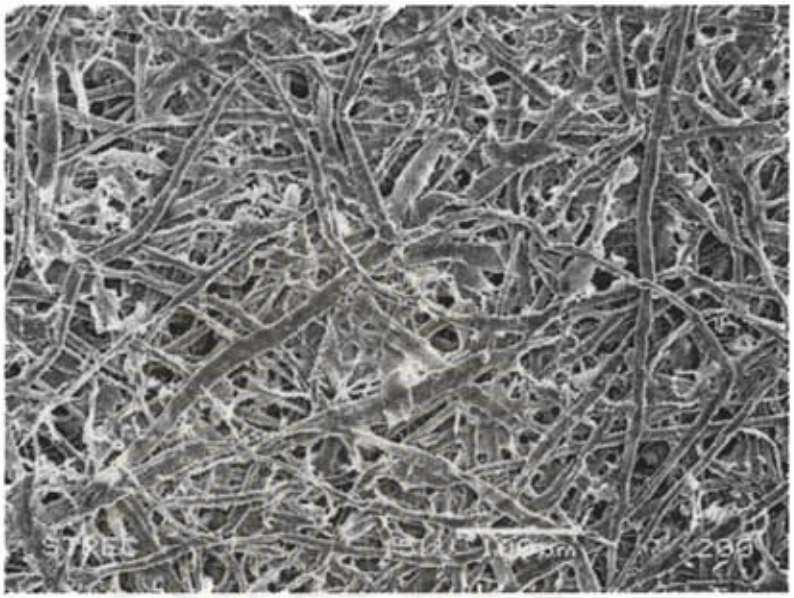
ดังนั้น ต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 2.695 กรัม เพื่อให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 3 และต้องใช้โซเดียมซิลิเกต เท่ากับ 1.796 กรัม เพื่อให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 2 สำหรับการฟอกเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

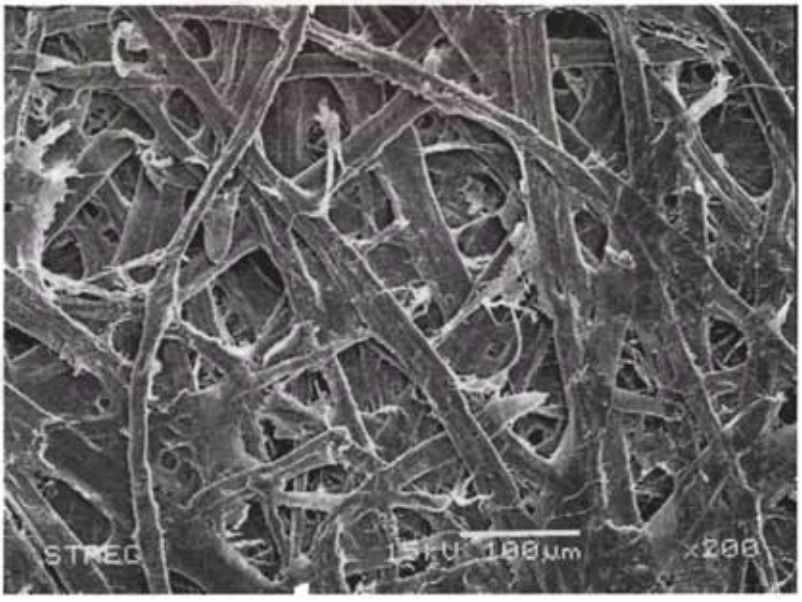
ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

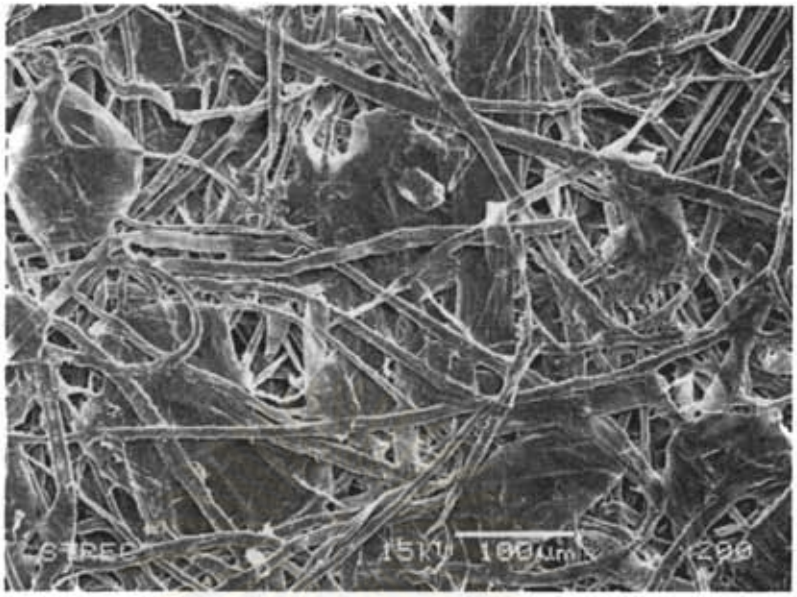
ภาพจากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



ภาพที่ ข-1 กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้น ที่กำลังขยาย 200 เท่า



ภาพที่ ข-2 กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาว ที่กำลังขยาย 200 เท่า



ภาพที่ ข-3 กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว อัตราส่วนร้อยละ 50:50 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่กำลังขยาย 200 เท่า

ภาพที่ ข-4 กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยสั้นที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ อัตราส่วนร้อยละ 50:50 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่กำลังขยาย 200 เท่า

ภาพที่ ข-4 กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดข้าวเหนียว อัตราส่วนร้อยละ 50:50 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่กำลังขยาย 200 เท่า

ภาพที่ ข-6 กระดาษที่ผลิตจากเยื่อใยยาวที่มีการทดแทนด้วยเยื่อที่ผลิตจากต้นข้าวโพดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ อัตราส่วนร้อยละ 50:50 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ที่กำลังขยาย 200 เท่า

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติส่วนตัว

นางสาว สุพิตา สุขจำเริญ เกิดเมื่อวันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดเพชรบุรี

ประวัติการศึกษา

- ปี พ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษาปริญญาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

ผลงานวิชาการ

- Chaiarrekij, S. and Sukjamroen, S. (2008). Papermaking of Various Cornstalk Stem Parts. 4th Mathematics and Physical Sciences Graduate Congress 2008 (MPSGC 08), pp. 79-83. Faculty of science, National University of Singapore, Singapore, 2008.
- สุพิตา สุขจำเริญ. การผลิตเยื่อและกระดาษจากต้นข้าวโพด (Pulping and Papermaking from Corn Stalk). การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 12. หน้า PMP 4 (691-701). 12-13 กุมภาพันธ์ 2552 ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย