

การเปรียบเทียบการปรับสภาพของเส้นใยนุ่นโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และเอนไซม์ไลเปสสำหรับ
การผลิตเยื่อแบบโซดา

นางสาวทิพวรรณ หอมไม่วาย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPARISON OF KAPOK FIBER PRETREATMENT USING SODIUM HYDROXIDE AND
LIPASE FOR SODA PULPING

Miss Thippawan Hommaivai

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบการปรับสภาพของเส้นใยุ่นโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และเอนไซม์ไลเปสสำหรับการผลิตเยื่อแบบโซดา
โดย	นางสาวทิพวรรณ หอมไม่วาย
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศ.ดร.สุดา เกียรติกำจรวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อ.ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
 หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร.อรุณ หาญสืบสาย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
 (ศาสตราจารย์ ดร.สุดา เกียรติกำจรวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
 (อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ)

..... กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
 (อาจารย์ ดร.นุชจรินทร์ เหลืองสะอาด)

ทิพวรรณ หอมไม่วาย : การเปรียบเทียบการปรับสภาพของเส้นใยนุ่นโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และเอนไซม์ไลเปสสำหรับการผลิตเยื่อแบบโซดา. (COMPARISON OF KAPOK FIBER PRETREATMENT USING SODIUM HYDROXIDE AND LIPASE FOR SODA PULPING)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:ศ.ดร.สุดา เกียรติกำจรวงศ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
อ.ดร.กุนที สุวรรณกิจ ,117 หน้า.

เส้นใยนุ่นมีศักยภาพสูงพอที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษได้ เพราะกระดาษที่ได้จากเยื่อนุ่นมีความแข็งแรงต้อแรงดึงสูง อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่สำคัญในกระบวนการผลิตเยื่อจากเส้นใยนุ่น คือ การเปื่อยกผิวของเส้นใยนุ่น เนื่องจากผิวหนังของเส้นใยนุ่นมีไขควิติน (cutin) เคลือบอยู่ จึงต้องแช่น้ำถึง 3 สัปดาห์ เพื่อลดเวลาแช่เส้นใยนุ่นลง การปรับสภาพเส้นใยด้วยวิธีทางเคมีและชีวภาพอาจช่วยกำจัดไขควิตินที่เคลือบบนผิวเส้นใยได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงศึกษาถึงผลของการปรับสภาพเส้นใยนุ่นด้วยวิธีทางเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น เป็นเวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์และผลการปรับสภาพเส้นใยนุ่นด้วยวิธีทางชีวภาพโดยใช้เอนไซม์ไลเปสร้อยละ 0.25 และร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น (หรือเท่ากับ 250 LU/g และ 500 LU/g ของน้ำหนักแห้งของนุ่น ตามลำดับ) เป็นเวลา 1, 3 และ 5 ชั่วโมง ที่มีต่อประสิทธิภาพการผลิตเยื่อแบบโซดาของเส้นใยนุ่น ก่อนต้มเยื่อโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักนุ่นแห้งที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ พบว่า การปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อผลผลิตเยื่อเล็กน้อย แต่ไม่มีนัยสำคัญเชิงสถิติ แต่การปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปสทำให้ผลผลิตเยื่อลดลง การปรับสภาพเส้นใยทั้งสองวิธีส่งผลให้ปริมาณต่างที่เหลือนี้ออกมากขึ้น การปรับสภาพเส้นใยทำให้การใช้สารเคมีในการต้มเยื่อลดลง การปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และเอนไซม์ไลเปสมีผลให้ค่าปริมาณลิกนินลดลง แต่การปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลง นอกจากนี้การปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ความแข็งแรงต้อแรงดึง ความแข็งแรงต้อแรงดันทะลุ และความแข็งแรงต้อแรงฉีกเพิ่มขึ้น ในขณะที่การปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปสให้ความแข็งแรงต้อแรงดึงและความแข็งแรงต้อแรงดันทะลุลดลง แต่ความแข็งแรงต้อแรงฉีกกลับเพิ่มขึ้น

สาขาวิชา เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ลายมือชื่อนิสิต.....

ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5172301223 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY

KEYWORDS : KAPOK FIBER / SODA PULPING / PRETREATMENT

THIPPAWAN HOMMAIVAI : COMPARISON OF KAPOK FIBER PRETREATMENT
USING SODIUM HYDROXIDE AND LIPASE FOR SODA PULPING .

ADVISOR : PROF.SUDA KIATKAMJORNWONG, Ph.D.CO-ADVISOR:KUNTINEE
SUVARNAKICH,Ph.D. , 117 pp.

Kapok fiber can be one of the potential fiber sources for papermaking because paper containing kapok pulp provided excellent tensile strength. Due to the waxy cutin on the kapok fiber surface making kapok fibers hardly dampened, kapok fibers needed to be immersed in water for at least 3 weeks. It was hypothesized that the waxy cutin coating kapok fiber surface might be removed by chemical and biological pretreatment. Therefore, immersing time of kapok fibers before soda pulping could be shorten. Thus, the objective of this research was to study the conditions of alkali pretreatment in terms of sodium hydroxide 5% and 10% based on oven dried (O.D.) fiber weight for 1, 2 and 3 weeks of immersion. For biological pretreatment lipase at 0.25% and 0.5% based on the O.D. fiber weight (or 250 LU/g and 500 LU/g of O.D. fiber weight respectively) for 1, 3 and 5 hours. Both pretreatments impose effects on soda pulping efficiency of kapok fibers. After the pretreatments, kapok fibers were pulped using soda process with 20% of sodium hydroxide based on O.D. fiber weight which was the optimal dosage determined from the experiment at 120 °C for 2 hours. Compared to the control experiment without the pretreatments before soda pulping, it was found that the sodium hydroxide pretreatment did not significantly affected pulp yield while the lipase pretreatment decreased pulp yield. Both pretreatments decreased residual alkali which implied that the pretreatment used the lower pulping chemicals. Both pretreatments also caused the lower lignin content. It was also discovered that sodium hydroxide pretreatment provided the higher tensile, burst and tear strength while lipase pretreatment offered the higher tensile and burst with the lower tear strengths.

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

Academic Year : 2010.....

Advisor's Signature.....

Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.สุดา เกียรติกำจรวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อ.ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาเสียสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ สนับสนุนและให้กำลังใจ ชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนดูแลผู้วิจัยตั้งแต่แรกเข้าการศึกษาจนจบการศึกษาเป็นอย่างดี ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์สมพร ชัยอารีย์กิจ ผู้ทำหน้าที่เป็นอาจารย์พี่เลี้ยง ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ สนับสนุนและให้กำลังใจ ชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนดูแลผู้วิจัยตั้งแต่แรกเข้าการศึกษาจนจบการศึกษาเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ภายใต้โครงการเมธีวิจัยอาวุโสเลขที่ RTA5080004 ระยะที่ 2 ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนสนับสนุนตลอดงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.อรัญ หาญสืบสาย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สีหนาท ประสงค์สุข และอาจารย์ ดร.นุชจรินทร์ เหลืองสะอาด กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่สละเวลามารับคำแนะนำและทำการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์เยื่อและกระดาษบ้านโป่ง บริษัทในเครือ SCG ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องบดเยื่อในระหว่างการทำวิจัย และบริษัท East Asiatic (Thailand) ที่ให้ความอนุเคราะห์เอนไซม์ไลเปส และภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัยและอุปกรณ์วิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจในการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องที่คอยเลี้ยงดูผู้วิจัยมาเป็นอย่างดี คอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนทางด้านการศึกษาและการวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ข้อกำหนดของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.7 เนื้อหาของงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.2 องค์ประกอบของเส้นใย.....	5
2.2.1 ชั้นมิดเดิลลาเมลลา.....	5
2.2.2 ชั้นผนังเซลล์ของเส้นใย (cell wall).....	5
2.2.3 ลูเมน (lumen).....	6
2.3 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อ.....	7
2.3.1 เส้นใยที่ได้จากพืชที่มีเนื้อไม้.....	7
2.3.1.1 ไม้เนื้อแข็ง.....	7
2.3.1.2 ไม้เนื้ออ่อน.....	8

	หน้า
2.3.2 เส้นใยที่ได้จากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้.....	9
2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย.....	10
2.4.1 เซลลูโลส (cellulose).....	10
2.4.2 เฮมิเซลลูโลส (hemi cellulose).....	10
2.4.3 ลิกนิน (lignin).....	12
2.4.4 สารแทรก (extractives).....	13
2.5 เส้นใยนุ่น.....	14
2.6 การผลิตเยื่อ (pulping).....	15
2.6.1 การผลิตเยื่อเชิงกล (mechanical pulping).....	15
2.6.2 กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลกึ่งเคมี (chemimechanical pulping).....	16
2.6.3 การผลิตเยื่อเคมี (chemical pulping).....	16
2.7 การปรับปรุงสภาพของเส้นใย.....	17
2.8 เอนไซม์ไลเปส.....	18
2.9 ปฏิกริยาขององค์ประกอบเคมีในเส้นใยในการผลิตเยื่อแบบต่าง.....	18
2.9.1 ปฏิกริยาทางเคมีของเยื่อ.....	18
2.9.2 ปฏิกริยาของลิกนิน.....	19
2.9.3 ปฏิกริยาของคาร์โบไฮเดรต.....	19
2.10 การบดเยื่อ/การตีเยื่อ(refining/beating).....	20
2.10.1 เครื่องบดเยื่อ (refiner)	20
2.10.2 เครื่องตีเยื่อ (beater)	21
2.10.3 กลไกการบดเยื่อ/ตีเยื่อ (refining/beating mechanism).....	22
2.10.4 อิทธิพลของความเข้มข้นของเยื่อต่อการบดเยื่อ.....	22
2.10.5 ผลของการบดเยื่อที่มีต่อสมบัติของกระดาษ.....	23
2.10.6 ผลของการบดเยื่อที่มีต่อสมบัติด้านโครงสร้าง.....	23
2.10.7 ความหึงงอของเส้นใยหลังการบดเยื่อแบบจวนบด.....	23
2.11 คุณภาพและมิติของเส้นใย.....	24
2.12 สมบัติเยื่อและกระดาษ.....	24
2.13 การวิเคราะห์มุมสัมผัส (contact angle analysis).....	27

	หน้า
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
3.1 วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	30
3.1.1 วัสดุและสารเคมี.....	30
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	30
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	31
3.2.1 การทดลองตอนที่ 1: การผลิตเยื่อวิธีโซดาจากเส้นใยนุ่นในภาวะต่างๆ เพื่อใช้ในการทดลองควบคุม.....	31
3.2.2 การทดลองตอนที่ 2: การผลิตเยื่อแบบโซดาของเส้นใยนุ่นที่ผ่านการ ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	36
3.2.3 การทดลองตอนที่ 3: การผลิตเยื่อแบบโซดาของเส้นใยนุ่นที่ผ่านการ ปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส.....	38
3.2.4 การทดลองตอนที่ 4: การผลิตเยื่อแบบโซดาของเส้นใยนุ่นที่ผ่านการ ปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส โดยการลดปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ในการต้มเยื่อลง	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	42
4.1 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อวิธีโซดาจากนุ่นในภาวะต่างๆเพื่อใช้ในการทดลอง ควบคุม.....	42
4.2 ผลการปรับสภาพเส้นใยนุ่นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนเข้าสู่กระบวนการ ผลิตเยื่อแบบโซดา.....	60
4.3 ผลการปรับสภาพเส้นใยนุ่นด้วยเอนไซม์ไลเปสก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต เยื่อแบบโซดา.....	80
4.4 ผลการปรับสภาพเส้นใยนุ่นด้วยเอนไซม์ไลเปสก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อ แบบโซดาโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณร้อยละ 10 ในการต้มเยื่อ.....	98
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	105

	หน้า
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	105
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	109
รายการอ้างอิง.....	110
ภาคผนวก.....	112
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	117

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ข้อมูลอนุกรมวิธานของนุ่น.....	14
3-1	ภาวะการผลิตเยื่อแบบโซดาของเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	37
3-2	ภาวะการผลิตเยื่อแบบโซดาของเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส.....	39
4-1	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยื่อนุ่น.....	43
4-2	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยื่อนุ่น.....	43
4-3	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อนุ่น.....	45
4-4	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อนุ่น.....	45
4-5	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อและการขจัดความหึ่งงอของเส้นใยต่อลักษณะเส้นใยของเยื่อนุ่น.....	48
4-6	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อและการขจัดความหึ่งงอของเส้นใยต่อมิติของเส้นใยของเยื่อนุ่น.....	48
4-7	ผลการวิเคราะห์สถิติของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อและการขจัดความหึ่งงอของเส้นใยต่อสมบัติต่าง ๆ ของแผ่นทดสอบ.....	55
4-8	ผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อ.....	64
4-9	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่นต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อนุ่น.....	65
4-10	ผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่มีต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อนุ่น.....	66
4-11	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่นต่อคุณภาพและมิติของเส้นใย.....	68

ตารางที่	หน้า
4-12	ผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่มีต่อมิติของเส้นใย..... 69
4-13	ผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของแผ่นทดสอบ..... 79
4-14	ผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้เอนไซม์ไลเปสและระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อ..... 84
4-15	ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่นต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อนุ่น..... 85
4-16	ผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้เอนไซม์ไลเปสและระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่มีต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ..... 86
4-17	ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่นต่อคุณภาพและมิติของเส้นใย..... 87
4-18	ผลการวิเคราะห์สถิติของการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสและเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่มีต่อมิติของเส้นใย 88
4-19	ผลการวิเคราะห์สถิติของการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสและเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่มีต่อสมบัติของแผ่นทดสอบ..... 97
4-20	การเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบที่ผลิตด้วยวิธีโซดาของแต่ละภาวะที่เหมาะสม..... 99
4-21	การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อที่ผลิตด้วยวิธีโซดาของแต่ละภาวะที่เหมาะสม..... 100
4-22	การเปรียบเทียบสมบัติด้านความแข็งแรงและสมบัติด้านทัศนศาสตร์ของแผ่นทดสอบของเยื่อที่ผลิตด้วยวิธีโซดาของแต่ละภาวะที่เหมาะสม..... 101

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	โครงสร้างของเส้นใย.....	6
2-2	ตัวอย่างเซลล์ของไม้เนื้อแข็ง.....	7
2-3	ตัวอย่างเซลล์ของไม้เนื้ออ่อน.....	9
2-4	โครงสร้างของเซลลูโลส.....	10
2-5	น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบในเฮมิเซลลูโลส.....	11
2-6	โครงสร้างลิกนิน.....	12
2-7	ความแตกต่างระหว่างปริมาณและตำแหน่งของสารแทรกที่พบในลำต้นสน ของประเทศสก๊อตแลนด์.....	13
2-8	เส้นใยนุ่ม.....	15
2-9	ลักษณะของเครื่องบิดแบบกรวย.....	20
2-10	เครื่องบิดเยื่อแบบจานบิด และลักษณะที่จานบิดในเครื่องบิดเยื่อ.....	21
2-11	เครื่องตีเยื่อ.....	21
2-12	ผลของความร้อนและความเย็นที่มีต่อการขจัดความหึ่งงของเส้นใย.....	23
2-13	มุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเปียกผิว.....	27
4-1	ผลของปริมาณไซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจาก เยื่อนุ่มก่อนและหลังขจัดความหึ่งงของเส้นใย.....	49
4-2	ผลของปริมาณไซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของ กระดาษที่ผลิตจากเยื่อนุ่มก่อนและหลังขจัดความหึ่งงของเส้นใย.....	50
4-3	ผลของปริมาณไซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของ กระดาษที่ผลิตจากเยื่อนุ่มก่อนและหลังขจัดความหึ่งงของเส้นใย.....	51
4-4	ผลของปริมาณไซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของ กระดาษที่ผลิตจากเยื่อนุ่มก่อนและหลังขจัดความหึ่งงของเส้นใย.....	52
4-5	ผลของปริมาณไซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจาก เยื่อนุ่มก่อนและหลังขจัดความหึ่งงของเส้นใย.....	53

ภาพที่		หน้า
4-6	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อ่อนก่อนและหลังขจัดความหึงงอของเส้นใย.....	54
4-7	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อมูมสัมพัทธ์ของน้ำบนกระดาษด้านบนที่ผลิตจากเยื่อ่อนก่อนการขจัดความหึงงอของเส้นใย.....	57
4-8	ผลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อมูมสัมพัทธ์ของน้ำบนกระดาษด้านล่างที่ผลิตจากเยื่อ่อนก่อนขจัดความหึงงอของเส้นใย.....	57
4-9	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อมูมสัมพัทธ์ของน้ำบนกระดาษด้านบนที่ผลิตจากเยื่อ่อนหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย.....	58
4-10	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อมูมสัมพัทธ์ของน้ำบนกระดาษด้านล่างที่ผลิตจากเยื่อ่อนหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย.....	58
4-11	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย่อนต่อผลผลิตเยื่อ.....	61
4-12	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย่อนต่อปริมาณต่างเหลือหลังจากต้มเยื่อ.....	62
4-13	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย่อนต่อค่าคัปปานัมเบอร์.....	63
4-14	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย่อนต่อความหนาแน่น.....	70
4-15	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย่อนต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	71
4-16	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย่อนต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ.....	72
4-17	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย่อนต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก.....	74
4-18	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย่อนต่อความขาวสว่าง.....	75
4-19	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย่อนต่อความทึบแสง.....	76

ภาพที่		หน้า
4-20	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อคุณสมบัติของน้ำบนกระดาษด้านบน	77
4-21	ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อคุณสมบัติของน้ำบนกระดาษด้านล่าง.....	77
4-22	ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อผลผลิตเยื่อ.....	81
4-23	ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อปริมาณต่างเหลือหลังจากต้มเยื่อ.....	82
4-24	ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อคัปปานัมเบอร์.....	83
4-25	ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อความหนาแน่น.....	89
4-26	ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	90
4-27	ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ.....	91
4-28	ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก.....	92
4-29	ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อความขาว	
4-30	สว่าง.....	93
4-31	ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อความทึบแสง.....	94
4-32	ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อคุณสมบัติของน้ำบนกระดาษด้านบน	95
4-33	ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อคุณสมบัติของน้ำบนกระดาษด้านล่าง	95
	ภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตอนการทดลองต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง...	101

ภาพที่		หน้า
4-34	ภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตอนการทดลองต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดัน ทะลุ.....	102
4-35	ภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตอนการทดลองต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก	103
4-36	ภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตอนการทดลองต่อมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษ ด้านบน	104
4-37	ภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตอนการทดลองต่อมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษ ด้านล่าง.....	104

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความต้องการและปริมาณการใช้กระดาษของประเทศมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น [1] โดยทั่วไปแล้วกระดาษผลิตมาจากส่วนผสมระหว่างเยื่อใยสั้น (เส้นใยจากไม้เนื้อแข็ง) กับเยื่อใยยาว (เส้นใยจากไม้เนื้ออ่อน) ซึ่งมาจากไม้ยืนต้นเป็นส่วนใหญ่ สำหรับประเทศไทยนั้นสามารถผลิตได้แต่เยื่อใยสั้นเพียงอย่างเดียว ในขณะที่เยื่อใยยาวนั้นประเทศไทยมีการนำเข้ามาจากประเทศแคนาดา สหรัฐอเมริกา ชิลี สวีเดน เยอรมัน นิวซีแลนด์ การหาแหล่งเส้นใยในประเทศที่สามารถนำมาทดแทนเยื่อใยยาวได้จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถช่วยลดการนำเข้าเยื่อใยยาวจากต่างประเทศลงได้ ซึ่งถือเป็นการลดต้นทุนการผลิตลงด้วย อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันเส้นใยจากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย ต้นไผ่ ได้ถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษมากขึ้น นุ่นเป็นพืชที่พบเห็นได้ตามทั่วไปในประเทศไทย สำหรับใช้ประโยชน์ในครัวเรือนประเภทยัดเป็นไส้ในของหมอน ที่นอน แต่ปัจจุบันใช้เส้นใยสังเคราะห์แทนนุ่นแล้ว เส้นใยนุ่นมีความแข็งแรงสูง ซึ่งน่าจะมีศักยภาพสูงพอในการที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษได้

จากการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการนำเส้นใยนุ่นมาผลิตเป็นกระดาษ พบว่า เส้นใยนุ่นสามารถนำมาผลิตเป็นกระดาษได้ เพราะเส้นใยนุ่นให้สมบัติของกระดาษใกล้เคียงกับเยื่อใยยาว [2] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากผิวหน้าของเส้นใยนุ่นประกอบด้วยไขคิวติน (cutin) จึงส่งผลให้เส้นใยนุ่นมีความต้านทานการซึมน้ำสูง ทำให้กระบวนการผลิตเยื่อต้องใช้เวลาอันยาวนาน เนื่องจากต้องใช้เวลาในการแช่นุ่นในน้ำเป็นเวลาถึง 3 สัปดาห์ ก่อนที่นำมาผลิตเป็นเยื่อด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส [2,3] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงสภาพเส้นใยนุ่นโดยใช้กระบวนการทางเคมีและทางชีวภาพ ก่อนที่จะนำเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับปรุงสภาพแล้วไปเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อด้วยวิธีไฮโดรไลซิสต่อไป คาดว่า การปรับปรุงสภาพของเส้นใยนุ่นน่าจะช่วยลดเวลาการเตรียมนุ่นเพื่อใช้ในการผลิตเป็นเยื่อกระดาษได้และทำให้ประสิทธิภาพในการต้มเยื่อด้วยวิธีไฮโดรไลซิสเพิ่มขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 หาดูภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพเส้นใยนุ่มด้วยกระบวนการทางเคมีและทางชีวภาพก่อนเข้าสู่การผลิตเยื่อแบบโซดา

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของการปรับสภาพเส้นใยนุ่มด้วยกระบวนการทางเคมีและทางชีวภาพก่อนเข้าสู่การผลิตเยื่อแบบโซดาที่มีต่อสมบัติของเยื่อที่ผลิตได้

1.2.3 เปรียบเทียบการผลิตเยื่อแบบโซดาจากนุ่นที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเส้นใยและผ่านการปรับสภาพเส้นใยด้วยกระบวนการทางเคมีและทางชีวภาพ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

โครงการวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ตอน ดังนี้คือ

1.3.1 การหาภาวะการผลิตเยื่อที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา (soda pulping) จากเส้นใยนุ่มเพื่อใช้เป็นการทดลองควบคุม โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ปริมาณร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง อัตราส่วนระหว่างของเหลวต่อของแข็ง (liquor-to-wood ratio, L:W) คือ 17 ต่อ 1 ต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที นำเยื่อที่ผลิตได้มาทำการบดเยื่อด้วยเครื่องบดเยื่อแบบจานบด (disc refiner) โดยใช้ระยะห่างระหว่างจานบด (disc gap) 10/1000 นิ้ว จำนวน 2 ครั้ง ที่ความเข้มข้นของเยื่อร้อยละ 5 นำเยื่อที่ผ่านการบดแล้วส่วนหนึ่งมาตีกระจายในน้ำร้อน เพื่อขจัดความหึงงอและโค้งงอของเส้นใยที่เกิดจากการบดเยื่อ (latency removal) จากนั้นนำเยื่อทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการตีกระจายในน้ำร้อนมาขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร ทดสอบสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบต่าง ๆ เปรียบเทียบสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้ แล้วเลือกภาวะที่เหมาะสมมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

1.3.2 การหาภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเส้นใยด้วยสารเคมี คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยแช่เยื่อนุ่มด้วยสารละลาย NaOH ร้อยละ 5 และ 10 ต่อน้ำหนักแห้งของนุ่น ในน้ำ 13 ลิตร เป็นเวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์ เมื่อแช่เยื่อนุ่มครบระยะเวลาแล้ว ล้างเยื่อด้วยน้ำประปาให้สะอาดโดยกำหนดปริมาตรน้ำในการล้างเท่ากันทุกครั้ง นำเยื่อที่ล้างสะอาดแล้วมาต้มเยื่อโดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองตามข้อ 1.3.1 นำผลที่ได้มา

วิเคราะห์ เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของการปรับสภาพของเส้นใยนุ่นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากวิธีโซดา และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ การทดลองการผลิตเยื่อจากวิธีโซดาตามข้อ 1.3.1

1.3.3 การหาภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเส้นใยนุ่นด้วยเอนไซม์ไลเปส (lipase) แชน้เยื่อด้วยเอนไซม์ร้อยละ 0.25 และ 0.5 ต่อน้ำหนักแห้งของนุ่น ในน้ำ 13 ลิตรเป็นเวลา 1, 3 และ 5 ชั่วโมง เมื่อแช่เยื่อนุ่นครบระยะเวลาแล้ว ล้างเยื่อด้วยน้ำประปาให้สะอาดโดยกำหนดปริมาตรน้ำในการล้างเท่ากันทุกครั้ง นำเยื่อที่ล้างสะอาดแล้วมาต้มเยื่อโดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองตามข้อ 1.3.1 จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของการปรับสภาพของเส้นใยนุ่นด้วยเอนไซม์ไลเปสที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษที่ผลิตได้จากวิธีโซดา และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ การทดลองการผลิตเยื่อจากวิธีโซดาตามข้อ 1.3.1

1.3.4 การผลิตเยื่อแบบโซดาของเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส โดยการลดปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อลง เพื่อศึกษาการประหยัดสารเคมีในการต้มเยื่อลงเมื่อปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสแล้ว

1.4 ข้อกำหนดที่ใช้ในการวิจัย

กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา (soda pulping) เป็นระบบการผลิตเยื่อแบบต่างโดยใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารต้มเยื่อที่จะไปกำจัดลิกนินออกจากชิ้นไม้

การปรับสภาพของเส้นใยเป็นการเตรียมเส้นใยก่อนนำเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อ มีทั้งการปรับสภาพเส้นใยด้วยกระบวนการทางเคมี (chemical pretreatment) และการปรับสภาพเส้นใยด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (bio-pretreatment)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ภาวะของการปรับสภาพเส้นใยนุ่นด้วยกระบวนการทางเคมีและทางชีวภาพที่เหมาะสมก่อนเข้าสู่การผลิตเยื่อแบบโซดาสำหรับการผลิตเยื่อและกระดาษจากนุ่น

1.5.2 สามารถลดระยะเวลาในการเตรียมเยื่ออุ่นก่อนการเข้าสู่การผลิตเยื่อแบบโซดาหลงได้ และได้เยื่อมีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้เมื่อนำเยื่อนั้นมาผลิตเป็นกระดาษ ย่อมได้กระดาษคุณภาพดียิ่งขึ้น

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.6.1 ศึกษาค้นคว้ารวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.6.2 เตรียมวิธีการทดลอง อุปกรณ์และสารเคมี
- 1.6.3 ผลิตเยื่อแบบโซดาเพื่อเป็นตัวทดลองควบคุม
- 1.6.4 ผลิตเยื่อแบบโซดาโดยการปรับสภาพเส้นใยด้วยเคมีก่อนนำมาผลิตเยื่อ
- 1.6.5 ผลิตเยื่อแบบโซดาโดยการปรับสภาพเส้นใยด้วยชีวภาพก่อนนำมาผลิตเยื่อ
- 1.6.6 ทดสอบสมบัติของเยื่อและกระดาษ
- 1.6.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผลการทดลองและเรียบเรียงเนื้อหาเพื่อผลิตบทความวิจัย
- 1.6.8 เขียนวิทยานิพนธ์และส่งผลงานเผยแพร่

1.7 เนื้อหาของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยเนื้อหา 5 บท คือ บทนำ ทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การทดลอง ผลการทดลองและวิจารณ์ผล และสรุปผล บทที่ 1 เป็นบทนำของวิทยานิพนธ์ บทที่ 2 เป็นส่วนบรรยายเกี่ยวกับเส้นใยอุ่น กระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ กระบวนการบดเยื่อแบบจวนบด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 ประกอบไปด้วยรายละเอียดเกี่ยวกับวัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยและวิธีการทำวิจัย บทที่ 4 เป็นการแสดงผลการทดลองพร้อมทั้งอธิบายผลการทดลองที่ได้ และบทที่ 5 เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลองและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

การทำกระดาษมีมาประมาณ 2,000 ปีแล้ว ในยุคแรกเส้นใยที่นำมาใช้ในการทำกระดาษนั้นได้มาจากเศษผ้าใช้แล้ว ผ้าลินินและพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ (non woody plant) หลังจากนั้นการทำกระดาษได้มีการคิดค้นและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน จนเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และต้องเพิ่มอัตราการผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการกระดาษ ขณะที่ต้นไม้ในการทำกระดาษนั้นเริ่มมีไม่เพียงพอต่อการผลิต ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่สีเขียวให้แก่โลกและลดการตัดต้นไม้ลง ได้มีการคิดค้นวิธีการผลิตแบบใหม่ ๆ และใช้เยื่อจากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้มาเป็นวัตถุดิบทดแทนเยื่อที่ได้จากพืชที่มีเนื้อไม้เพิ่มขึ้น จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องพบว่า เยื่อที่ได้จากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้มีศักยภาพเพียงพอหรือดีกว่าเยื่อจากพืชที่มีเนื้อไม้เมื่อนำมาผลิตกระดาษ [3] เส้นใยของพืชที่ไม่มีเนื้อไม้สามารถนำมาผลิตเป็นกระดาษที่ใช้ทั่วไปสำหรับการพิมพ์เขียนและการบรรจุภัณฑ์

2.2 องค์ประกอบของเส้นใย

องค์ประกอบของเส้นใยแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้นหลัก ๆ คือ ชั้นมิดเดิลลาเมลลา (middle lamella) ชั้นผนังเซลล์ (cell wall) และ ลูเมน (lumen) โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

2.2.1 ชั้นมิดเดิลลาเมลลา

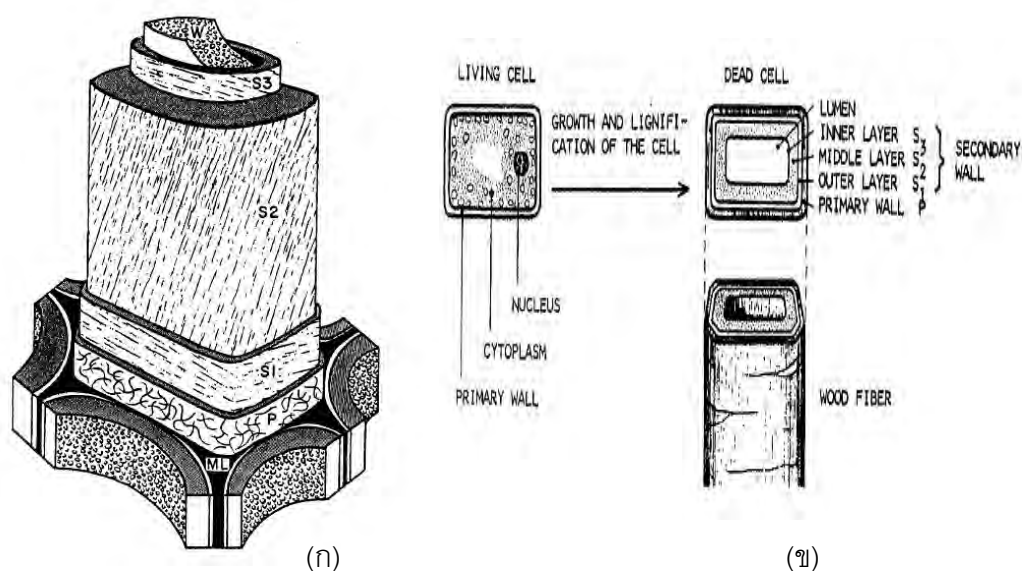
เป็นส่วนของบริเวณที่อยู่ระหว่างเส้นใย (fiber) และมีลิกนิน (lignin) อยู่มาก โดยลิกนินทำหน้าที่เหมือนกาวเพื่อเชื่อมเส้นใยหลาย ๆ เส้นไว้ด้วยกัน

2.2.2 ชั้นผนังเซลล์ของเส้นใย (cell wall)

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

1) ชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall, P) เป็นชั้นที่มีผนังบาง ภายในชั้นนี้มีการเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อย (fibrils/macrofibrils/microfibrils) แบบอิสระ คือไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

2) ชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary cell wall, S) เป็นชั้นที่ประกอบด้วย การเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อย 3 ชั้น ดังนี้คือ S_1 , S_2 และ S_3 เมื่อพิจารณาเส้นใยแล้วจะเห็นได้ว่าชั้น ผนังเซลล์ทุติยภูมิเป็นชั้นที่หนาที่สุด โดยชั้นที่หนาที่สุดคือชั้น S_2 เพราะ S_2 มีเนื้อที่ถึง 80-95% ของ เส้นใย ทั้ง S_1 , S_2 และ S_3 นั้นนอกจากจะแตกต่างกันในเรื่องของความหนาแล้ว ยังมีความแตกต่าง กันในเรื่องของการเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อย (microfibril alignment) ด้วย โดย S_1 มีการเรียง ตัวในแนวเดียว ส่วน S_2 และ S_3 มีการเรียงตัวเป็นรูป S, Z นอกจากนี้สำหรับชั้น S_3 นั้น บางครั้งมี การเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า tertiary wall [4, 5] ดังแสดงในภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 โครงสร้างของเส้นใย โดยแสดงชั้นมิดเดิลลามেলা ชั้นผนังเซลล์ปฐมภูมิ (p) ชั้นผนัง เซลล์ทุติยภูมิ (S_1 , S_2 และ S_3) (ก) และแสดงการพัฒนาจากเซลล์เป็นเส้นใย (ข) [6]

2.2.3 ลูเมน (lumen)

ลูเมน คือ บริเวณช่องว่างตรงกลางของเส้นใย อยู่ถัดจากผนังเซลล์เส้นใยชั้นที่ 2 หรือ 3 เข้าไป ลูเมนเป็นบริเวณที่สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการต้มเยื่อซึ่มเข้ามาทำปฏิกิริยากับเส้นใย

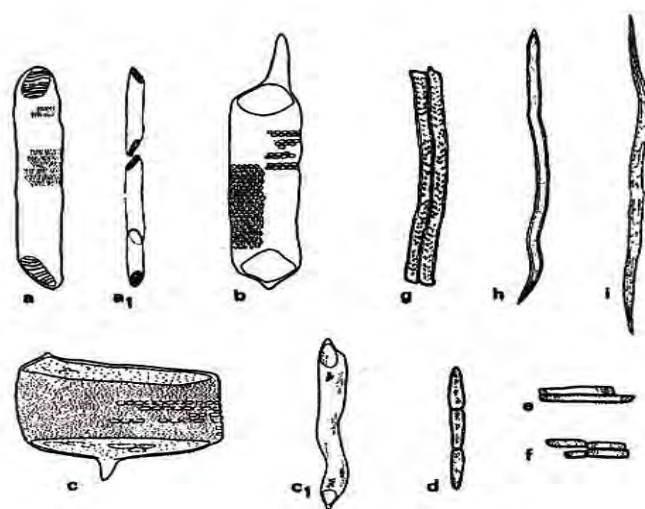
2.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อ

วัตถุดิบหลักที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ คือ เส้นใย ซึ่งส่วนใหญ่อาจได้มาจากส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ลำต้น ใบ ผลของพืช สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ เส้นใยที่ได้จากพืชที่มีเนื้อไม้ และเส้นใยที่ได้จากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้

2.3.1 เส้นใยที่ได้จากพืชที่มีเนื้อไม้

เป็นเส้นใยที่ได้มาจากเนื้อไม้ (wood) ของพืชเมล็ดเปลือยในกลุ่มของสน (conifers) และเนื้อไม้ในกลุ่มของพืชใบเลี้ยงคู่ เส้นใยที่ได้มาจากเนื้อไม้ในทางอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษแบ่งประเภทเนื้อไม้ออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของเส้นใย คือ ไม้เนื้อแข็ง (hardwood) และไม้เนื้ออ่อน (softwood) [4, 7]

2.3.1.1 ไม้เนื้อแข็ง

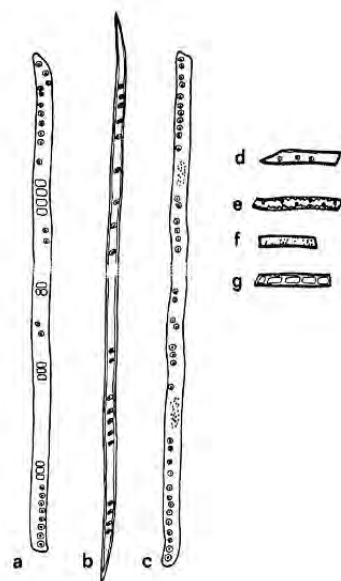


ภาพที่ 2-2 ตัวอย่างเซลล์ของไม้เนื้อแข็ง: เซลล์เวสเซลของไม้ต้นฤดูของต้นเบิช (a) เซลล์เวสเซลของไม้ต้นฤดูของต้นแอสเพน (b) เซลล์เวสเซลของไม้ต้นฤดูของต้นโอ๊ก (c) เซลล์เวสเซลของไม้ปลายฤดูของต้นเบิชและต้นโอ๊ก (a1 และ c1) เซลล์พาเรนไคมาของต้นโอ๊ก (d) เซลล์พาเรนไคมาของต้นแอสเพน (e) เซลล์พาเรนไคมาของต้นเบิช (f) เทรคิซของต้นโอ๊ก (g) เทรคิซของต้นเบิช (h) และเส้นใยลิบริฟอร์มของต้นเบิช (i) [6]

ไม้เนื้อแข็งเป็นไม้ที่มีลักษณะใบกว้าง (broad leaved) มีการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างรวดเร็ว ส่วนใหญ่เป็นเส้นใยจากพืชตระกูลไม้ผลัดใบ (deciduous) เช่น ยูคาลิปตัส (eucalyptus) โอ๊ก (oak) เมเปิล (maple) และแอสเพน (aspen) ต้นกระถินเทพา ต้นกระถินณรงค์ ยกเว้นไม้บางชนิด เช่น สนทะเล สนปติพัทธ์ ไม้เนื้อแข็งประกอบไปด้วยเซลล์หลายชนิดขึ้นอยู่กับหน้าที่และการทำงานที่แตกต่างกัน ได้แก่ เซลล์ลิบริฟอร์ม (libriform cell) เป็นเนื้อเยื่อค้ำจุน เซลล์เวสเซล (vessel cell) เป็นเนื้อเยื่อลำเลียง ดังแสดงในภาพที่ 2-2 ซึ่งเส้นใยมีขนาดเล็กละเอียด และมีความแข็งแรงต่ำกว่าเส้นใยของไม้เนื้ออ่อน ในไม้เนื้อแข็งเซลล์และเส้นใยจะมีหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่ลำต้น เส้นใยมีความยาวเส้นใยประมาณ 1-2 มิลลิเมตร ความกว้างของเส้นใย 19-22 ไมโครเมตร และมีความหนาของผนังเซลล์ของเส้นใย 3-5 ไมโครเมตร เยื่อที่ได้จากไม้เนื้อแข็งจึงเป็นเยื่อใยสั้น ส่งผลให้กระดาษที่ผลิตได้จากไม้เนื้อแข็งมีความแข็งแรงต่ำกว่าไม้เนื้ออ่อน แต่จะมีความเรียบเนียนมากกว่ากระดาษที่ผลิตได้จากเส้นใยของไม้เนื้ออ่อน

2.3.1.2 ไม้เนื้ออ่อน

ไม้เนื้ออ่อนเป็นไม้ในกลุ่มของพวกไม้สนที่มีลักษณะใบแคบ เป็นรูปเข็ม ไม่มีการผลัดใบ มีการเจริญเติบโตค่อนข้างช้า พบมากในแถบประเทศเขตร้อน เช่น สนสองใบ สนสามใบ สนสปรูซ (spruce) ต้นเฮมล็อค (hemlock) เส้นใยมีความเหนียวและความแข็งแรงสูงและมีลักษณะของโครงสร้างที่สม่ำเสมอ เซลล์ที่พบมากในไม้เนื้ออ่อน ดังแสดงในภาพที่ 2-3 คือ เซลล์เทรเคอิด (tracheid cell) พบประมาณร้อยละ 90-95 และ เซลล์เรย์ (ray cell) พบประมาณร้อยละ 5-10 เส้นใยไม้เนื้ออ่อนมีความยาวเส้นใยประมาณ 3-5 มิลลิเมตร ความกว้างของเส้นใย 36-43 ไมโครเมตร และมีความหนาของผนังเซลล์ของเส้นใย 5-11 ไมโครเมตร เยื่อที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนจึงเป็นเยื่อใยยาว ซึ่งนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ



ภาพที่ 2-3 ตัวอย่างเซลล์ของไม้เนื้ออ่อน: (a) เซลล์ไม้ต้นฤดู (a) เซลล์ไม้ปลายฤดู (b) เซลล์
เทรคีดต้นฤดูของต้นสนและต้นสนสปรูซ (c) เทรคีดของต้นสนสปรูซ (d) เทรคีดของต้นสน (e)
เซลล์เรย์ฟาเรนโคมาของต้นสนสปรูซ (f) และ เซลล์เรย์ฟาเรนโคมาของต้นสน (g) [6]

2.3.2 เส้นใยที่ได้จากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้

โดยทั่วไปวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษจะเป็นเส้นใยที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนหรือเส้นใยาวและเส้นใยที่ได้จากไม้เนื้อแข็งหรือเส้นใยสั้น แต่ในปัจจุบันวัตถุดิบที่ได้จากต้นไม้นั้นไม่เพียงพอต่อความต้องการ จึงหันมาใช้เส้นใยที่ได้จากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตกระดาษ อย่างไรก็ตาม การใช้พืชที่ไม่มีเนื้อไม้ในการผลิตกระดาษนั้นได้เริ่มขึ้นเมื่อหลายร้อยปีก่อนที่จะเริ่มใช้เส้นใยจากพืชที่มีเนื้อไม้ในการผลิตกระดาษ โดยพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ที่นิยมนำมาใช้ผลิตกระดาษ เช่น ฟางของธัญพืช วัชพืชต่าง ๆ และเส้นใยของพืชโตเร็วฤดูเดียว เป็นต้น พืชที่ไม่มีเนื้อไม้ที่ใช้ในการผลิตกระดาษสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

- เศษเหลือจากการเกษตรและอุตสาหกรรมทางการเกษตร (agricultural and agro-industrial waste) ได้แก่ ฟางข้าว ฟางของธัญพืช กากอ้อย
- พืชล้มลุกที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ได้แก่ ต้นไผ่ หญ้าต่าง ๆ ต้นกก ต้นอ้อ
- พืชล้มลุกที่มีการเพาะปลูกรวมถึงเส้นใยที่ได้จากใบ ได้แก่ ปอสา ลินิน ป่าน ปอกระเจา ฝ้าย [8]

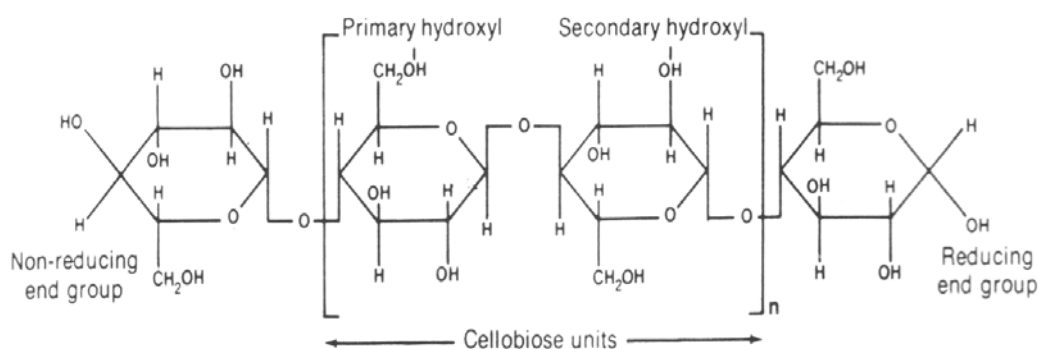
2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย

องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารแทรก ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้คือ

2.4.1 เซลลูโลส (cellulose)

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ซึ่งมีน้ำตาลหลายหน่วยประกอบกัน

สูตรเคมีทั่วไปของเซลลูโลส ($C_6H_{10}O_5$)_n เมื่อ n เป็นจำนวนหน่วยการทำซ้ำของน้ำตาลหรือระดับของพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) ดังภาพที่ 2-4 เซลลูโลสมี DP เฉลี่ยอย่างน้อย 9,000 -10,000 หน่วยและอาจสูงถึง 15,000 หน่วย สมบัติของวัสดุที่เป็นเซลลูโลสเกี่ยวข้องกับ DP ของส่วนประกอบโมเลกุลเซลลูโลส การลดความยาวสายโซ่เฉลี่ยหรือน้ำหนักโมเลกุลของเซลลูโลสต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้ จะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของเส้นใย ฉะนั้นหนึ่งในข้อควรระวังระหว่างการผลิตเยื่อกระดาษและการฟอกเยื่อกระดาษคือ การลดปฏิกิริยาฟีดลิง (peeling reaction) และปฏิกิริยาการแตกแยกสายโซ่ (chain cleavage reactions) ซึ่งจะส่งผลให้น้ำหนักของโมเลกุลของเซลลูโลสต่ำลง

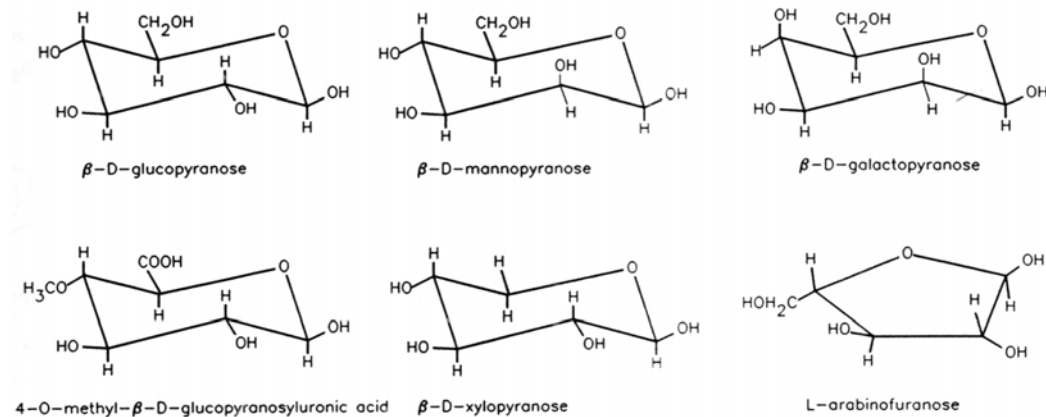


ภาพที่ 2-4 โครงสร้างของเซลลูโลส [9]

2.4.2 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

โดยทั่วไปแล้วเฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มี DP ต่ำกว่าเซลลูโลส (ค่าเฉลี่ย DP ประมาณ 100-200) และมีน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่คือ ดี-กลูโคส (D-glucose) ดี-แมนโนส (D-mannose) ดี-กาแลกโตส (D-galactose) ดี-ไซโลส (D-xylose) และแอล-อาราบินโนส (L-arabinose) [6] ดังแสดงในภาพที่ 2-5 เฮมิเซลลูโลสเป็นวัสดุค้าจุนในผนังเซลล์

เช่นเดียวกับเซลลูโลส ซึ่งในระหว่างการผลิตเยื่อกระดาษโดยใช้สารเคมีนั้น ตำแหน่ง ปริมาณ และโครงสร้างต่าง ๆ ของเฮมิเซลลูโลสมักจะเปลี่ยนไปอย่างมาก โดยทั่วไปแล้วเฮมิเซลลูโลสสามารถย่อยสลายและละลายได้ง่ายกว่าเซลลูโลส



ภาพที่ 2-5 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบในเฮมิเซลลูโลส [10]

โดยทั่วไปแล้วส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรตของเส้นใย คือ เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส มักถูกเรียกรวมกันว่าไฮโลเซลลูโลส (holocellulose) ซึ่งไฮโลเซลลูโลสประกอบด้วย 3 ส่วน ตามการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย ดังนี้

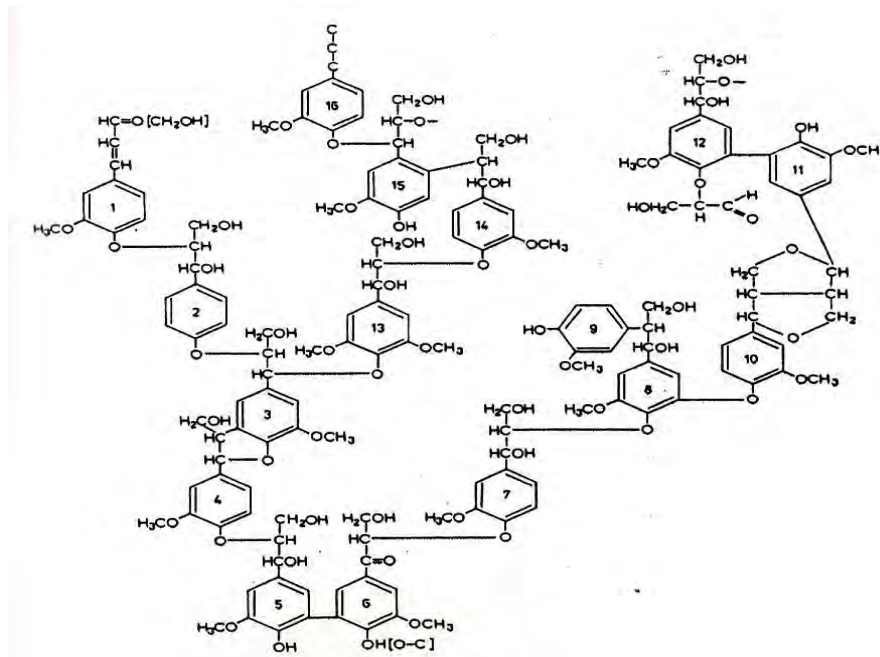
1) แอลฟาเซลลูโลส (α -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่มีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เนื่องจากเป็นส่วนที่เรียกเซลลูโลสที่แท้จริง ซึ่งไม่สามารถละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้องได้ ในการผลิตเยื่อไม่สามารถแยกแอลฟาเซลลูโลสออกมาได้อย่างบริสุทธิ์ และมักจะมีน้ำตาลแมนแนน (mannan) และกลูโคแมนแนน (glucomannan) ปนด้วยเสมอ เนื่องจากน้ำตาลทั้งสองชนิดนี้ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 เช่นกัน แอลฟาเซลลูโลสมีโมเลกุลของกลูโคสหรือ DP ตั้งแต่ 200 หน่วยขึ้นไป

2) บีตาเซลลูโลส (β -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ที่อุณหภูมิห้อง และจะตกตะกอนในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด บีตาเซลลูโลสจึงแยกได้จากส่วนที่ตกตะกอนในต่าง ค่า DP ของบีตาเซลลูโลสจะอยู่ระหว่าง 100-200 หน่วย

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

2.4.3 ลิกนิน

ลิกนินเป็นสารที่มีอยู่มากตรงบริเวณมิดเดิลแลมเมลลา โดยมีอยู่น้อยตรงชั้นผนังเซลล์ของเส้นใย ลิกนินมีการเรียงตัวแบบอสัณฐาน (amorphous) ที่มีความซับซ้อนสูง ดังแสดงภาพที่ 2-6 และส่วนใหญ่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่เป็นวงแหวนของหน่วยฟีนิลโพรเพนที่ถือเป็นสารที่ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่เนื้อไม้ สมบัติทางเคมีของลิกนินมีความซับซ้อนมาก โครงสร้างประกอบด้วยหน่วยหลักของฟีนิลโพรเพนเกิดพันธะเชื่อมขวางใน 3 มิติ ซึ่งทั้ง 3 ด้านที่มีพันธะเชื่อมขวางกันระหว่างโพรเพนกับวงแหวนเบนซีนจะแตกออกระหว่างการผลิตเยื่อกระดาษด้วยสารเคมีเพื่อให้ได้เส้นใยเดี่ยว ๆ ออกมา



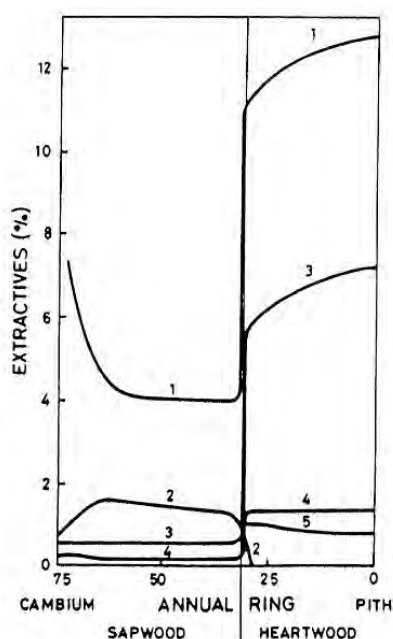
ภาพที่ 2-6 โครงสร้างลิกนิน [7]

สำหรับการผลิตเยื่อแบบเคมีนั้น ลิกนินคือสิ่งที่ไม่ต้องการและจะมีการกำจัดลิกนิน (delignification) ออกจากไม้ เพราะลิกนินเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่ไปขัดขวางการสร้าง

พันธะของเส้นใยในกระดาษ ส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงต่ำ และหากมีปริมาณสูงจะส่งผลให้กระดาษมีสีเหลือง [3]

2.4.4 สารแทรก (extractives)

สารแทรกเป็นสารเคมีในไม้หรือเส้นใยที่สามารถสกัดได้โดยใช้ตัวทำละลาย ในบางกรณีสารแทรกสามารถแยกตามตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด เช่น การละลายน้ำหรือละลายในเอทานอล สารแทรกเป็นกลุ่มของสารเคมีของผนังเซลล์ โดยสารแทรกส่วนใหญ่ประกอบด้วย ไขมัน กรดไขมัน ฟีนอล เรซิน ไช และสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ อีกหลายชนิด องค์ประกอบของสารแทรกจะแตกต่างกันตามแต่ชนิดของไม้ ส่วนปริมาณรวมของสารแทรกในแต่ละชนิดของไม้ขึ้นอยู่กับสภาพการเจริญเติบโต ดังแสดงในภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 ความแตกต่างระหว่างปริมาณกับตำแหน่งของสารแทรกที่พบในลำต้นสนของ ประเทศสก็อตแลนด์ : 1 คือ ปริมาณสารแทรกทั้งหมด 2 คือ ไตรกลีเซอไรด์ 3 คือ เรซิน 4 คือ กรดไขมัน และ 5 คือ สารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ [9]

สำหรับในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษ สารแทรกอาจส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษได้ เช่น ทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อหรือฟอกเยื่อมากขึ้น ชัดขวางสารเคมีไม่ให้แทรกซึมเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใย อาจทำให้เกิดตะกอนตามท่อหรือ

อุปกรณในระบบการผลิต และอาจทำให้เกิดยางเหนียว (stickies) ซึ่งทำให้กระดาษขาด รบกวนการเดินกระดาษและทำให้กระดาษเสียหายได้ [11]

2.5 เส้นใยนุ่มนุ่น

นุ่น *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. เป็นพืชเขตร้อนและพืชพื้นเมืองของประเทศเม็กซิโก ทวีปอเมริกากลาง ประเทศแถบทะเลแคริบเบียนและทางเหนือของอเมริกาใต้ แถบตะวันตกของแอฟริกา และพบทั่วไปในประเทศไทย [12] ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ของนุ่นแสดงไว้ในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ข้อมูลอนุกรมวิธานของนุ่น [13]

อาณาจักร	<u>Plantae</u>
ส่วน	<u>Magnoliophyta</u>
ชั้น	<u>Magnoliopsida</u>
อันดับ	<u>Malvales</u>
วงศ์	<u>Malvaceae (Bombacaceae)</u>
สกุล	<u>Ceiba</u>
สปีชีส์	<u>C. pentandra</u>

นุ่นมีการปลูกกระจายทั่วยุโรป ประเทศไทย นุ่นให้ผลผลิตเมื่ออายุประมาณ 2-4 ปี โดยจะออกดอกและบานไม่พร้อมกัน ดังนั้นผลนุ่นจึงสุกไม่พร้อมกัน นุ่นหนึ่งต้นจะให้ผลประมาณ 300-500 ผลต่อปี และประมาณ 120-150 ผล ถึงจะให้เส้นใยน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ภาพที่ 2-8 แสดงลักษณะของผลและเส้นใยนุ่น



ภาพที่ 2-8 เส้นใยนุ่ม [13]

เส้นใยนุ่มประกอบด้วยเซลลูโลสร้อยละ 64 ลิกนินร้อยละ 13 และเพนโทซาน (pentosan) ร้อยละ 23 นอกจากนี้ยังประกอบด้วยไขคิวติน (cutin) บนผิวหน้าเส้นใย [14] จึงทำให้เส้นใยนุ่มมีสมบัติต้านทานการซีมน้ำและทำให้นุ่มมีลักษณะพิเศษกว่าพืชเส้นใยอื่นๆ คือ ไม่ดูดซีมน้ำแต่ดูดซีมน้ำมัน เส้นใยนุ่มมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรวมผนังเซลล์ (fiber wall) ประมาณ 16.5 ± 2.4 ไมโครเมตร ขนาดช่องว่างตรงกลางของเส้นใย (lumen) 14.5 ± 2.4 ไมโครเมตร [15] และมีความยาวของเส้นใย (fiber length) 25-30 มิลลิเมตร ปุยนุ่มมีลักษณะอ่อนนุ่มและเบา โดยเส้นใยนุ่มมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1 ใน 4 เท่าของน้ำ และสามารถรับน้ำหนักได้ 30 เท่าตัวในน้ำทะเล [16]

2.6 การผลิตเยื่อ (pulping)

การผลิตเยื่อ คือกระบวนการที่ทำให้เส้นใยถูกแยกออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยว ๆ โดยอาจมีการทำให้ลิกนินอ่อนตัวลง หรืออาจมีการกำจัดลิกนินและคาร์โบไฮเดรตบางชนิดออกจากชิ้นไม้ในระหว่างการผลิตเยื่อ เพื่อนำเส้นใยที่ได้ไปใช้ในการผลิตเป็นกระดาษต่อไป โดยทั่วไปการผลิตเยื่อสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.6.1 การผลิตเยื่อเชิงกล (mechanical pulping)

การผลิตเยื่อแบบเชิงกลเป็นกระบวนการที่ใช้แรงกลและความร้อนทำให้ลิกนินอ่อนตัวลง เพื่อแยกเส้นใยออกมาเป็นเส้นใยเดี่ยว ๆ เส้นใยที่ผลิตได้จากการผลิตเยื่อเชิงกลจะมี

ขนาดสั้น และเนื่องจากการผลิตเยื่อแบบนี้ไม่มีการกำจัดเอาลิกนินออก สีกระดาษที่ผลิตได้จากเยื่อเชิงกลจึงมีโอกาสกลายเป็นสีเหลืองเมื่อทำปฏิกิริยากับแสง ความร้อน และความชื้น การผลิตเยื่อเชิงกลสามารถแบ่งย่อยได้อีกดังต่อไปนี้

1) การผลิตเยื่อแบบหินบด (stone groundwood pulping, SGW pulping) ซึ่งใช้ตัวหินบดในการแยกเส้นใยออกมาจากเนื้อไม้ โดยอาศัยแรงเสียดทานระหว่างท่อนไม้กับตัวหินบด เส้นใยที่ได้ด้วยวิธีนี้จะมีขนาดสั้นและไม่สมบูรณ์ [17]

2) การผลิตเยื่อแบบจานบด (refiner mechanical pulping, RMP) เป็นการใช้แรงเสียดทานรวมถึงความร้อนที่เกิดขึ้นตรงจานบด (refiner plate) ในเครื่องบดเยื่อ (refiner) แยกเส้นใยออกมาจากชิ้นไม้ หลังจากที่ยื่นไม้ถูกป้อนเข้าสู่เครื่องบดเยื่อ เส้นใยที่ได้จากการผลิตเยื่อแบบ RMP มีความสมบูรณ์และมีความยาวมากกว่าแบบ SGW [17]

3) การผลิตเยื่อแบบเชิงกลและความร้อน (thermomechanical pulping, TMP) เป็นการผลิตเยื่อที่พัฒนามาจาก RMP โดยในระหว่างการบดเยื่อมีการให้ความร้อนเข้าสู่เครื่องบดเยื่อด้วย เส้นใยที่ได้จากการผลิตเยื่อแบบนี้จะมีความยาวของเส้นใยและความสมบูรณ์ของเส้นใยมากกว่าแบบ RMP [17]

2.6.2 กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลกึ่งเคมี (chemimechanical pulping)

การผลิตเยื่อเชิงกลกึ่งเคมีเป็นการใช้วิธีการผลิตเยื่อเคมีร่วมกับการผลิตเยื่อเชิงกล ใช้สารเคมีเพื่อทำให้ชิ้นไม้มีการอ่อนตัวหรือละลายลิกนินบางส่วนออก จากนั้นจึงแยกเส้นใยโดยใช้แรงกล ผลผลิตเยื่อและสมบัติของเยื่อที่ได้อยู่ระหว่างเยื่อแบบเคมีกับแบบเชิงกล ผลผลิตเยื่อกึ่งเคมีมีค่าประมาณร้อยละ 55-90 ของน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง เส้นใยไม่มีความยืดหยุ่น (flexible) เท่าเยื่อเคมี แต่มีความยืดหยุ่นมากกว่าเยื่อเชิงกล ส่งผลให้เส้นใยมีการสร้างพันธะได้ดีกว่า จึงทำให้กระดาษที่ผลิตได้มีความแข็งแรงมากกว่าเยื่อเชิงกล การผลิตเยื่อเชิงกลกึ่งเคมีมีปริมาณลิกนินหลงเหลืออยู่ค่อนข้างมากและมักจะไม่นิยมนำมาฟอกเยื่อให้มีความขาวสว่างมากนัก เนื่องจากทำให้ขาวได้ยากและสิ้นเปลืองสารเคมี [5]

2.6.3 การผลิตเยื่อเคมี (chemical pulping)

การผลิตเยื่อเคมีเป็นการใช้สารเคมีไปทำปฏิกิริยากับลิกนิน เพื่อขจัดเอาลิกนินออกและเพื่อให้ได้เส้นใยเดี่ยว ๆ สำหรับนำไปผลิตเป็นกระดาษ เส้นใยที่ผลิตได้จากการผลิตเยื่อเคมีมีความยาวของเส้นใยมากกว่าและมีความสมบูรณ์ของเส้นใยมากกว่าการผลิตเยื่อแบบเชิงกล

นอกจากนี้เยื่อที่ได้ยังมีความขาวสว่างสูงกว่า เนื่องจากลิกนินส่วนใหญ่ได้ถูกกำจัดออกในระหว่างการต้มเยื่อแล้ว การผลิตเยื่อเคมีสามารถแบ่งย่อยได้อีกดังต่อไปนี้

1) กระบวนการโซดา (soda process) เป็นระบบการผลิตเยื่อแบบต่าง โดยใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารต้มเยื่อที่จะไปกำจัดลิกนินออกจากชิ้นไม้ ระบบนี้เกิดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1860 และยังคงใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ กระบวนการโซดาถือได้ว่าเป็นต้นกำเนิดของกระบวนการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ (Kraft process) [17]

2) กระบวนการซัลไฟต์ (sulfite process) เป็นระบบการผลิตเยื่อแบบกรด โดยใช้กรดซัลฟิวรัส (sulfurous acid, H_2SO_3) กับไบซัลไฟต์ไอออน (bisulfite ion, HSO_3^-) มาทำปฏิกิริยากับลิกนิน แล้วเปลี่ยนลิกนินให้อยู่ในรูปเกลือของกรดลิกโนซัลฟอนิก (lignosulfonic acid) ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ กระบวนการซัลไฟต์จะให้เยื่อที่มีค่าความขาวสว่างมากกว่าและง่ายต่อการนำเยื่อไปบดต่อมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการโซดา [5, 9]

3) กระบวนการคราฟต์ (kraft process) เป็นกระบวนการที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากกระบวนการโซดา เป็นระบบการผลิตเยื่อแบบต่าง โดยใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ (sodium sulfide, Na_2S) เป็นสารต้มเยื่อที่ทำปฏิกิริยากับลิกนินเพื่อให้ได้เส้นใยเดี่ยว ๆ ออกมา ข้อดีของการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ คือ ใช้เวลาในการต้มเยื่อน้อย เยื่อที่ได้มีความแข็งแรงมาก และการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ (chemical recovery) ทำได้ง่าย [5, 9]

2.7 การปรับสภาพของเส้นใย

การปรับสภาพของเส้นใยเป็นการเตรียมเส้นใยก่อนนำเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อต่อไป การปรับสภาพของเส้นใยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

1) การปรับสภาพเส้นใยด้วยกระบวนการทางเคมี (chemical pretreatment) เป็นการใช้สารเคมีมาช่วยย่อยชิ้นไม้หรือเส้นใย เพื่อช่วยในการเปิดผิวของเส้นใย ทำให้เส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว สามารถเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น คุณภาพของเยื่อที่ผลิตได้ยิ่งดีขึ้น [18] ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

2) การปรับสภาพเส้นใยด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (bio-pretreatment) เป็นการใช้อุณหภูมิหรือเอนไซม์มาย่อยชิ้นไม้หรือเส้นใยก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อตามปกติ [19] เอนไซม์ที่นิยมใช้ในการปรับสภาพของเส้นใยหรือชิ้นไม้นั้น ได้แก่ เซลลูเลส (cellulase) เฮมิเซลลูเลส (hemicellulase) ไซแลนเนส (xylanase) และไลเปส (lipase) เอนไซม์เหล่านี้อาจเข้าไปทำ

ปฏิกิริยากับเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ไปจัดการกับการเชื่อมพันธะระหว่างลิกนินกับคาร์โบไฮเดรต ในส่วนที่เรียกว่าสารประกอบเชิงซ้อนของลิกนินและคาร์โบไฮเดรต (lignin-carbohydrate complex) และอาจไปทำปฏิกิริยากับทำผิวหน้าที่เป็นไซของเส้นใย ส่งผลให้ผิวหน้าของเส้นใยถูกเปิดมากขึ้น เส้นใยจึงสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อได้ดีขึ้น [19]

2.8 เอนไซม์ไลเปส

เอนไซม์ไลเปส เป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ในโมเลกุลไขมัน เมื่อไขมันถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์แล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลีเซอรอลและกรดไขมัน จึงมีชื่อตามระบบว่า triacylglycerol ester hydrolase นอกจากนี้เอนไซม์ไลเปสยังเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ของไขมันแล้ว เอนไซม์ไลเปสยังเร่งปฏิกิริยาการสร้างพันธะเอสเทอร์ (transesterification) ซึ่งเป็นการย้อนกลับของปฏิกิริยานี้ด้วย และด้วยสมบัติดังกล่าวเอนไซม์ไลเปสจึงเป็นเอนไซม์สำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย ได้แก่ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมผลิตสารลดแรงตึงผิว อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง และอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ [20]

ไลโปเลส คือ เอนไซม์ไลเปสทางการค้าของบริษัท Novozyme จำกัด ที่ใช้ในอุตสาหกรรมผงซักฟอกเพื่อช่วยให้การขจัดคราบไขมันและน้ำมันออก เช่น คราบน้ำมันสไลด์ เนย ชุปเครื่องสำอาง ไลโปเลสทางการค้าประกอบด้วย ไลโปเลส 100 T ซึ่งอยู่ในรูปของแข็ง และไลโปเลส 100 L ซึ่งอยู่ในรูปของเหลว ไลโปเลสมีภาวะการใช้งานดังนี้คือ ปริมาณการใช้ร้อยละ 0.1-0.5 ของน้ำหนัก ช่วง pH อยู่ระหว่าง 7-10 และที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) [21]

2.9 ปฏิกิริยาขององค์ประกอบเคมีในเส้นใยในการผลิตเยื่อแบบต่าง

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตเยื่อเคมีแบบต่างมีดังนี้ คือ

2.9.1 ปฏิกิริยาทางเคมีของเยื่อ

ปรากฏการณ์ที่เยื่อกลับมามีสีคล้ำอีกครั้งหรือเรียกว่า alkaline darkening สามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงการกำจัดลิกนินออกในสภาวะที่มีด่างมากเกินไป สีของเยื่อที่ไม่ได้ฟอกนี้เกิดจากโครงสร้างบางชนิดในลิกนินที่ไม่อ้อมตัวหรือโครโมฟอร์ (chromophores) นอกจากนี้ยังอาจเกิดขึ้นมาจากลูโคโครโมฟอร์ (leucochromophores) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศและสามารถแปลงสภาพเป็นโครโมฟอร์ได้ [6]

2.9.2 ปฏิกริยาของลิกนิน

ปฏิกริยาของลิกนินในระหว่างการต้มเยื่อนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณการกระจายตัวของลิกนินในชั้นผนังเซลล์และชั้นมิดเดิลลาเมลลา ในชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิมีความหนาของชั้นมากจึงทำให้มีปริมาณลิกนินอยู่ปริมาณร้อยละ 70-80 ของลิกนินในเนื้อไม้ทั้งหมด ในขณะที่ตรงบริเวณมิดเดิลลาเมลลาซึ่งเป็นบริเวณระหว่างเส้นใยนั้นส่วนใหญ่ประกอบด้วยลิกนินร้อยละ 70-80 หรือคิดเป็นร้อยละ 20 ของลิกนินที่มีอยู่ทั้งหมดในเนื้อไม้ [5]

การกำจัดลิกนินออกจากเนื้อไม้ในการผลิตเยื่อแบบคราฟต์แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วง initial delignification ช่วง bulk delignification และช่วง residual delignification ดังรายละเอียดต่อไปนี้ คือ

1) ช่วง initial delignification ช่วงนี้จะมีการละลายลิกนินออกได้ประมาณร้อยละ 20-25 ของลิกนินทั้งหมด โดยในช่วงนี้ลิกนินยังไม่มีเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

2) ช่วง bulk delignification เป็นช่วงที่มีอัตราการละลายลิกนินออกเพิ่มขึ้น โดยละลายลิกนินออกได้ประมาณร้อยละ 70-80 ของลิกนินทั้งหมด ซึ่งการละลายจะเริ่มละลายลิกนินในชั้นผนังเซลล์ทุติยภูมิไปยังลิกนินในชั้นมิดเดิลลาเมลลา

3) ช่วง residual delignification เป็นช่วงท้ายซึ่งมีการละลายลิกนินออกจากชั้นไม้ไปแล้วร้อยละ 90 ของลิกนินทั้งหมด ทำให้ช่วงนี้มีอัตราการละลายลิกนินออกจากชั้นไม้ช้าลง

2.9.3 ปฏิกริยาของคาร์โบไฮเดรต

การต้มเยื่อแบบต่างจะทำให้เกิดการทำลายคาร์โบไฮเดรตด้วย เฮมิเซลลูโลสจะถูกทำลายได้ง่ายและส่วนมากจะถูกทำลายในช่วง initial delignification ส่วนเซลลูโลสจะถูกทำลายในช่วง residual delignification ส่งผลให้ DP ของสายโซ่เซลลูโลสลดลงและทำให้เส้นใยมีความอ่อนแอลง [5]

ปฏิกริยาฟีลลิง (peeling reaction) เป็นปฏิกริยาที่เอาหน่วยสุดท้ายของน้ำตาลแอนไฮโดร (anhydro-sugar) ออก กล่าวคือ ภายใต้สภาวะการผลิตเยื่อกระดาษที่มีความเป็นด่างสูง โมเลกุลส่วนปลายของสายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจะถูกทำลายลงทำให้กลายเป็นน้ำตาล

โมเลกุลเดี่ยว ส่งผลให้สายโซ่ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสั้นลง [17] ซึ่งมีผลต่อการการสูญเสียปริมาณผลผลิตที่ได้และทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง

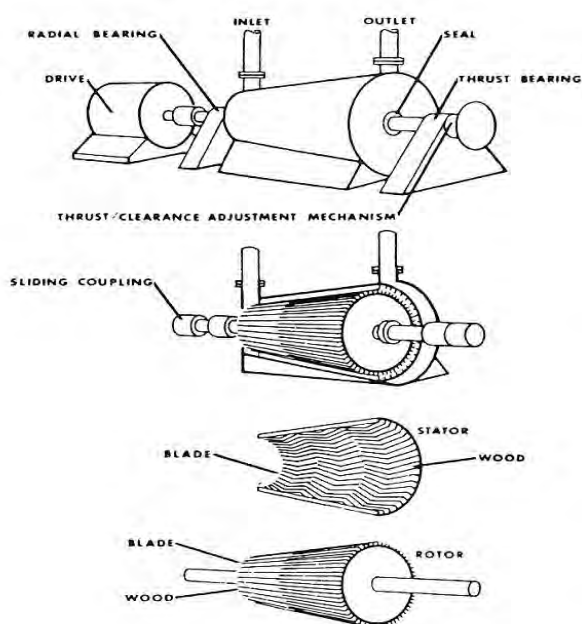
2.10 การบดเยื่อ/การตีเยื่อ (refining/beating)

การบดเยื่อหรือการตีเยื่อเป็นการใช้การกระทำเชิงกลที่เกิดอย่างต่อเนื่องในเครื่องบดเยื่อ (refiner) ทั้งที่เป็นแบบกรวย (conical) หรือแบบจานบด (disc-type) โดยเส้นใยจะมีการเคลื่อนที่ในแนวขนานไปกับตัวของซี่บด [9, 17] และในเครื่องตีเยื่อ (valley beater) โดยเส้นใยจะมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับตัวของซี่บด

2.10.1 เครื่องบดเยื่อ (refiner)

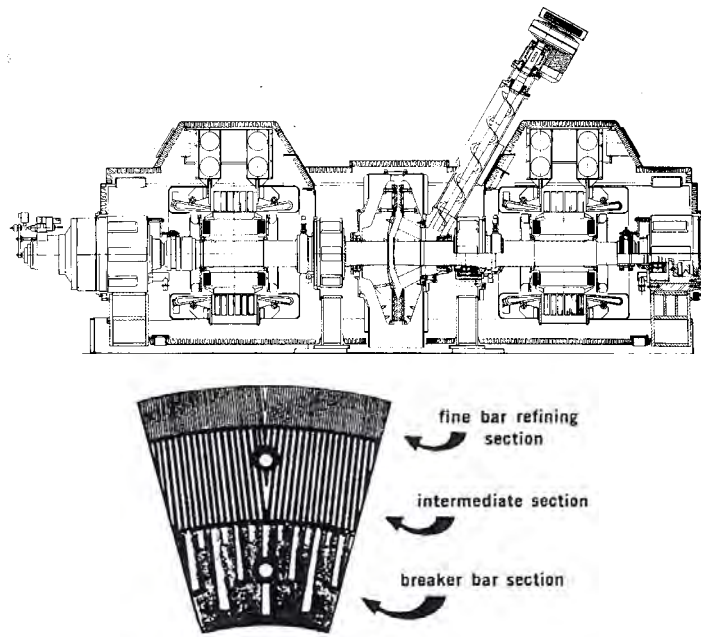
เครื่องบดเยื่อ มี 2 ชนิด คือ เครื่องบดเยื่อแบบกรวย และเครื่องบดเยื่อแบบจานบด ดังรายละเอียดต่อไปนี้ คือ

1) เครื่องบดเยื่อแบบกรวย (conical refiner) ลักษณะของเครื่องประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ โรเตอร์ (rotor) ซึ่งเป็นส่วนแกนที่หมุนในขณะที่ทำการบดเยื่อ และ สเตเตอร์ (stator) ซึ่งเป็นส่วนเปลือกหุ้มที่อยู่กับที่ โดยทั้ง 2 ส่วนจะบรรจุไปด้วยซี่ฟันบดที่ทำจากโลหะจำนวนมาก ดังแสดงในภาพที่ 2-9



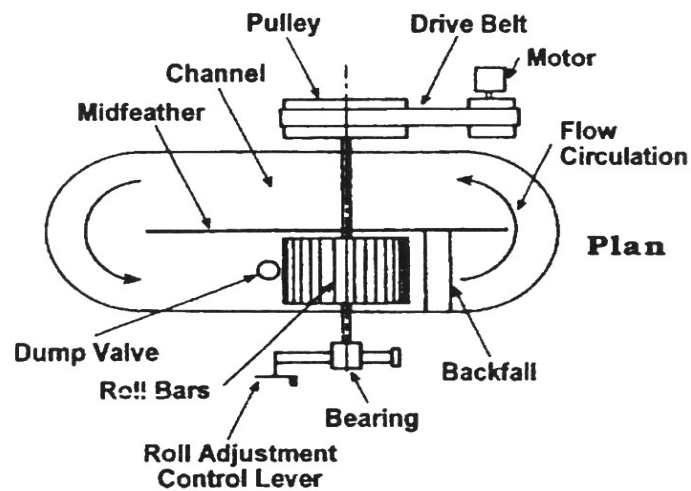
ภาพที่ 2-9 ลักษณะของเครื่องบดแบบกรวย [9]

2) เครื่องบดเยื่อแบบจานบด (disc refiner) มีการนำมาใช้ภายหลังเครื่องบดเยื่อแบบกรวย ลักษณะของเครื่องโดยทั่วไปเป็นแผ่นจานบดสองจานประกบกัน ซึ่งบดจะมีขนาดใหญ่ (บริเวณใกล้จุดศูนย์กลางของจานบด) ไปถึงขนาดเล็ก (บริเวณไกลจุดศูนย์กลางของจานบด) ดังแสดงในภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 เครื่องบดเยื่อแบบจานบด (บน) และลักษณะที่จานบดในเครื่องบดเยื่อ (ล่าง) [9]

2.10.2 เครื่องตีเยื่อ (beater)



ภาพที่ 2-11 เครื่องตีเยื่อ [9]

ลักษณะเครื่องตีเยื่อประกอบไปด้วย 2 ส่วน คล้ายกับเครื่องบดเยื่อแบบกรวย คือ โรเตอร์ (rotor) ซึ่งเป็นส่วนแกนที่หมุนในขณะที่ทำการบดเยื่อ และสเตเตอร์ (stator) ซึ่งเป็นส่วนแผ่นที่รองรับตัวโรเตอร์ โดยทั้ง 2 ส่วนจะบรรจุไปด้วยซี่ฟันบดที่ทำจากโลหะจำนวนมาก ดังแสดงในภาพที่ 2-11

2.10.3 กลไกการบดเยื่อ/ตีเยื่อ (refining/beating mechanism)

สิ่งที่เกิดขึ้นในระหว่างบดเยื่อมี 2 ลักษณะ ดังนี้คือ

1) การเสียดสีกันของเส้นใย (fiber brushing) ซึ่งเกิดจากการที่เส้นใยเกิดการเสียดสีหรือชนกัน จะเกิดขึ้นเมื่อบดเยื่อ/ตีเยื่อที่ความเข้มข้นสูง ๆ โดยมีระยะห่างระหว่างซี่บดค่อนข้างมากพอสมควร เมื่อความเข้มข้นเยื่อสูง ๆ ปริมาณเส้นใยจะมาก ทำให้เส้นใยเกิดปฏิกิริยสัมพันธ์ (interaction) กันมากขึ้น จนเส้นใยเกิดการแตกแขนงขึ้น (fibrillation) เป็นผลให้พื้นที่ผิวของเส้นใยเพิ่มมากขึ้น พันธะระหว่างเส้นใย (fiber-fiber bonding) จึงมากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม ในกรณีนี้ความยาวของเส้นใยจะไม่มีเปลี่ยนแปลงไปมากนัก ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะต้องการให้การสร้างพันธะของเส้นใยสูงขึ้น แต่เส้นใยไม่ขาดออกจนสั้นลง

2) การตัดเส้นใย (fiber cutting) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อบดเยื่อที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ และระยะห่างระหว่างซี่บดชิดกันมาก ๆ ทำให้เส้นใยถูกหนัให้สั้นลงได้ง่าย เส้นใยจึงมีความยาวลดลง ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะการที่เส้นใยสั้นจะทำให้พื้นที่ในการสร้างพันธะของเส้นใยแต่ละเส้นน้อยลง

2.10.4 อิทธิพลของความเข้มข้นของเยื่อต่อการบดเยื่อ

ความเข้มข้นของเยื่อในระหว่างการบดเยื่อมีผลต่อสมบัติของเยื่อ ดังนี้คือ

1) เยื่อที่มีความเข้มข้นสูง (high consistency) ในระหว่างการบดเยื่อจะเกิดการเสียดสีของเส้นใย คือ เส้นใยจะไม่ขาดออก ไม่สั้นลง เนื่องจากเส้นใยมีอยู่ในปริมาณมากจึงช่วยในการรับแรงได้สูง ทำให้เมื่อเส้นใยเกิดการเสียดสี เส้นใยจึงไม่ขาดออกจากกัน

2) เยื่อที่มีความเข้มข้นต่ำ (low consistency) ในระหว่างการบดเยื่อจะเกิดการตัดขาด คือ เส้นใยเกิดการขาดออกได้ เพราะปริมาณเส้นใยมีน้อยจึงมีตัวช่วยในการรับแรงไม่มากพอ ส่งผลให้เส้นใยถูกตัดขาดให้สั้นลงได้

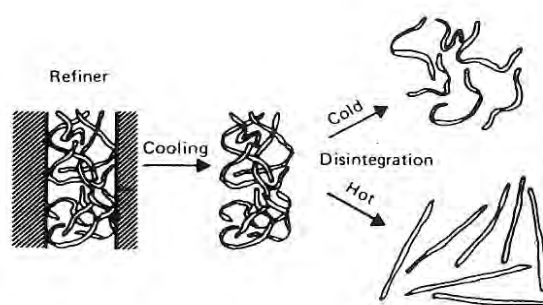
2.10.5 ผลของการบดเยื่อที่มีต่อสมบัติของกระดาษ

เยื่อที่ผ่านการบด ส่งผลให้เส้นใยมีความแข็งแรงน้อยลง ฉะนั้นสมบัติกระดาษที่ขึ้นกับความแข็งแรงของเส้นใย เช่น ความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tearing strength) จะลดลง เนื่องจากการตีเยื่อ/บดเยื่อจะทำให้เส้นใยเกิดการแตกแขนงมากขึ้น ผนังของเส้นใยฉีกขาด ความแข็งแรงของเส้นใยเดี่ยว ๆ (individual fiber) จึงน้อยลง อย่างไรก็ตาม การบดเยื่อส่งผลให้พันธะระหว่างเส้นใยดีขึ้น สมบัติของกระดาษที่ขึ้นกับพันธะของเส้นใย เช่น ความแข็งแรงตึง (tensile strength) และความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength) จะดีขึ้น เนื่องจากการตี/บดเยื่อจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น เส้นใยแต่ละเส้นจะสร้างพันธะกันได้มากขึ้น ความแข็งแรงของกระดาษจะดีขึ้นด้วย นั่นคือ การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยกับเส้นใย (fiber-fiber bonding) เป็นตัวที่บ่งบอกระดับความแข็งแรงตึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษ

2.10.6 ผลของการบดเยื่อที่มีต่อสมบัติด้านโครงสร้าง

การบดเยื่อ/ตีเยื่อจะช่วยให้กระดาษมีความยืดหยุ่น (flexibility) และแน่นขึ้น รวมทั้งความแข็งแรงก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่การที่กระดาษมีเนื้อที่แน่นขึ้นจะส่งผลให้สมบัติด้านความทึบแสง (opacity) ความฟ้าม (bulk) และความพรุน (porosity) ของกระดาษลดต่ำลงด้วยเช่นกัน เนื่องจากกระดาษที่แน่นจะมีความพรุนต่ำ ช่องว่างระหว่างอากาศกับเส้นใยลดลง ความสามารถในการกระเจิงแสงลดลง ความทึบแสงจึงน้อยลง

2.10.7 ความหึงงอของเส้นใยหลังการบดเยื่อแบบจานบด



ภาพที่ 2-12 ผลของความชื้นและความเย็นที่มีต่อการขจัดความหึงงอของเส้นใย [9]

การบดเยื่อจะทำให้เส้นใยเกิดการหึงงอเพราะแรงเฉือนที่จานบดกระทำต่อเส้นใยและความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดสีที่เกิดขึ้นภายในจานบดเยื่อ เมื่อเส้นใยเย็นตัวลงเส้นใยจะคง

รูปตามความหึงงอที่เกิดขึ้น หากต้องการทำให้เส้นใยคลายตัวต้องนำเส้นใยไปขจัดความหึงงอ โดยทำการกระจายตัวในน้ำร้อนเพื่อให้เส้นใยเหยียดตัว หรือที่เรียกว่า latency removal [9] ดังแสดงในภาพที่ 2-12

2.11 คุณภาพและมิติของเส้นใย

ปัจจุบันวิธีการวิเคราะห์ลักษณะคุณภาพและมิติของเส้นใยมีหลายวิธี เช่น วัดด้วยเครื่องวิเคราะห์คุณภาพของเส้นใย (fiber quality analyzer : FQA) ตามมาตรฐาน ISO 16065 จากการวัดนี้จะให้ค่าการกระจายตัวด้านความยาวของเส้นใย (fiber length) ความกว้างของเส้นใย (fiber width) ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (fines) ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (curl index) และดัชนีความหึงงอของเส้นใย (kink index)

2.12 สมบัติเชิงและกระดาษ

เป็นสมบัติทั่วไปของกระดาษ สมบัติด้านทัศนศาสตร์ และสมบัติด้านความแข็งแรง

2.12.1 น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight หรือ grammage)

เมื่อต้องการตรวจสอบน้ำหนักมาตรฐานหรือแกรมเมจ (grammage) ของกลุ่มตัวอย่างหนึ่ง สามารถทำได้โดยวัดน้ำหนักเป็นกรัมและวัดพื้นที่ในหน่วยตารางเมตรของกระดาษ จากนั้นนำมาคำนวณโดยใช้น้ำหนักหน่วยเป็นกรัมหารด้วยพื้นที่หน่วยเป็นตารางเมตร จะได้น้ำหนักมาตรฐานหรือแกรมเมจ มีหน่วยเป็น กรัมต่อตารางเมตร (g/m^2) [22]

2.12.2 ความหนา (thickness)

เครื่องวัดแบบไมโครเมตรหลาย ๆ ประเภทสามารถนำมาใช้ในการวัดความหนาของกระดาษ [22] ซึ่งความหนาของกระดาษ คือ ระยะห่างในแนวตั้งฉากระหว่างผิวหน้าทั้ง 2 ด้านของแผ่นทดสอบภายใต้ภาวะที่กำหนด หน่วยที่วัดได้เป็นมิลลิเมตร ในระบบมาตรฐานสากล (standard international : SI) จะใช้หน่วยความหนาเป็นไมโครเมตร

2.12.3 ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density)

เป็นค่าที่คำนวณได้จากการนำน้ำหนักมาตรฐานหารด้วยความหนาที่วัดได้ของแผ่นขึ้นทดสอบ ความหนาแน่นปรากฏเป็นหนึ่งในสมบัติที่สำคัญของกระดาษ เพราะมีผลต่อ

สมบัติเชิงกลเกือบทั้งหมด รวมถึงสมบัติทางกายภาพ ทางไฟฟ้า และสมบัติอื่น ๆ เช่น สมบัติด้านการดูดซึม และความสามารถในการพิมพ์ของกระดาษ [22]

2.12.4 ความขาวสว่าง (brightness)

ความขาวสว่างเป็นการวัดค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงของการสะท้อนแสงสีน้ำเงินของแผ่นกระดาษ โดยทั่วไปแล้วค่าความขาวสว่างจะถูกใช้เป็นแนวทางในการทดสอบเพื่อวัดประสิทธิภาพของการฟอกเยื่อเพื่อขจัดความเหลืองจากเยื่อ ซึ่งแสดงเป็นอัตราร้อยละของความขาวสว่างของสีขาวมาตรฐาน [22]

2.12.5 ความทึบแสง (opacity)

เป็นการวัดความสามารถในการให้แสงทะลุผ่านของแผ่นกระดาษ ถ้าแสงทั้งหมดทะลุผ่านกระดาษโดยไม่สะท้อนหรือถูกดูดกลืน ค่าความทึบแสงจะเป็นศูนย์ แต่ถ้าไม่มีแสงทะลุผ่านกระดาษเลย และแสงทั้งหมดสะท้อนหรือถูกดูดกลืน ค่าความทึบแสงจะเป็นร้อยเปอร์เซ็นต์ ซึ่งแผ่นกระดาษที่มีความทึบแสงมากจะมีการทะลุผ่านของแสงน้อย ความทึบแสงสามารถวัดได้จากปริมาณของแสงที่ทะลุผ่าน โดยมีหน่วยวัดเป็นอัตราส่วนของความเปรียบต่าง (contrast ratio) ซึ่งสามารถวัดโดยเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงสีเขียวในช่วงคลื่น 557 นาโนเมตร ระหว่างกระดาษหนึ่งแผ่นที่รองหลังด้วยพื้นสีดำสนิทกับกระดาษที่วางซ้อนกันหนาจนแสงไม่ทะลุผ่าน [22]

2.12.6 ความแข็งแรงตึง (tensile strength)

ความแข็งแรงตึงเป็นสมบัติที่มีประโยชน์มากในการอธิบายความแข็งแรงทั่วไปของวัสดุใด ๆ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดโดยตรงของความทนทานและประสิทธิภาพการทำงานที่เกิดขึ้นเมื่อสิ้นสุดการใช้งานของชิ้นทดสอบที่ได้รับแรงดึงโดยตรงในการทดสอบ เช่น กระดาษสำหรับห่อของ ถูกกระดาษและกระดาษพิมพ์เขียน โดยทั่วไปแล้ว ความแข็งแรงตึงค่อนข้างมีความสำคัญมากต่อกระดาษสำหรับการพิมพ์และเขียน

ความแข็งแรงตึง คือ แรงต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของแถบกระดาษที่สามารถต้านทานแรงดึงก่อนที่จะกระดาษจะถูกทำลายลง เมื่อให้แรงกระทำในทิศทางขนานกับความยาวของแถบกระดาษ ในเครื่องทดสอบความแข็งแรงตึงชิ้นทดสอบจะยึดออกจนขาดออกจากกัน แรงดึงสูงสุดที่ชิ้นทดสอบสามารถทนได้ก่อนที่จะขาดและการยืดตัวของแถบชิ้นทดสอบที่สอดคล้องกันกับแรงดึงของแถบชิ้นทดสอบจะถูกวัดและบันทึกไว้ หน่วยที่ใช้คือ กิโลนิว

ตันต่อเมตร (kN/m) ความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใย แต่จะขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างเส้นใยเป็นหลัก นอกจากนี้ผลการทดสอบที่ได้ยังขึ้นอยู่กับภาวะในการทดสอบด้วย โดยเมื่อเพิ่มแรงที่ใช้ในการกระทำ ค่าแรงดึงจะเพิ่มขึ้น และหากความชื้นของกระดาษเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงจะลดลง ขณะที่การยืดตัวของกระดาษจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความแข็งแรงต่อแรงดึงยังขึ้นอยู่กับทิศทางของกระดาษด้วย ดังนั้นความต้านทานแรงดึงที่วัดได้ในทิศทางที่แตกต่างกันของแผ่นกระดาษที่เป็นขึ้นทดสอบจึงใช้เป็นตัวบ่งชี้แนวการเรียงตัวของเส้นใยด้วย [23]

2.12.7 ความต้านทานแรงฉีก (tear resistance)

ความต้านทานแรงฉีกหรือความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear strength) ใช้เป็นตัวทดสอบควบคุมในโรงงานกระดาษ ความต้านทานแรงฉีกเป็นความสามารถของแผ่นขึ้นทดสอบที่จะต้านแรงที่ใช้ในการฉีกแผ่นขึ้นทดสอบเป็นแนวขาดต่อเนื่องจากแนวตัดเริ่มต้น ความต้านทานแรงฉีกขึ้นอยู่กับความเร็วตัวของเส้นใยในแผ่นขึ้นทดสอบด้วย สำหรับเครื่องมือที่ใช้ทดสอบส่วนมากจะใช้เครื่อง Elmendorf tear tester ซึ่งใช้ลูกตุ้มเป็นแหล่งกำเนิดแรงฉีกขาด โดยลูกตุ้มจะเคลื่อนตัวจากตำแหน่งในระนาบตั้งฉากไประนาบเริ่มต้นของขึ้นทดสอบ ซึ่งแรงที่ทำการฉีกขึ้นทดสอบต่อจากแนวตัดเบื้องต้นจะวัดผลจากการสูญเสียพลังงานของลูกตุ้ม โดยหน่วยที่วัดได้มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) หรือ มิลลินิวตัน (mN) [23]

ความต้านทานแรงฉีกของกระดาษขึ้นอยู่กับ ความยาวของเส้นใย ความแข็งแรงของเส้นใย พันธะระหว่างเส้นใย และการจัดเรียงตัวของเส้นใยในกระดาษ โดยเส้นใยที่ยาวและแข็งแรงจะให้ค่าความต้านทานแรงฉีกสูง

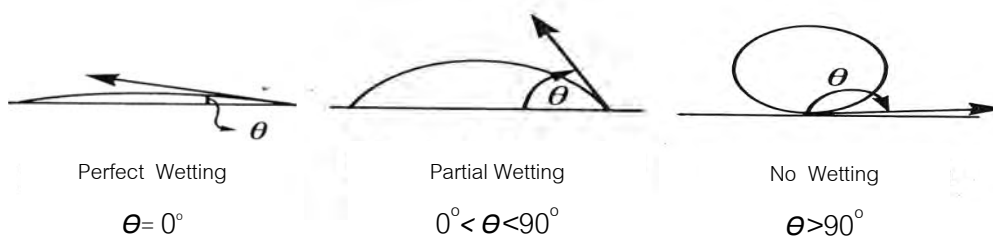
2.12.8 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength)

ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ เป็นการทดสอบแรงดันสูงสุดที่กระดาษสามารถต้านทานได้โดยยังไม่ทำให้ขึ้นทดสอบขาดหรือแตกจากความดันที่ใช้ตั้งฉากกับระนาบของขึ้นทดสอบ ในการทดสอบนั้นขึ้นทดสอบจะวางอยู่เหนือโดอะแฟรมยางยืดทรงกลม และมีตัวจับยึดที่รอบนอก เมื่อให้แรงดัน โดอะแฟรมยางจะพองตัวขึ้นมาเพื่อดันกระดาษให้เกิดการทะลุ ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ คือ ค่าแรงดันสูงสุดก่อนที่กระดาษจะขาด โดยหน่วยที่ใช้คือ กิโลพาสคัล (kilopascal, kPa) [23] สำหรับกระดาษโดยทั่วไปแล้วความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุจะมีความ

เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงต่อแรงดึงและจะให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน ส่วนตัวแปรที่มีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงก็จะมีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุด้วย โดยให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน

2.13 การวิเคราะห์มุมสัมผัส (contact angle analysis)

ในมาตรฐานการวิเคราะห์มุมสัมผัสนั้น สามารถวัดมุมสัมผัสได้ด้วยของเหลวหลายชนิด เช่น น้ำ หมึกพิมพ์ โดยในการทดสอบกับกระดาษส่วนมากจะวัดมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษ (water contact angle, θ) ซึ่งเป็นการวัดความชอบน้ำหรือความไม่ชอบน้ำของกระดาษ โดยมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการเปียกผิวของกระดาษ [21] ถ้ามุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ 0 องศา แสดงว่ากระดาษมีการเปียกที่สมบูรณ์ ถ้ามุมสัมผัสมีค่ามากกว่า 90 องศา แสดงว่ากระดาษไม่เปียกผิว หากถ้ามุมสัมผัสมากกว่า 0 องศา แต่น้อยกว่า 90 องศา แสดงว่าน้ำมีการเปียกผิวกระดาษบ้าง ดังแสดงในภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 มุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเปียกผิว [9]

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Apirakchaiskul และคณะ [3] ได้ใช้กระบวนการโซดาในการผลิตเยื่อกระดาษจากเส้นใยนุ่น ในการต้มเยื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 25 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น เพื่อหาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสม และยังคงศึกษาถึงอิทธิพลของเยื่อนุ่นต่อสมบัติกระดาษที่ผลิตได้จากการนำเยื่อนุ่นมาผสมกับเยื่อใยสั้นและเยื่อใยยาวทางพาณิชย์ จากการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ค่าสภาพระบายไคของเยื่อและความแข็งแรงต่อน้ำดึงของกระดาษลดลง แต่ความหนาแน่น ความเรียบ ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษสูงขึ้น ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมคือร้อยละ 20 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น และผลการทดลองจากการนำเยื่อนุ่นมาผสมกับเยื่อทางพาณิชย์ พบว่า กระดาษมีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของเยื่อนุ่นมากขึ้น อย่างไรก็ตาม

ก็ตาม งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า การเตรียมนุ่นก่อนเข้าสู่กระบวนการต้มเยื่อแบบโซดานั้นใช้เวลานานมาก เนื่องจากต้องแช่นุ่นในน้ำเป็นเวลานานถึง 3 สัปดาห์ ก่อนต้มเยื่อ เพราะนุ่นมีสมบัติไม่ชอบน้ำ ฉะนั้นหากสามารถลดเวลาในการเตรียมนุ่นก่อนเข้าสู่การต้มเยื่อได้ จะเป็นการเพิ่มความน่าสนใจในการนำนุ่นมาเป็นแหล่งเส้นใยใหม่สำหรับอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษของประเทศได้

Avinash และคณะ [18] ได้ศึกษาการปรับสภาพโครงสร้างของเส้นใยในผ้าไลโอเซล (lyocell fabrics) โดยใช้ด่างสองชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 120 กรัม/ลิตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 250 กรัม/ลิตร นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ไม่ได้ใช้ด่าง จากการทดลองพบว่า การปรับสภาพด้วยด่างทำให้เส้นใยถูกละลายบางส่วน อย่างไรก็ตาม ปริมาณคาร์บอกซิล (carboxyl content) และความเป็นผลึก (crystallinity) เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก การปรับสภาพด้วยด่างทำให้โครงสร้างความเป็นรูพรุนของเส้นใยเปลี่ยนไป บริเวณผิวรอบนอกของเส้นใยเกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่าตรงกลางของเส้นใย

Zhang และคณะ [24] ได้ทดลองปรับสภาพโครงสร้างของเส้นใยในผ้าไลโอเซลโดยใช้ด่างหลายชนิด เช่น ไตรเมทิลแอมโมเนียม (trimethylammonium, TMAH) ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (lithium hydroxide, LiOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จากการทดลองพบว่า ภาวะที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ช่วยในการเปิดผิวของเส้นใย ทำให้เกิดเส้นใยแขนงย่อย (fibrillation) ได้น้อย เนื่องจากการเรียงตัวของเส้นใยแขนงย่อยมีความเป็นระเบียบมากกว่าไตรเมทิลแอมโมเนียมและลิเทียมไฮดรอกไซด์

Scott และคณะ [25] ได้ทดลองใช้เชื้อรา *Ceriporiopsis subvermispora* ในการผลิตเยื่อด้วยกระบวนการทางชีวภาพของขึ้นไม้จากต้นสน โดยให้เชื้อราทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องกับขึ้นไม้ 2 สัปดาห์ ก่อนที่จะนำขึ้นไม้ไปบดด้วยเครื่องบดเยื่อแบบจานบด จากการทดลองพบว่า การปรับสภาพขึ้นไม้ด้วยวิธีทางชีวภาพก่อนนำขึ้นไม้ไปผลิตให้เป็นเยื่อ ช่วยลดพลังงานในการบดด้วยเครื่องบดเยื่อถึงร้อยละ 24-38 เยื่อที่ผลิตได้จากขึ้นไม้ที่ผ่านการปรับสภาพมีความแข็งแรงมากกว่าเยื่อที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพ เนื่องจากให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index) และดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index) ที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การปรับสภาพขึ้นไม้ด้วยวิธีทางชีวภาพให้เยื่อที่มีค่าความขาวสว่างต่ำกว่าเยื่อที่ผลิตมาจากขึ้นไม้ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

Agrawal และคณะ [26] ได้ศึกษาการกำจัดไข (wax) ออกจากผิวหน้าของเส้นใยฝ้าย โดยใช้แรงกลและเอนไซม์ในการทำปฏิกิริยา เอนไซม์ที่ใช้ในการทดลองคือ เอนไซม์คิวตินเนส (cutinase) และเอนไซม์เพกทินเนส (pectinase) จากการทดลองพบว่า คุณหมุมิที่ใช้ในการกำจัดไข ออกจากผิวหน้าของเส้นใยฝ้ายลดลงจาก 100 องศาเซลเซียส เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เหลือเพียง 50 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์เพกทินเนส และเมื่อใช้เอนไซม์เพกทินเนสร่วมกับ เอนไซม์คิวตินเนสสามารถทำให้คุณหมุมิลดลงได้ถึง 30 องศาเซลเซียส ภายในเวลาเพียง 15 นาที

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1.1 อนุ จากโรงปั่นนุ่นธนบุรี

3.1.1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดห้องปฏิบัติการ ความบริสุทธิ์ 99% Merck KGaA, Germany

3.1.1.3 เอนไซม์ไลโปเรส 100L (Liporase 100L) แยกที่วิธี 100 KLU/g pH 7-10 อุณหภูมิห้อง (30°C); liquid, analytical grade, Novozyme, Denmark

3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

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

3.1.2.2 เครื่องบดเยื่อแบบจานบด (disc refiner): Sprout-Waldron Bulletin 1480, Koppers Company, USA

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

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

3.1.2.5 เครื่องวัดความหนาของกระดาษ (thickness tester); Frank, Germany

3.1.2.6 เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst tester); SE002P, Lorentzen & Wettre, Sweden

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

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

3.1.2.9 เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle tester): Pocket goniometer PG-3, Fibro System Corporation, Sweden

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

- 3.1.2.11 เครื่องวัดความชื้น (moisture determination balance); FD-600, Kett Electric Laboratory, USA
- 3.1.2.12 เครื่องวิเคราะห์เส้นใย (fiber quality analyzer, FQA); บริษัท OpTest Equipment Inc., Canada
- 3.1.2.13 ตู้อบ (oven); Venticell, Germany
- 3.1.2.14 เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter); Denver Instrument, Germany
- 3.1.2.15 เครื่องวัดสมบัติเชิงแสง (Optical property tester); Color Touch PC, Technidyne Corporation, USA
- 3.1.2.16 บีกเกอร์ ขนาด 25, 50, 250, 500 มิลลิลิตร
- 3.1.2.17 กระบอกตวง ขนาด 25, 100 และ 1000 มิลลิลิตร
- 3.1.2.18 ไปเปต ขนาด 5 และ 50 มิลลิลิตร
- 3.1.2.19 บิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 3.1.2.20 เทอร์โมมิเตอร์
- 3.1.2.21 เต้าแม่เหล็กไฟฟ้า เอ็มดี; M-909, MDA Trade, Vietnam
- 3.1.2.22 หม้อ stainless steel; F-M 208-18, China

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะเวลาในการแช่เส้นใยนุ่นเพื่อผลิตเยื่อแบบโซดา โดยปรับสภาพเส้นใยนุ่นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และเอนไซม์ไลเปสก่อนการผลิตเยื่อแบบโซดา ศึกษาอิทธิพลของโซเดียมไฮดรอกไซด์และเอนไซม์ไลเปสที่มีต่อการผลิตเยื่อแบบโซดาของนุ่น ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดมีดังนี้

3.2.1 การทดลองตอนที่ 1: การผลิตเยื่อแบบโซดาจากเส้นใยนุ่นในภาวะต่างๆ เพื่อใช้เป็นการทดลองควบคุม

3.2.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำเส้นใยนุ่นไปแช่ในน้ำประปาให้พอท่วมเส้นใยเป็นเวลา 3 สัปดาห์ เมื่อครบกำหนดเวลาแล้ว บีบน้ำออกจากเส้นใยนุ่นให้หมาดและตัดเส้นใยให้มีขนาด 2-3 เซนติเมตร วัดความชื้นของเยื่อด้วยเครื่องวัดความชื้น

3.2.1.2 การผลิตเยื่อแบบโซดาเพื่อใช้ในการทดลองควบคุม

นำเส้นใยนุ่น (แช่น้ำครบระยะเวลา 3 สัปดาห์) ที่เตรียมไว้มาผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา โดยใช้ภาวะในการต้มเยื่อด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละต่าง ๆ ดังนี้ 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักนุ่นแห้ง ทดลอง 2 ซ้ำ โดยใช้ภาวะในการต้มเยื่อดังนี้ อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 17 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.1.2.1 นำนุ่นที่ตัดเป็นชิ้นขนาด 2-3 เซนติเมตร บรรจุลงในบอมบ์ (bomb) ของเครื่องต้มเยื่อ ซึ่งใช้เป็นภาชนะในการต้มเยื่อ

3.2.1.2.2 คำนวณปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพิ่ม ตามวิธีการคำนวณในภาคผนวก จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำที่คำนวณได้ลงในบอมบ์

3.2.1.2.3 ปิดฝาบอมบ์ให้แน่นและนำบอมบ์เข้าเครื่องต้มเยื่อ เปิดสวิทช์ทำความร้อน เปิดน้ำหล่อเย็น และเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายในของหม้อต้มเยื่อมีค่า 120 องศาเซลเซียส จนกระทั่งครบเวลา 120 นาที เมื่อต้มเยื่อเสร็จแล้ว ให้ปล่อยน้ำดำ (black liquor) ออกจากบอมบ์และเก็บตัวอย่างน้ำดำเพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณด่างที่เหลือ (residual alkali) ตามมาตรฐาน SCAN standard N33:94 นำบอมบ์ออกจากเครื่องต้มเยื่อ เปิดน้ำหล่อเย็นให้บอมบ์เย็นและเปิดฝาบอมบ์เพื่อเอาเยื่อที่ต้มเสร็จออกจากบอมบ์

3.2.1.2.4 ล้างเยื่อด้วยน้ำประปาให้สะอาดเพื่อเอาน้ำดำและสารเคมีออกจากเยื่อ นำเยื่อที่ผ่านการล้างแล้วมาปั่นแห้งให้เยื่อหมาด ซึ่งน้ำหนักเยื่อรวมที่ได้ทั้งหมด แล้วแบ่งเยื่อออกมาหาปริมาณความชื้นของเยื่อตามมาตรฐาน TAPPI T 258 om-02 เพื่อนำมาคำนวณหาร้อยละผลผลิตของเยื่อ (% pulp yield) รวมถึงแบ่งเยื่อบางส่วนมาวิเคราะห์หาค่าป่านัมเบอร์ (kappa number) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงลิกนินที่อยู่ในเยื่อ และวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อหลังจากการต้มเยื่อ

3.2.1.3 การบดเยื่อ (refining)

นำเยื่อที่ได้จากการต้มเยื่อมาบดเยื่อโดยใช้เครื่องบดเยื่อแบบจานบด ใช้ระยะห่างระหว่างจานบด 10/1000 นิ้ว บด 2 รอบ ที่ร้อยละ 5 ของความเข้มข้นเยื่อ (% consistency)

3.2.1.4 การเตรียมน้ำเยื่อก่อนขึ้นแผ่น

ก่อนที่จะนำเยื่อนุ่นที่ผ่านการบดเยื่อแล้วไปขึ้นแผ่นกระดาษนั้น ให้แบ่งเยื่อที่ได้ส่วนหนึ่งมาขจัดความหึงงอของเส้นใยที่เกิดขึ้นระหว่างการบดเยื่อแบบจานบดก่อน (latency removal) ทั้งนี้เพื่อผลของความหึงงอของเส้นใยที่มีต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษ การขจัดความหึงงอของเส้นใยสามารถทำได้โดยนำเยื่อใส่ในเครื่องตีกระจายเยื่อ และตีกระจายเยื่อ 50,000 รอบ ที่ความเข้มข้นของเยื่อร้อยละ 1.5 ใช้อุณหภูมิในการเตรียมกระจายเยื่อประมาณ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเยื่อทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการขจัดความหึงงอของเส้นใยมาเตรียมให้เป็นน้ำเยื่อที่มีความเข้มข้นของเยื่อเท่ากับร้อยละ 0.3 เพื่อสำหรับขึ้นแผ่นทดสอบต่อไป

3.2.1.5 การทดสอบสมบัติของเยื่อ

น้ำเยื่อที่เตรียมได้มาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ ของเยื่อดังนี้คือ

3.2.1.5.1 คัปปานัมเบอร์ (kappa number) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ ซึ่งหาได้โดยใช้มาตรฐาน TAPPI T 236 om-99 นำเยื่อที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.1.2.4 มาหาค่าคัปปานัมเบอร์ ทดสอบซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละภาวะ โดยมีเกณฑ์ดังนี้คือ ถ้าค่าคัปปานัมเบอร์มีค่าน้อย แสดงว่าเยื่อที่ผลิตได้มีลิกนินหลงเหลืออยู่ในเยื่อน้อย เยื่อที่ได้จะมีความขาวสว่างสูง ในทางตรงกันข้าม ถ้าเยื่อมีค่าคัปปานัมเบอร์สูง แสดงว่ามีลิกนินหลงเหลืออยู่ในเยื่อสูง เยื่อที่ได้จะมีความขาวสว่างต่ำ

3.2.1.5.2 ปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ (residual alkali) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณต่างที่เหลือในน้ำดำ (black liquor) ที่ได้หลังจากการต้มเยื่อจากข้อ 3.2.1.2.3 ทดสอบซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละภาวะ โดยใช้มาตรฐานของ SCAN standard N33:94

3.2.1.5.3 ลักษณะคุณภาพและมิติของเส้นใย นำน้ำเยื่อที่ยังไม่ผ่านและที่ผ่านการขจัดความหึงงอจากข้อ 3.2.1.4 มาวัดค่าความยาวของเส้นใย (fiber length) ความกว้างของเส้นใย (fiber width) ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก (fines content) ดัชนีความโค้งงอของเส้นใย (curl index) และดัชนีความหักงอของเส้นใย (kink index) ด้วยเครื่องวิเคราะห์เส้นใย ตามมาตรฐาน ISO 16065 ในการวัดแต่ละครั้งจะวัดเส้นใยเป็นจำนวน 5000 เส้น และทดสอบซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละภาวะ

3.2.1.5.4 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ (fiber chemical composition) เป็นการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อที่ผลิตได้จากภาวะต่าง ๆ รวมถึงวัตถุดิบเริ่มต้น

โดยวิเคราะห์หาปริมาณลิกนิน ตามมาตรฐาน TAPPI T222 om-98 ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ตามวิธี Acid chlorite ของ Browing [27] และปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ตามมาตรฐาน TAPPI T222 om-88 ส่วนปริมาณเฮมิเซลลูโลสนั้นสามารถหาได้จากผลต่างของปริมาณไฮโดรเซลลูโลสและปริมาณแอลฟาเซลลูโลส

3.2.1.6 การขึ้นแผ่นทดสอบ (handsheet)

นำเยื่อที่ผ่านและไม่ผ่านการขจัดความหึ่งออกจากชั้นตอนที่ 1 ข้อที่ 3.2.1.4 มาขึ้นแผ่นทดสอบให้มีน้ำหนักมาตรฐาน 60 กรัมต่อตารางเมตร โดยใช้เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid-Köthen ตามมาตรฐาน ISO 5269-2 ก่อนที่จะนำแผ่นทดสอบไปทดสอบสมบัติต่อไป

3.2.1.7 การปรับสภาพแผ่นทดสอบ

ก่อนนำกระดาษไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ กระดาษต้องผ่านการปรับสภาพก่อนในห้องควบคุมสภาวะ เป็นเวลาประมาณ 4 ชั่วโมง เพื่อให้กระดาษมีค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ใกล้เคียงกัน (อุณหภูมิประมาณ 27 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ ร้อยละ 65-75)

3.2.1.8 การทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ

นำแผ่นทดสอบที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว มาทดสอบสมบัติทั่วไปของกระดาษ (basic properties) สมบัติด้านทัศนศาสตร์ (optical properties) และสมบัติด้านความแข็งแรง (strength properties) ดังรายละเอียดต่อไปนี้คือ

3.2.1.8.1 สมบัติทั่วไปของกระดาษ

3.2.1.8.1.1 น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight) นำแผ่นทดสอบมาชั่งน้ำหนักแล้วนำค่าน้ำหนักที่ได้มาหารพื้นที่ของแผ่นทดสอบ โดยวัดแผ่นทดสอบของแต่ละภาวะจำนวน 5 แผ่น

3.2.1.8.1.2 ความหนา (thickness) วัดความหนาของแผ่นทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนา โดยวัดแผ่นทดสอบของแต่ละภาวะจำนวน 5 แผ่น ในแต่ละแผ่นจะวัด 5 ตำแหน่ง

3.2.1.8.1.3 ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) เป็นค่าที่คำนวณได้จากการนำน้ำหนักมาตรฐานจากข้อ 3.2.1.8.1.1 หารด้วยความหนาจากข้อ 3.2.1.8.1.2 ของแผ่นทดสอบ

3.2.1.8.2 สมบัติด้านทัศนศาสตร์

3.2.1.8.2.1 ความขาวสว่าง (brightness) วัดด้วยเครื่องวัดสมบัติเชิงแสง ตามมาตรฐาน TAPPI T 525 om-02 โดยวัดแผ่นทดสอบของแต่ละภาวะจำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 5 ตำแหน่ง

3.2.1.8.2.2 ความทึบแสง (opacity) วัดด้วยเครื่องวัดสมบัติเชิงแสงเครื่องเดียวกับการวัดค่าความขาวสว่าง ตามมาตรฐาน TAPPI T 519 om-02 วัดแผ่นทดสอบของแต่ละภาวะจำนวน 5 แผ่น แต่ละแผ่นวัด 5 ตำแหน่ง

3.2.1.8.3 สมบัติด้านความแข็งแรง

3.2.1.8.3.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) วัดโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง ตามมาตรฐานของ TAPPI T 494 om-01 โดยตัดชิ้นทดสอบให้มีความกว้าง 15 มิลลิเมตร ในแต่ละภาวะจะทดสอบแผ่นทดสอบจำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 2 ครั้ง นำค่าความต้านทานแรงดึงที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index) โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน

3.2.1.8.3.2 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength) วัดโดยใช้เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ ตามมาตรฐาน TAPPI T 403 om-97 โดยในแต่ละภาวะจะทดสอบแผ่นทดสอบจำนวน 5 แผ่น แผ่นละ 2 จุด จุดที่หนึ่งวัดชิ้นทดสอบด้านตะแกรงลวดขึ้นแผ่น (wire side) จุดที่สองวัดด้านผ้าสักหลาด (felt side) นำค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมาหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน เพื่อให้ได้เป็นค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index)

3.2.1.8.3.3 ความต้านทานแรงฉีก (tear resistance) หรือความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear strength) วัดโดยใช้เครื่องวัดความต้านทานแรงฉีก แบบ Elmendorf internal tearing resistance test ตามมาตรฐาน TAPPI T 414 om-98 โดยตัดชิ้นทดสอบให้มีความกว้าง 63 มิลลิเมตร ในแต่ละภาวะจะทดสอบแผ่นทดสอบจำนวน 5 แผ่น แต่ละแผ่นสามารถนำมาหาค่าความต้านทานแรงฉีกได้ 2 ครั้ง ในแต่ละครั้งวัด 1 จุด นำค่าความต้านทานแรงฉีกที่ได้มาคำนวณหาค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีก (tear index) โดยนำค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกมาหารด้วยน้ำหนักมาตรฐาน

3.2.1.8.4 มุมสัมผัส (contact angle)

มุมสัมผัสของกระดาษเป็นค่าที่บอกความสามารถในการเปียกผิวและการซึมน้ำของกระดาษ วัดโดยใช้เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact angle goniometer) โดยการปล่อยหยดน้ำขนาด 3 ไมโครลิตร ลงบนแผ่นทดสอบ เครื่องวัดมุมสัมผัสจะบันทึกภาพของหยดน้ำที่เปลี่ยนไปแต่ละวินาทีของหยดน้ำตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดหลังจากที่ได้หยดน้ำไว้บนพื้นผิวเป็นเวลา 12 วินาที นอกจากนี้เครื่องวัดมุมสัมผัสจะแสดงค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่เปลี่ยนไปต่อเวลาที่เปลี่ยนไป ในแต่ละภาวะจะทดสอบค่ามุมสัมผัสของแผ่นทดสอบจำนวน 5 ครั้ง โดยวัดทั้งสองด้านของแผ่นทดสอบ

3.2.1.9 การวิเคราะห์ผลเพื่อหาปริมาณไซเตียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสม

นำผลการทดลองที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณไซเตียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการต้มเยื่อแบบไซดา

3.2.1.10 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำผลการทดลองของการผลิตเยื่อแบบไซดา ได้แก่ ค่าร้อยละผลผลิตเยื่อ ค่าคัปปานัมเบอร์ องค์ประกอบทางเคมี และค่าปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ มาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค ANOVA แบบ single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อดูว่าระดับของการใช้ปริมาณไซเตียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ นำผลที่ได้จากการทดสอบแผ่นกระดาษในด้านต่าง ๆ และคุณภาพและมิติของเส้นใยมาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค Two-way ANOVA with replication ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อดูว่าการขจัดความหึงงอและปริมาณไซเตียมไฮดรอกไซด์นั้นมีผลต่อสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ซึ่งการวิเคราะห์ทางสถิตินั้นจะพิจารณาจาก P-value เป็นหลัก คือ หาก P-value ของตัวแปรใดมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อสมบัตินั้น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ

3.2.2 การทดลองตอนที่ 2: การผลิตเยื่อแบบไซดาของเส้นใยุ่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยไซเตียมไฮดรอกไซด์

3.2.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำเส้นใยุ่นไปแช่ในสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ 2 ระดับ โดยระดับแรกใช้ปริมาณไซเตียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 5 ของน้ำหนักแห้งของุ่น และระดับที่สองใช้ปริมาณไซเตียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 10 ของน้ำหนักแห้งของุ่น โดยใช้เส้นใยุ่น 500 กรัม น้ำหนักแห้ง

และน้ำประปา 13 ลิตร แช่เส้นใยเป็นเวลา 1, 2 และ 3 สัปดาห์ เมื่อครบเวลาแล้วล้างนุ่นให้สะอาดด้วยน้ำประปาและบีบน้ำออกจากเส้นใยนุ่นให้หมด ตัดเส้นใยนุ่นให้มีขนาดประมาณ 2-3 เซนติเมตร และหาค่าความชื้นของเส้นใยนุ่นด้วยเครื่องวัดความชื้น

3.2.2.2 การผลิตเยื่อแบบโซดาของเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.2.2.2.1 เลือกปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1 และจากตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ อันได้แก่ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพ และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ ทำให้ได้ภาวะที่ใช้ในการผลิตเยื่อแบบโซดาทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 3-1 ต้มเยื่อนุ่นโดยใช้ภาวะการต้มเยื่อและวิธีการตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อที่ 3.2.1.2

ตารางที่ 3-1 ภาวะการผลิตเยื่อแบบโซดาของเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

ภาวะที่	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อ (ร้อยละ)	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพ (ร้อยละ)	เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ (สัปดาห์)
1	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0	3
2	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	5	1
3	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	5	2
4	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	5	3
5	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	10	1
6	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	10	2
7	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	10	3

หมายเหตุ ภาวะที่ 1 คือภาวะที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองตอนที่ 1 เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ หรือเป็นภาวะควบคุม

3.2.2.2.2 นำเยื่อที่ต้มเสร็จแล้วมาล้างเยื่อให้สะอาด หาร้อยละผลผลิตเยื่อและตีกระจายเยื่อเพื่อขจัดความหึงงอของเส้นใยตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อที่ 3.2.1.4

3.2.2.2.3 ทดสอบสมบัติของเยื่อ ได้แก่ คัปปานัมเบอร์ ปริมาณต่างที่หลงเหลือจากการต้มเยื่อ ลักษณะคุณภาพและมิติของเส้นใยและองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อตามขั้นตอนที่ 1 ข้อที่ 3.2.1.5

3.2.2.2.4 ขึ้นแผ่นทดสอบตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อที่ 3.2.1.6 และทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ ได้แก่ สมบัติทั่วไปของกระดาษ คือ น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และความหนาแน่นปรากฏ สมบัติด้านทัศนศาสตร์ คือ ความขาวสว่างและความทึบแสง รวมถึงสมบัติด้านความแข็งแรง คือ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความแข็งแรงต่อแรงฉีก และวัดมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษ ตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.8

3.2.2.2.5 นำผลการทดลองทั้งหมดที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่น

3.2.2.2.6 นำผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าสมบัติของเยื่อและของแผ่นทดสอบต่าง ๆ มาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค Two-way ANOVA with replication ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อดูว่าการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาแช่เส้นใยในการปรับสภาพเส้นใยนั้น มีผลต่อสมบัติของเยื่อและสมบัติของแผ่นทดสอบเหล่านั้นอย่างไร มีนัยสำคัญหรือไม่

3.2.3 การทดลองตอนที่ 3: การผลิตเยื่อแบบโซดาของเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส

3.2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำเส้นใยนุ่นไปแช่ในสารละลายที่มีเอนไซม์ไลโปเลส 100L ซึ่งเป็นเอนไซม์ไลเปสทางการค้าในสถานะของเหลวที่มีค่าแอกทีวิตีของเอนไซม์ (enzyme activity) เท่ากับ 100 KLU/g เมื่อ KLU คือ kilo lipase unit โดยเตรียมเอนไซม์เพื่อใช้ปรับสภาพเส้นใยที่อุณหภูมิประมาณ 4 องศาเซลเซียส ใช้ปริมาณเอนไซม์ไลเปส 2 ระดับ ระดับแรกใช้ปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่ร้อยละ 0.25 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น (เท่ากับ 250 LU/g ของน้ำหนักแห้งของนุ่น) และระดับที่สองใช้ปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่ร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น (เท่ากับ 500 LU/g ของน้ำหนักแห้งของนุ่น) โดยใช้เส้นใยนุ่น 500 กรัม น้ำหนักแห้ง และน้ำประปา 13 ลิตร โดยแช่เส้นใยเป็นระยะเวลา 1, 3 และ 5 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาแล้ว นำเส้นใยนุ่นมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำประปาและบีบน้ำออกจากเส้นใยนุ่นให้หมด ตัดเส้นใยนุ่นให้มีขนาดประมาณ 2-3 เซนติเมตร หาค่าความชื้นของเส้นใยนุ่นด้วยเครื่องวัดความชื้น

3.2.3.2 การผลิตเยื่อแบบโซดาของเส้นใยนุ่มที่ผ่านการปรับสภาพด้วย เอนไซม์ไลเปส

3.2.3.2.1 เลือกปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1 และจากตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส อันได้แก่ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพ และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ ทำให้ได้ภาวะที่ใช้ในการผลิตเยื่อแบบโซดาทั้งหมดดังแสดงในตารางที่ 3-2 ต้มเยื่อนุ่มโดยใช้ภาวะการต้มเยื่อและวิธีการตามการทดลอง ตอนที่ 1 ข้อที่ 3.2.1.2

ตารางที่ 3-2 ภาวะการผลิตเยื่อแบบโซดาของเส้นใยนุ่มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส

ภาวะที่	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อ (ร้อยละ)	ปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่ใช้ในการปรับสภาพ (ร้อยละ)	เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ
1	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0	3 สัปดาห์
2	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0.25	1 ชั่วโมง
3	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0.25	3 ชั่วโมง
4	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0.25	5 ชั่วโมง
5	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0.50	1 ชั่วโมง
6	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0.50	3 ชั่วโมง
7	ปริมาณที่เหมาะสมจากตอนที่ 1	0.50	5 ชั่วโมง

หมายเหตุ ภาวะที่ 1 คือภาวะที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองตอนที่ 1 เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ หรือเป็นภาวะควบคุม

3.2.3.2.2 นำเยื่อที่ต้มแล้วมาล้างเยื่อให้สะอาด หาร้อยละผลผลิตเยื่อและตีกระจายเยื่อเพื่อขจัดความหึงงอของเส้นใยตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อที่ 3.2.1.4

3.2.3.2.3 ทดสอบสมบัติของเยื่อ ได้แก่ คัปปานัมเบอร์ ปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ ลักษณะคุณภาพและมิติของเส้นใยและองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ ตามขั้นตอนที่ 1 ข้อที่ 3.2.1.5

3.2.3.2.4 ขึ้นแผ่นทดสอบตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อที่ 3.2.1.6 และทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ ได้แก่ สมบัติทั่วไปของกระดาษ คือ น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และความหนาแน่นปรากฏ สมบัติด้านทัศนศาสตร์ คือ ความขาวสว่างและความทึบแสง รวมถึง

สมบัติด้านความแข็งแรง คือ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความต้านทานแรงฉีก และวัดมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษ ตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.8

3.2.3.2.5 นำผลการทดลองทั้งหมดที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่น

3.2.3.2.6 นำผลการทดลองที่ได้จากการวัดค่าสมบัติของเยื่อและของแผ่นทดสอบต่าง ๆ มาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้เทคนิค Two-way ANOVA with replication ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อดูว่าการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสและเวลาแช่เส้นใยในการปรับสภาพเส้นใยนั้น มีผลต่อสมบัติของเยื่อและสมบัติของแผ่นทดสอบเหล่านั้นอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่

3.2.4 การทดลองตอนที่ 4: การผลิตเยื่อแบบโซดาของเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส โดยการลดปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อลง

3.2.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำเส้นใยนุ่นไปแช่ในสารละลายที่มีเอนไซม์ไลเปสที่ได้จากการเลือกสภาวะที่เหมาะสมจากตอนที่ 3 เมื่อครบระยะเวลาแช่เส้นใยแล้ว นำเส้นใยมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำประปาและบีบน้ำออกจากเส้นใยให้หมด ตัดเส้นใยนุ่นให้มีขนาดประมาณ 2-3 เซนติเมตร วัดความชื้นของเส้นใยนุ่นด้วยเครื่องวัดความชื้น

3.2.4.2 การผลิตเยื่อแบบโซดาของเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส

3.2.4.2.1 นำเส้นใยนุ่นที่เตรียมไว้ในข้อ 3.2.4.1 มาผลิตเยื่อด้วยวิธีโซดา โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น ต้มเยื่อโดยใช้ภาวะการต้มเยื่อและวิธีการตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อที่ 3.2.1.2

3.2.4.2.2 นำเยื่อที่ต้มเสร็จแล้วมาให้สะอาด หาร้อยละผลผลิตเยื่อและตีกระจายเยื่อเพื่อขจัดความหึงงอของเส้นใยตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อที่ 3.2.1.4

3.2.4.2.3 ทดสอบสมบัติของเยื่อ ได้แก่ คัปปานัมเบอร์ ปริมาณต่างที่หลงเหลือจากการต้มเยื่อ ลักษณะคุณภาพและมิติของเส้นใยและองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อตามขั้นตอนที่ 1 ข้อที่ 3.2.1.5

3.2.4.2.4 ขึ้นแผ่นทดสอบตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อที่ 3.2.1.6 และทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ ได้แก่ สมบัติทั่วไปของกระดาษ คือ น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และความหนาแน่นปรากฏ สมบัติด้านทัศนศาสตร์ คือ ความขาวสว่างและความทึบแสง รวมถึงสมบัติด้านความแข็งแรง คือ ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุ และความต้านทานแรงฉีก และวัดมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษ ตามการทดลองตอนที่ 1 ข้อ 3.2.1.8

3.2.4.2.5 นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองควบคุมซึ่งเป็นการทดลองที่เส้นใยนุ่มไม่ผ่านการปรับสภาพ เพียงแต่ผ่านการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ โดยนำผลการทดลองที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองที่เส้นใยผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการทดลองที่เส้นใยผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส มาทำการเปรียบเทียบด้วย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการศึกษาการผลิตเยื่อวิธีโซดาจากนุ่นในภาวะต่างๆ เพื่อใช้เป็นการทดลองควบคุม

ผลการทดลองที่แสดงภายใต้หัวข้อ 4.1 นี้เป็นผลของการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งเป็นการทดลองหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อแบบโซดาจากเส้นใยนุ่น และเพื่อนำปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังกล่าวไปใช้ในการผลิตเยื่อแบบโซดาจากเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และเอนไซม์ไลเปสก่อนที่จะนำไปผลิตเยื่อแบบโซดาในการทดลองตอนที่ 2 และตอนที่ 3 รวมถึงใช้เป็นการทดลองควบคุมเพื่อเปรียบเทียบกับการผลิตเยื่อแบบโซดาในตอนที่ 2 และตอนที่ 3 โดยในการทดลองตอนที่ 1 จะมีการแปรผันปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักนุ่นแห้ง ทำการต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที ทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อ จากนั้นนำเยื่อไปบดโดยใช้เครื่องแบบจานบด แบ่งเยื่อส่วนหนึ่งที่ผ่านการบดแล้วมาจัดความหึงงอของเส้นใย นำเยื่อทั้งก่อนและหลังการจัดความหึงงอของเส้นใยมาทำเป็นแผ่นทดสอบ เพื่อทดสอบสมบัติของเยื่อที่ขึ้นเป็นแผ่นกระดาษ และนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับกัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลผลิตเยื่อ (pulp yield)

ผลของการผลิตเยื่อจากเส้นใยนุ่นด้วยวิธีโซดาที่ใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4-1 จะเห็นได้ว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อส่งผลต่อผลผลิตเยื่อ โดยเมื่อมีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ผลผลิตของเยื่อมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะต่างที่ใช้ในการต้มเยื่อมีการละลายลิกนินออกจากเยื่อได้มากขึ้น และอาจทำลายบางส่วนของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส การผลิตเยื่อนุ่นด้วยความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ให้ปริมาณผลผลิตเยื่อสูงสุด คือร้อยละ 81 อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์สถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-2 ซึ่งเป็นผลการทดสอบทางสถิติโดยใช้วิธี Anova แบบ single factor พบว่า การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อผลผลิตเยื่อของการผลิตเยื่อแบบโซดาจากนุ่น

4.1.2 ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อ (residual alkali)

จากตารางที่ 4-1 พบว่า การใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ ส่งผลต่อปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ คือ ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น โดยไม่มีต่างเหลือหลังจากการต้มเยื่อ เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 แสดงว่ามีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการทำปฏิกิริยาจนหมดและปริมาณที่ใช้อาจยังไม่เพียงพอ เมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นร้อยละ 15 พบว่าเริ่มมีปริมาณต่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อ แสดงว่าต่างที่ใช้ในการต้มเยื่อสามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้มากขึ้นและเพียงพอ ต่างจึงเหลือในระบบ และเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor ดังแสดงในตารางที่ 4-2 พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อมีผลต่อปริมาณต่างคงเหลือในน้ำต้มเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมี P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

ตารางที่ 4-1 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยื่ออ่อน

NaOH dosage (%)	yield (%)	residual alkali (g/l)	kappa number
10	81 ± 4.07	0 ± 0	111 ± 5.83
15	77 ± 3.73	0.30 ± 0.12	111 ± 7.42
20	76 ± 1.79	2.00 ± 0.14	108 ± 2.22
25	70 ± 3.25	5.30 ± 0.35	111 ± 2.18
30	74 ± 3.07	7.40 ± 0.16	115 ± 3.51

ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อสมบัติของเยื่ออ่อน

pulp properties	P-value	F _{cal}	F _{crit}
yield	0.1137176	3.2566056	5.1921678
kappa number	0.6693288	0.6178717	5.1921678
residual alkali	2.757E-06*	343.84084	5.1921678

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

4.1.3 คัปปานัมเบอร์ (kappa number)

คัปปานัมเบอร์ คือ ค่าอนุมาณที่บ่งบอกถึงปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อหลังจากการต้มเยื่อ ในการหาคัปปานัมเบอร์นั้นจะใช้เพอร์มังกาเนตในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารที่มีองค์ประกอบคล้ายกับลิกนินหรืออนุพันธ์ของลิกนิน ในทางทฤษฎี คัปปานัมเบอร์ควรมีค่าลดลงเมื่อใช้ปริมาณไฮโดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งคัปปานัมเบอร์จะเป็นค่าผกผันกับปริมาณต่างหลงเหลือหลังจากต้มเยื่อ จากการทดสอบดังแสดงผลในตารางที่ 4-1 พบว่าเมื่อต้มเยื่อนุ่นด้วยไฮโดรอกไซด์ 200 กรัม/ลิตร มีค่าคัปปานัมเบอร์ต่ำสุด คือ 108 และค่าคัปปานัมเบอร์ที่ได้ส่วนใหญ่ไม่เป็นไปตามทฤษฎี ทั้งนี้อาจเนื่องจากขณะที่ต้มเยื่ออาจมีสารแทรกหรือสารที่มีองค์ประกอบคล้ายกับลิกนินละลายออกมาเกาะที่ผิวหน้าของเส้นใย เมื่อนำเยื่อมาทดสอบหาคัปปานัมเบอร์สารที่เกาะ/เคลือบที่ผิวของเส้นใยอาจเข้าทำปฏิกิริยากับเพอร์มังกาเนตแทนลิกนิน เมื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor พบว่าปริมาณไฮโดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อไม่มีผลต่อค่าคัปปานัมเบอร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 4-2)

4.1.4 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ (pulp chemical composition)

จากตารางที่ 4-3 ซึ่งแสดงผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ลิกนิน ไฮโดรเซลลูโลส แอลฟาเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และสารแทรก ของเยื่อที่ผลิตด้วยวิธีโซดาของแต่ละระดับปริมาณไฮโดรอกไซด์ จะเห็นได้ว่าเยื่อที่ต้มด้วยไฮโดรอกไซด์ปริมาณต่าง ๆ มีทั้งปริมาณลิกนิน ไฮโดรเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสลดลง เมื่อเทียบกับเยื่อนุ่นที่เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น เนื่องจากไฮโดรอกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับลิกนิน ละลายลิกนินออกจากเส้นใย และไฮโดรอกไซด์ยังเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์โบไฮเดรตในเส้นใยอีกด้วย จึงทำให้ไฮโดรเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสลดลง ขณะที่แอลฟาเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเยื่อนุ่นที่เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น อาจมีสาเหตุมาจากไฮโดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับเฮมิเซลลูโลสง่ายกว่าเซลลูโลส ปริมาณของแอลฟาเซลลูโลสจึงเสมือนเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ไฮโดรอกไซด์ที่ระดับปริมาณต่าง ๆ ในการต้มเยื่อ จะเห็นได้ว่าปริมาณลิกนินและเฮมิเซลลูโลสมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ไฮโดรอกไซด์ที่ระดับปริมาณเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ค่าไฮโดรเซลลูโลสเพิ่มขึ้นนั่นเอง ทั้งนี้เนื่องจากไฮโดรเซลลูโลสนั้นเป็นค่าที่หาได้จากการรวมกันของแอลฟาเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสนั่นเอง

ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Anova แบบ single factor ดังแสดงในตารางที่ 4-4 พบว่า P-value ของปริมาณลิกนิน ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส

ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส และปริมาณเฮมิเซลลูโลส มีค่าน้อยกว่า 0.05 นั้นแสดงว่า การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับต่าง ๆ ส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4-3 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อนุ่น

condition	chemical composition			
	lignin (%)	holo cellulose ^{1,2} (%)	α - cellulose ³ (%)	hemi cellulose (%)
kapok (raw material)	20.03 \pm 0.24	79.07 \pm 0.02	44.64 \pm 0.60	38.83 \pm 0.58
10 % NaOH	19.20 \pm 0.47	76.12 \pm 0.13	65.63 \pm 0.21	10.49 \pm 0.35
15 % NaOH	18.27 \pm 0.06	76.53 \pm 0.11	69.87 \pm 0.08	6.66 \pm 0.20
20 % NaOH	17.57 \pm 0.11	78.49 \pm 0.19	69.65 \pm 0.36	8.84 \pm 0.17
25 % NaOH	17.53 \pm 0.26	78.50 \pm 0.29	69.96 \pm 0.25	8.54 \pm 0.04
30 % NaOH	17.22 \pm 0.33	78.53 \pm 0.07	70.49 \pm 0.21	8.05 \pm 0.13

หมายเหตุ 1. holo cellulose คือ ผลรวมของ α - cellulose กับ hemi cellulose 2.ร้อยละ holo cellulose คิดเทียบกับน้ำหนักวัตถุดิบเริ่มต้น 3.ส่วนร้อยละ α - cellulose คิดเทียบกับน้ำหนักของ holo cellulose

ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อนุ่น

chemical composition	P-value	F _{cal}	F _{crit}
lignin	5.4E-03*	15.0874	5.1921
holo cellulose	7.8E-05*	92.6522	5.1921
α - cellulose	2.8E-05*	134.2014	5.1921
hemi cellulose	7.2 E-05*	92.2212	5.1921

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

4.1.5 คุณภาพและมิติของเส้นใย

ตารางที่ 4-5 แสดงผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อและการขจัดความหึงงอของเส้นใยหลังจากการบดเยื่อที่มีต่อลักษณะของเส้นใยของเยื่ออ่อน จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ความยาวของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีแนวโน้มลดลง (ยกเว้นในกรณีที่ใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) ซึ่งในความจริงแล้วเส้นใยไม่ได้ยาวเพิ่มขึ้น เพียงแต่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กลดลง ทำให้ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นใยเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเส้นใยขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากกว่า จึงทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่านั่นเอง ในส่วนของอิทธิพลของการขจัดความหึงงอของเส้นใยต่อความยาวของเส้นใยนั้นพบว่า การขจัดความหึงงอของเส้นใยมีผลทำให้ความยาวของเส้นใยเพิ่มขึ้น

การขจัดความหึงงอของเส้นใยปกติจะเป็นการลดความเครียดของเส้นใย ดังนั้นเมื่อทำการขจัดความหึงงอของเส้นใยแล้ว จึงเห็นได้ว่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใยและดัชนีการหักงอของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลน้อยมากต่อดัชนีความโค้งงอและดัชนีการหักงอของเส้นใย เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ความกว้างของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยถูกทำลายมากขึ้นและเส้นใยอาจมีแนวโน้มยุบตัว (collapse) ลงมากขึ้น เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าความกว้างของเส้นใยลดลง อย่างไรก็ตาม การขจัดความหึงงอของเส้นใยมีผลน้อยมากต่อความกว้างของเส้นใย

จากผลการวิเคราะห์ผลทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-6 พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อมิติของเส้นใย เนื่องจากค่า P-value ของความยาวของเส้นใย ความโค้งงอของเส้นใย ความหักงอของเส้นใย และความกว้างของเส้นใยมีค่ามากกว่า 0.05 ทั้งหมด มีเพียงปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเท่านั้นที่ได้รับผลปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจาก P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ในขณะที่การขจัดความหึงงอของเส้นใยนั้นก็ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อมิติของเส้นใยและปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างการขจัดความหึงงอของเส้นใยกับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อนั้น พบว่า ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อมิติของเส้นใยและปริมาณเส้นใยขนาดเล็กด้วยเช่นกัน

4.1.6 ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density)

ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อทั้งก่อนขจัดความหึงงอของเส้นใยและหลังขจัดความหึงงอของเส้นใยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ

มากขึ้น (ภาพที่ 4-1) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้ไซเตียมไฮดรอกไซด์ปริมาณสูงขึ้นในการต้มเยื่อ จะละลายลิกนินออกจากเส้นใยได้ เส้นใยที่ได้จึงมีความยืดหยุ่น ผ่องของเส้นใยอ่อนนุ่ม เมื่อนำเส้นใยที่ได้มาขึ้นแผ่นทดสอบจึงส่งผลให้เส้นใยแนบชิดตัวกันได้ดี กระดาษที่ผลิตได้จึงมีความหนาแน่นสูงขึ้น ส่วนการขจัดความหึงงอของเส้นใยส่งผลให้กระดาษมีแนวโน้มความหนาแน่นสูงขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการขจัดความหึงงอของเส้นใยนั่นช่วยทำให้เส้นใยเกิดการบวมน้ำ (swelling) และการยุบตัว (collapse) ได้ดี จึงทำให้เส้นใยแนบชิดกันได้ดี

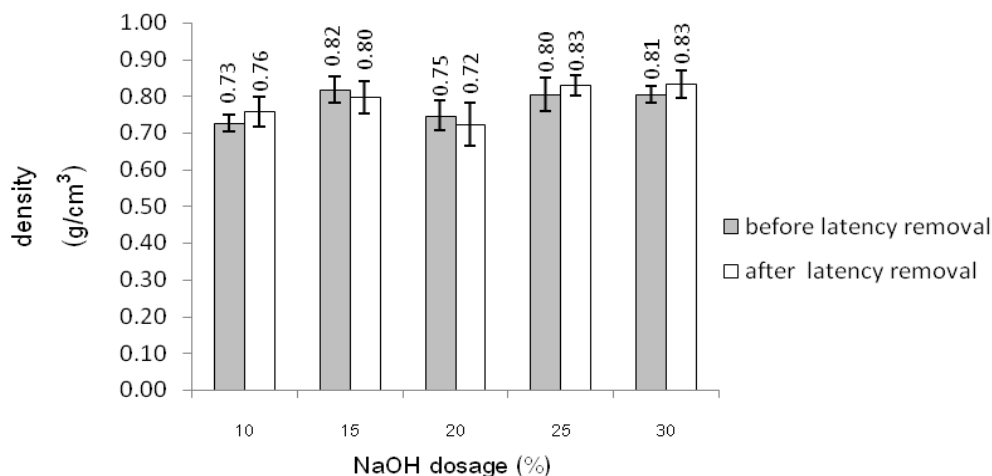
ตารางที่ 4-5 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อและการขจัดความหึงงอของเส้นใยต่อลักษณะเส้นใยของเยื่อนุ่น

NaOH dosage (%)	before latency removal					after latency removal				
	LWW fiber length (mm)	finer content (%)	curl index	kink index	fiber width (mm)	LWW fiber length (mm)	finer content (%)	curl index	kink index	fiber width (mm)
10	2.132±0.08	23.573±1.47	0.100±0.00	1.241±0.04	15.654±0.21	2.256±0.21	22.030±2.18	0.105±0.01	1.210±0.09	15.053 ±3.79
15	2.154±0.12	21.441±0.87	0.105±0.00	1.323±0.05	14.793±0.14	2.331±0.67	20.404±0.85	0.101±0.00	1.214±0.03	14.765 ±0.08
20	2.038±0.37	25.172±3.36	0.122±0.03	1.713±0.53	14.783±0.25	2.078±0.30	24.221±1.87	0.089±0.01	1.157±0.06	14.708 ±0.36
25	2.252±0.12	20.699±0.76	0.103±0.01	1.269±0.07	14.757±0.17	2.513±0.12	20.608±0.48	0.108±0.01	1.273±0.10	14.763 ±0.20
30	2.344±0.04	21.518±0.43	0.099±0.00	1.251±0.03	14.576±0.03	2.492±0.16	21.011±1.15	0.103±0.01	1.259±0.06	14.578 ±0.34

ตารางที่ 4-6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อและการขจัดความหึงงอของเส้นใยต่อมิติของเส้นใยของเยื่อนุ่น

fiber characteristic	A			B			A*B		
	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}
LWW fiber length	0.1251959	2.3441319	3.4780497	0.1090809	3.0940667	4.9646027	0.9455079	0.1763318	3.4780497
finer content	0.0239629*	4.5331592	3.4780497	0.2715392	1.3543201	4.9646027	0.971874	0.1207441	3.4780497
curl index	0.9796015	0.101061	3.4780497	0.3966646	0.784165	4.9646027	0.2197336	1.7292198	3.4780497
kink index	0.6664257	0.6075082	3.4780497	0.1802571	2.0754053	4.9646027	0.3448859	1.2680565	3.4780497
fiber width	0.1175272	2.4166295	3.4780497	0.8481878	0.0385953	4.9646027	0.9987115	0.0236856	3.4780497

หมายเหตุ A คือ ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ B คือ ผลของการขจัดความหึงงอของเส้นใย A*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และการขจัดความหึงงอของเส้นใย



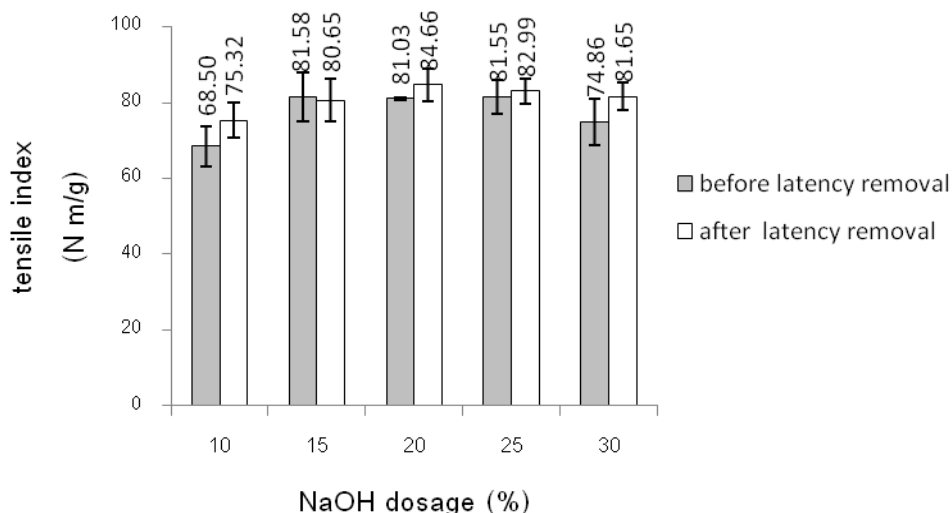
ภาพที่ 4-1 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อ่อนก่อนและหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตาราง 4-7 พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาแน่นของแผ่นทดสอบ เนื่องจาก P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 แต่การขจัดความหึงงอของเส้นใยไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาแน่นของแผ่นทดสอบ เนื่องจาก P-value มีค่ามากกว่า 0.05 ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และการขจัดความหึงงอของเส้นใยนั้น พบว่า ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาแน่นของแผ่นทดสอบ เนื่องจาก P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05

4.1.7 สมบัติด้านความแข็งแรง

4.1.7.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

ภาพที่ 4-2 แสดงผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อ่อนก่อนและหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น ทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น เพราะโซเดียมไฮดรอกไซด์จะช่วยละลายและกำจัดลิกนิน ทำให้เส้นใยมีการแยกตัวและสามารถสร้างพันธะระหว่างกันได้ดี นอกจากนี้การขจัดความหึงงอของเส้นใยทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเส้นใยเกิดการเหยียดตัว ส่งผลให้เส้นใยมีพื้นที่ผิวและบริเวณในการสร้างพันธะมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงที่ได้มีค่าสูงขึ้น

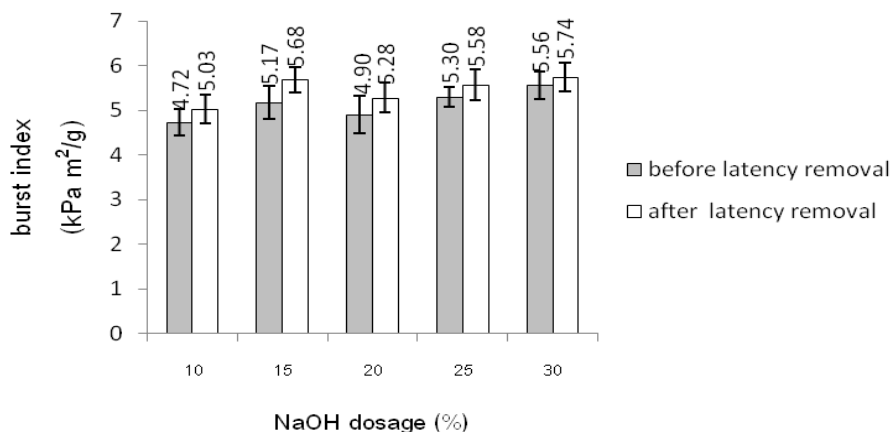


ภาพที่ 4-2 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อดัชนีความแข็งแรงตอแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อ่อนก่อนและหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 พบว่า ทั้งปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และการขจัดความหึงงอของเส้นใยส่งผลต่อดัชนีความแข็งแรงตอแรงดึงของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก P-value ของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และของการขจัดความหึงงอของเส้นใยมีค่าน้อยกว่า 0.05 ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และการขจัดความหึงงอของเส้นใยนั้นไม่มีผลต่อดัชนีความแข็งแรงตอแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ

4.1.7.2 ความแข็งแรงตอแรงดันทะลุ

ภาพที่ 4-3 แสดงผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อดัชนีความแข็งแรงตอแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อ่อนก่อนและหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย พบว่า ความแข็งแรงตอแรงดันทะลุมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความแข็งแรงตอแรงดึง กล่าวคือ ค่าดัชนีความแข็งแรงตอแรงดันทะลุสูงขึ้น เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น และการขจัดความหึงงอของเส้นใยทำให้ความแข็งแรงตอแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นเช่นกัน ในทางทฤษฎีนั้นความแข็งแรงตอแรงดึงและความแข็งแรงตอแรงดันทะลุนั้นขึ้นอยู่กััพันธะระหว่างเส้นใยและความแข็งแรงของเส้นใย [23] เมื่อลิกนินถูกกำจัดออกไปด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เส้นใยเป็นอิสระต่อกันมากขึ้น และการขจัดความหึงงอของเส้นใยทำให้เส้นใยเหยียดตัว มีพื้นที่ในการเกิดพันธะกันได้มากขึ้น ทั้งหมดนี้จึงส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงขึ้นนั่นเอง

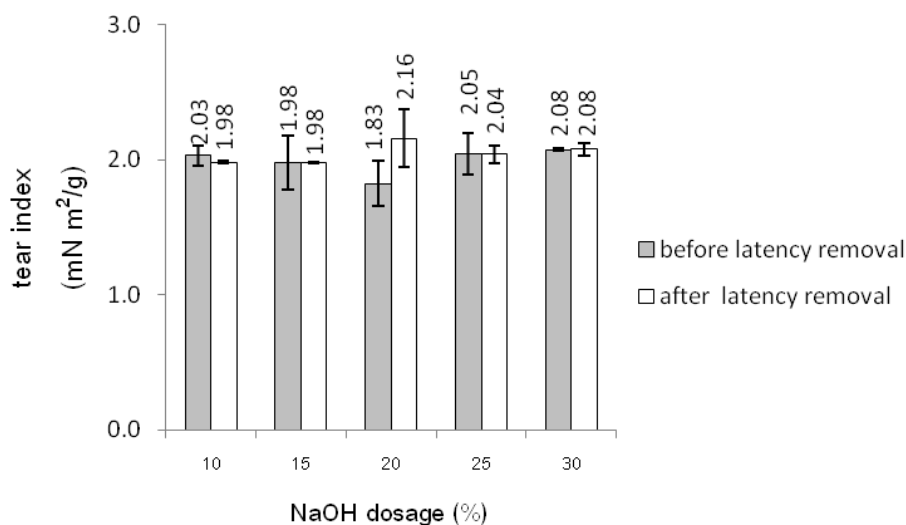


ภาพที่ 4-3 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อ่อนก่อนและหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 พบว่า ทั้งปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และการขจัดความหึงงอของเส้นใยส่งผลต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก P-value ของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และของการขจัดความหึงงอของเส้นใยมีค่าน้อยกว่า 0.05 ส่วนผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และการขจัดความหึงงอของเส้นใยต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันพบว่าจะไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ

4.1.7.3 ความแข็งแรงต่อแรงฉีก

ภาพที่ 4-4 แสดงผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกหรือความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตได้จากเยื่อ่อนก่อนและหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย จากการทดลองพบว่า ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีแนวโน้มไม่แน่นอน ในขณะที่การขจัดความหึงงอของเส้นใยดูเหมือนไม่มีผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะของเส้นใยนั่นเองที่ค่อนข้างเปราะ [13] เมื่อนำมาขึ้นแผ่นเป็นกระดาษทำให้กระดาษที่ผลิตได้ไม่ทนทานต่อแรงฉีก อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าภาวะที่ใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักแห้งของปูน เยื่อที่ผลิตได้เมื่อทำการขจัดความหึงงอของเส้นใยแล้วนำมาทำแผ่นทดสอบกลับให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนทำการขจัดความหึงงอของเส้นใย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะภาวะที่ใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 นี้ เส้นใยมีค่าดัชนีความโค้งงอของเส้นใยสูง (จากผลการทดลองในตารางที่ 4-5) จึงอาจส่งผลให้การกระจายตัวรับแรงฉีกของกระดาษเพิ่มขึ้น ความดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกจึงสูงขึ้น



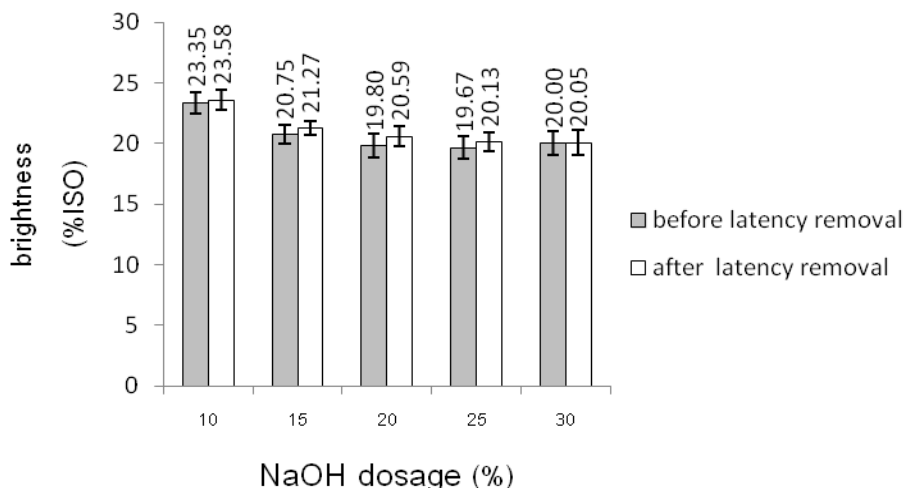
ภาพที่ 4-4 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อ่อนก่อนและหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ การขจัดความหึงงอของเส้นใย และปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองนี้ ไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของแรงฉีกขาดในแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value มากกว่า 0.05

4.1.8 สมบัติด้านทัศนศาสตร์

4.1.8.1 ความขาวสว่าง

ภาพที่ 4-5 แสดงผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อ่อนก่อนและหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้ปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าความขาวสว่างของชิ้นทดสอบมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะในการต้มเยื่อในภาวะที่เป็นด่างสูงเกินไป อาจทำให้เกิดปฏิกิริยา alkali darkening ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกลุ่มก่อสี (chromophoric) ในลิกนินที่เหลืออยู่ ซึ่งกลุ่มก่อสีนี้สามารถดูดกลืนแสง จึงทำให้ความขาวสว่างของกระดาษลดลง ในขณะที่การขจัดความหึงงอของเส้นใยก่อนทำแผ่นกระดาษนั้น ช่วยเพิ่มความขาวสว่างได้เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่เส้นใยเหยียดตัวออก ทำให้พื้นที่ผิวในการกระเจิงแสงของเส้นใยเพิ่มขึ้น ค่าความขาวสว่างจึงสูงขึ้น

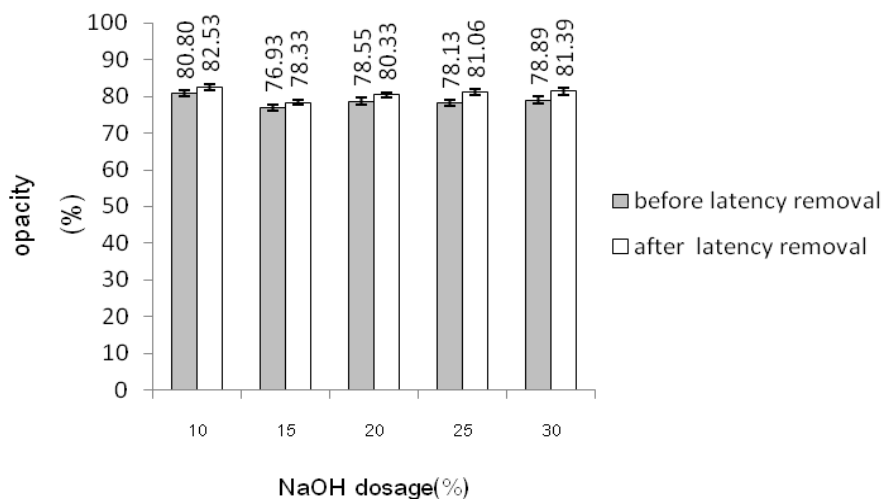


ภาพที่ 4-5 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อ่อนก่อนและหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก P-value ของการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าน้อยกว่า 0.05 ในขณะที่การขจัดความหึงงอของเส้นใย รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และการขจัดความหึงงอของเส้นใยนั้นไม่ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญ

4.1.8.2 ความทึบแสง

ภาพที่ 4-6 แสดงผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตได้จากเยื่อ่อนก่อนและหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการผลิตเยื่อมากขึ้น แนวโน้มความทึบแสงของกระดาษมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลิกนินถูกขจัดออกจากเส้นใยมากขึ้น การแนบชิดกันของเส้นใยดีขึ้น ทำให้ช่องว่างในการกระเจิงแสงลดลง ความทึบแสงของกระดาษจึงลดลง ขณะที่การขจัดความหึงงอของเส้นใยมีแนวโน้มให้ค่าความทึบแสงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเหยียดตัวของเส้นใย ส่งผลให้เส้นใยมีพื้นที่ในการกระเจิงแสงมากขึ้น ความทึบแสงของกระดาษจึงเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-6 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่ออ่อน ก่อนและหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-7 พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ การขจัดความหึงงอของเส้นใย และปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองนี้ต่างไม่ส่งผลต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า P-value ล้วนแล้วแต่มีค่ามากกว่า 0.05

ตารางที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์สถิติของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อและการขจัดความหึงงอของเส้นใยต่อสมบัติต่าง ๆ ของแผ่นทดสอบ

paper properties	A			B			A*B		
	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}
density	4.7E-05*	23.2836	3.4780	0.7691	0.0910	4.9646	0.0464*	3.5787	3.4780
tensile index	0.0036*	8.0332	3.4780	0.0308*	6.3052	4.9646	0.3900	1.1454	3.4780
burst index	0.0457*	3.5984	3.4780	0.0454*	5.2176	4.9646	0.9611	0.1451	3.4780
tear index	0.4263	1.0569	3.4780	0.7021	0.1550	4.9646	0.6989	0.5572	3.4780
brightness	7.4E-05*	21.0013	3.4780	0.1853	2.0234	4.9646	0.9353	0.1952	3.4780
opacity	0.1952	1.85434	3.4780	0.0466*	5.1525	4.9646	0.9799	0.1001	3.4780

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

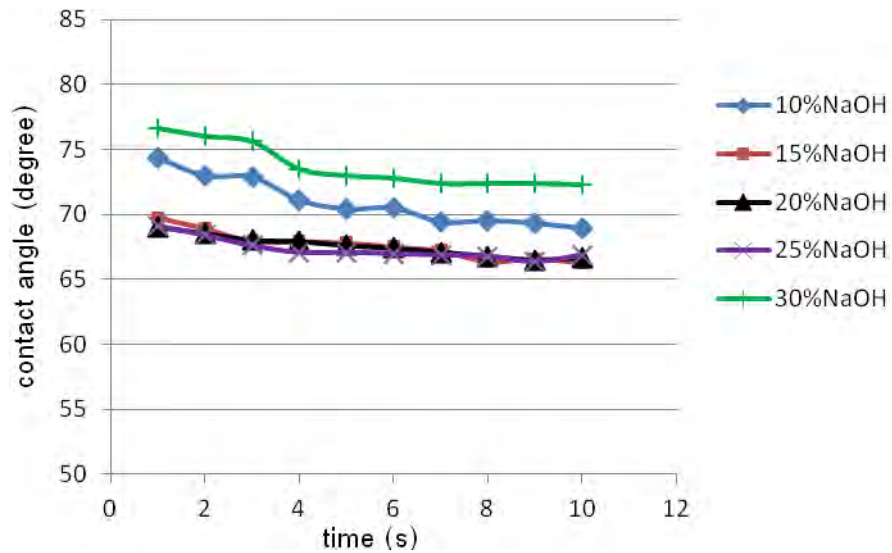
4.1.9 การทดสอบมูมส์มัสของน้ำบนกระดาษ

ภาพที่ 4-7 ถึง ภาพที่ 4-10 แสดงผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อมูมส์มัสของน้ำบนกระดาษที่ผลิตจากเยื่อ่อนก่อนและหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย โดยภาพที่ 4-7 แสดงผลของกระดาษด้านบนในระหว่างการผลิตแผ่นทดสอบจากเยื่อ่อนก่อนการขจัดความหึงงอของเส้นใย ภาพที่ 4-8 แสดงผลของกระดาษด้านที่สัมผัสกับด้านล่างหรือด้านตะแกรงในระหว่างการผลิตแผ่นทดสอบจากเยื่อ่อนก่อนการขจัดความหึงงอของเส้นใย ภาพที่ 4-9 แสดงผลของกระดาษด้านบนในระหว่างการผลิตแผ่นทดสอบจากเยื่อ่อนหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย และภาพที่ 4-10 แสดงผลของกระดาษด้านล่างในระหว่างการผลิตแผ่นทดสอบจากเยื่อ่อนหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย จากภาพจะเห็นได้ว่า มูมส์มัสของน้ำบนกระดาษด้านบนมีค่าสูงกว่ามูมส์มัสของน้ำบนกระดาษด้านล่าง โดยในกรณีของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อ่อนก่อนการขจัดความหึงงอของเส้นใย มูมส์มัสของน้ำบนกระดาษด้านบนมีค่าอยู่ในช่วง 65 ถึง 80 องศา (ภาพที่ 4-7) ขณะที่มูมส์มัสของน้ำบนกระดาษด้านล่าง มีค่าอยู่ในช่วง 55 ถึง 70 องศา (ภาพที่ 4-8) ส่วนในกรณีของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อ่อนหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย มูมส์มัสของน้ำบนกระดาษด้านบนมีค่าอยู่ในช่วง 70 ถึง 80 องศา (ภาพที่ 4-9) ขณะที่มูมส์มัสของน้ำบนกระดาษด้านล่าง มีค่าอยู่ในช่วง 58 ถึง 65 องศา (ภาพที่ 4-10) แสดงว่า กระดาษด้านบนด้านการซึมน้ำได้ดีกว่ากระดาษด้านล่าง เนื่องจากมีค่ามูมส์มัสที่สูงกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผิวหน้าด้านล่างหยาบและมีความพรุนมากกว่าด้านบน โครงสร้างของกระดาษด้านที่สัมผัสกับตะแกรงจึงซึมน้ำได้ดีกว่านั่นเอง

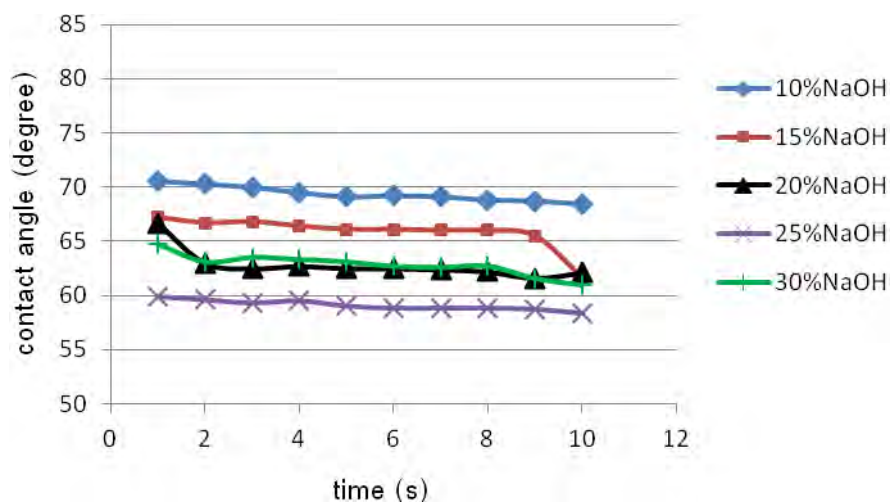
อย่างไรก็ตาม เมื่อดูผลปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อค่ามูมส์มัสของน้ำบนกระดาษ พบว่า มีแนวโน้มไม่ชัดเจนนัก และไม่สอดคล้องกับงานของ Apirakchaiskul และคณะ [3] ซึ่งพบว่าค่ามูมส์มัสของน้ำบนกระดาษลดลง เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อมากขึ้น ไซควิดินที่เคลือบผิวเส้นใยถูกกำจัดออกมากขึ้น ความต้านการซึมน้ำของกระดาษจึงลดลง

จากผลการทดลองยังพบว่าการขจัดความหึงงอของเส้นใยมีผลต่อค่ามูมส์มัสของน้ำบนกระดาษน้อยมาก ดังจะเห็นได้จากค่ามูมส์มัสของน้ำบนกระดาษด้านบนของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อ่อนก่อนขจัดความหึงงอของเส้นใยอยู่ในช่วง 65 ถึง 80 องศา (ภาพที่ 4-7) ขณะที่ค่ามูมส์มัสของน้ำบนกระดาษด้านบนของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อ่อนหลังขจัดความหึงงอของเส้นใยอยู่ในช่วง 70 ถึง 80 องศา (ภาพที่ 4-9) ซึ่งค่ามูมส์มัสที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่ค่ามูมส์มัสของน้ำบนกระดาษด้านล่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อ่อนก่อนขจัดความหึงงอของเส้นใยอยู่ในช่วง 55 ถึง 70 องศา (ภาพที่ 4-8) และค่ามูมส์มัสของน้ำบน

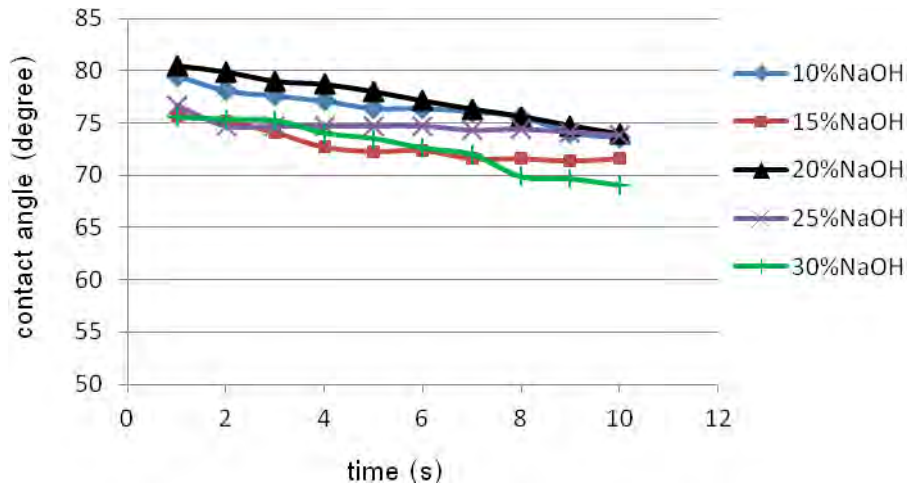
กระดาษด้านล่างของแผ่นทดสอบที่ผลิตจากเยื่อหนุ่นหลังจัดความหึงของเส้นใยอยู่ในช่วง 58 ถึง 65 องศา (ภาพที่4-10) ซึ่งค่ามุมสัมผัสที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนักเช่นกัน



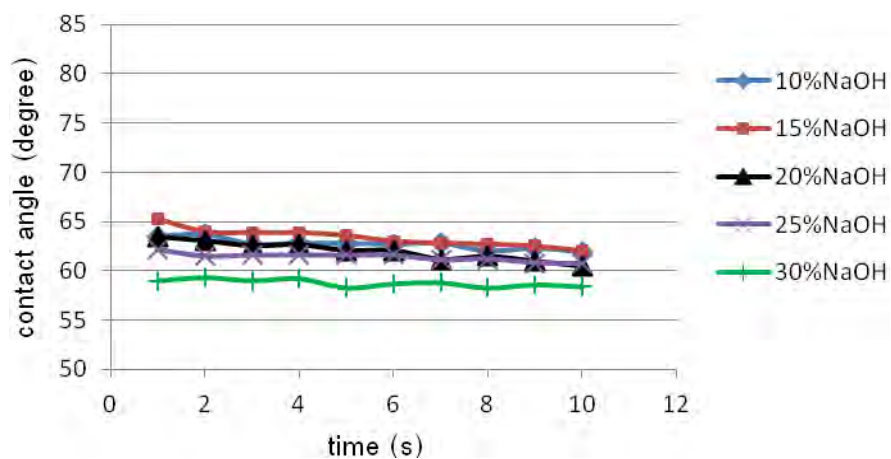
ภาพที่ 4-7 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษด้านบนที่ผลิตจากเยื่อหนุ่นก่อนการจัดความหึงของเส้นใย



ภาพที่ 4-8 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษด้านล่างที่ผลิตจากเยื่อหนุ่นก่อนการจัดความหึงของเส้นใย



ภาพที่ 4-9 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษด้านบนที่ผลิตจากเยื่อหนุ่นหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย



ภาพที่ 4-10 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษด้านล่างที่ผลิตจากเยื่อหนุ่นหลังการขจัดความหึงงอของเส้นใย

4.1.10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อหนุ่นที่ผลิตด้วยวิธีโซดา ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Anova แบบ single factor ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha=0.05$) ดังแสดงผลในตารางที่ 4-2 และตารางที่ 4-4 โดยผลทางสถิตินั้นสามารถพิจารณา

ได้จาก P-value และ ค่า F_{cal} กล่าวคือ ถ้า P-value นั้นมีค่าต่ำกว่า 0.05 และหากค่า F_{cal} นั้นมีมากกว่าค่า F_{crit} แสดงว่า ผลของสมบัติของเยื่อมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หรือปริมาณไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้มีอิทธิพลต่อสมบัติของเยื่อนั้น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากการทดลองพบว่าการใช้ปริมาณไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อที่ระดับต่าง ๆ มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นในกรณีของผลผลิตเยื่อและคัปปานัมเบอร์ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยดูได้จาก P-value ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 รวมถึงดูได้จากค่า F ซึ่งค่า F_{cal} มีค่ามากกว่าค่า F_{crit}

ผลของปริมาณไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อและการขจัดความหึงงอของเส้นใยที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของเส้นใยและแผ่นทดสอบ ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Anova แบบ Two factor with replication ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงผลในตารางที่ 4-6 และตารางที่ 4-7 โดยผลทางสถิตินั้นสามารถพิจารณาได้จาก P-value และ ค่า F_{cal} กล่าวคือ ถ้า P-value นั้นมีค่าต่ำกว่า 0.05 และหากค่า F_{cal} นั้นมีมากกว่าค่า F_{crit} แสดงว่าตัวแปรดังกล่าวมีผลต่อสมบัติที่ทำการวิเคราะห์ทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งในกรณีนี้ตัวแปรที่เป็นตัวแปรหลัก ได้แก่ ปริมาณไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ และการขจัดความหึงงอของเส้นใย นอกจากนี้ยังมีส่วนของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหลักสองตัวนี้อีกด้วย โดยทั่วไปแล้ว หากตัวแปรหลักไม่มีผลต่อสมบัติที่ทำการวิเคราะห์หรืออย่างมีนัยสำคัญ ย่อมส่งผลให้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหลักไม่มีผลต่อสมบัติที่ทำการวิเคราะห์หรืออย่างมีนัยสำคัญ

จากการทดลองพบว่าปริมาณไซโตเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นในกรณีของดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกและความทึบแสงที่ปริมาณไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ปริมาณไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ยังไม่มีผลต่อมิติของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแทบทุกรายการ ยกเว้นในกรณีของปริมาณเส้นใยขนาดเล็กที่ปริมาณไซโตเดียมไฮดรอกไซด์มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนผลของการขจัดความหึงงอของเส้นใยต่อสมบัติของแผ่นทดสอบและมิติของเส้นใยนั้น พบว่า การขจัดความหึงงอของเส้นใยส่งผลต่อลักษณะของแผ่นทดสอบ คือ ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุและค่าความทึบแสงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนสมบัติอื่น ๆ ของแผ่นทดสอบและมิติของเส้นใย พบว่า การขจัดความหึงงอของเส้นใยไม่มีผลต่อสมบัติดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไซโตเดียมไฮดรอกไซด์กับการขจัดความหึงงอของเส้นใยส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความหนาแน่นของแผ่นทดสอบเท่านั้น

4.1.11 ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่ออ่อนด้วยวิธีโซดา

จากผลการทดลองข้างต้น ซึ่งเป็นการศึกษาถึงผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่ออ่อนด้วยวิธีโซดา (ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10, 15, 20, 25 และ 30 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น) และผลการขจัดความหึงงอของเส้นใยของเยื่ออ่อนหลังจากผ่านการบดเยื่อ ที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อและแผ่นกระดาษที่ผลิตได้จากเยื่ออ่อนด้วยวิธีการผลิตแบบโซดา พบว่า ทั้งปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อและการขจัดความหึงงอของเส้นใย หลังจากการบดเยื่อมีผลต่อสมบัติของเยื่อและขั้นตอนสอบอย่างมา การขจัดความหึงงอของเส้นใยหลังจากการบดเยื่อมีผลทำให้สมบัติต่าง ๆ ส่วนใหญ่ของเยื่อและกระดาษดีขึ้น ขณะที่ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกที่ดีที่สุด พร้อมกับให้ค่าคัปปานัมเบอร์ต่ำกว่าภาวะอื่น ๆ ส่วนการต้มเยื่อที่ระดับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงกว่าร้อยละ 20 เริ่มทำให้ผลผลิตเยื่อมีแนวโน้มลดลง และเริ่มมีปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อมากขึ้นไป ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองสารเคมี ดังนั้นด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงเลือกภาวะการต้มเยื่อโดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 และการขจัดความหึงงอของเส้นใยหลังการบดเยื่อ เป็นการทดลองควบคุมหรือภาวะควบคุมของการทดลองขั้นตอนต่อไป

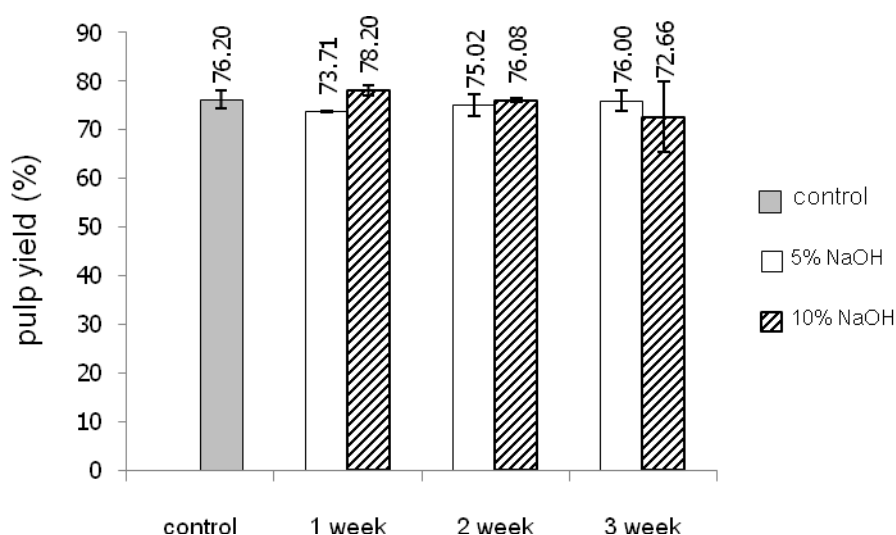
4.2 ผลการปรับปรุงสภาพเส้นใยนุ่นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา

ผลการทดลองในข้อ 4.2 นี้เป็นผลการทดลองตอนที่ 2 การปรับปรุงสภาพเส้นใยนุ่นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา โดยในขั้นตอนนี้มี การปรับปรุงสภาพเส้นใยนุ่นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น และใช้เวลาในการปรับปรุงสภาพ 1, 2 และ 3 สัปดาห์ ตามลำดับ จากนั้นนำเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับปรุงสภาพแล้วมาต้มเยื่อด้วยวิธีโซดา โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อ ร้อยละ 20 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น และใช้ภาวะการต้มเยื่อเดิมคือ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที จากนั้นนำเยื่อมาขจัดความหึงงอของเส้นใย ทดสอบสมบัติของเยื่อและปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ นำเยื่อที่ได้มาขึ้นแผ่นทดสอบ แล้วทำการทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ ทั้งนี้เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของการปรับปรุงสภาพเส้นใยนุ่นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ การอภิปรายผลในตอนนี้จะเริ่มจากการอภิปรายผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสภาพต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษ เปรียบเทียบกับภาวะที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ หากแต่เส้นใยนุ่นผ่านการแช่น้ำ 3 สัปดาห์ ก่อนนำมาผลิตเป็นเยื่ออ่อนโดยวิธีแบบโซดา ซึ่งภาวะที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นหาได้จากภาวะที่ดีที่สุดของ

การทดลองตอนที่ 1 โดยจะใช้ภาวะการผลิตเยื่อนี้เป็นการทดลองควบคุม (control) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากแหล่งที่มาของเส้นใยุ่นที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 2 นี้ ไม่ใช่แหล่งเดียวกันกับเส้นใยุ่นในการทดลองตอนที่ 1 ดังนั้นจึงได้มีการผลิตเยื่อโดยใช้ภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองตอนที่ 1 ขึ้นมาใหม่ เพื่อใช้เป็นการทดลองควบคุมสำหรับการทดลองตอนที่ 2 รวมถึงการทดลองตอนที่ 3 และการทดลองตอนที่ 4

4.2.1 ผลผลิตเยื่อ

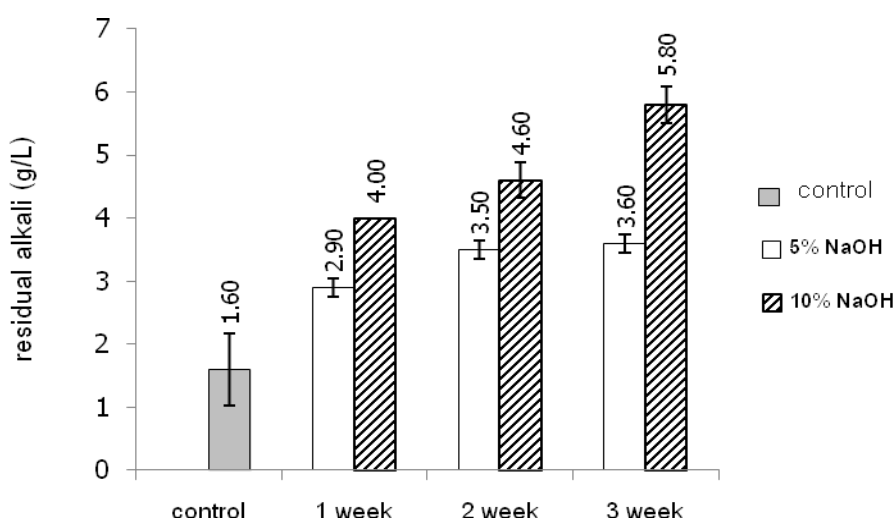
การปรับสภาพของเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนจะนำไปต้มด้วยวิธีโซดานั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการปรับสภาพเส้นใยคือ อาจมีผลทำให้ผลผลิตเยื่อหลังต้มลดลง และยังเมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับสภาพมากขึ้น ก็จะทำให้ผลผลิตเยื่อลดลงมาก เพราะการปรับสภาพเส้นใยนั้นจะช่วยเปิดผิวหน้าของเส้นใย ละลายลิกนิน ไซควิติน และสารแทรกที่ผิวเส้นใย ทำให้เส้นใยมีความสามารถในการรับสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อได้ดีขึ้น ปฏิกริยาเกิดมากขึ้น ผลผลิตที่ได้จึงอาจลดลง อย่างไรก็ตาม จากภาพที่ 4-11 พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพมีผลต่อผลผลิตเยื่อน้อยมาก นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 4-8 ยังแสดงว่า ทั้งปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยุ่น เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยุ่น และปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองนี้ไม่ส่งผลต่อผลผลิตเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแต่อย่างใด



ภาพที่ 4-11 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยุ่นต่อผลผลิตเยื่อ

4.2.2 ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อ

ภาพที่ 4-12 แสดงผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มที่มีต่อปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อ จะเห็นได้ว่า การปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้มีปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อสูงกว่าภาวะควบคุม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการปรับสภาพเส้นใยด้วยต่างเป็นการเปิดผิวของเส้นใย ทำให้ไซควิตินและสารแทรกต่าง ๆ บนผิวของเส้นใยหลุดออก นอกจากนี้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยอาจเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยในช่วงก่อนต้มเยื่อด้วย ดังนั้นจึงส่งผลให้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อลดน้อยลง ปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะเห็นว่าการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 มีปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อมากกว่าเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 ในการปรับสภาพ และเมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพเส้นใยนานขึ้น ปริมาณต่างที่เหลือหลังการต้มเยื่อมีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย แสดงว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ไปในระหว่างการต้มเยื่อลดลง

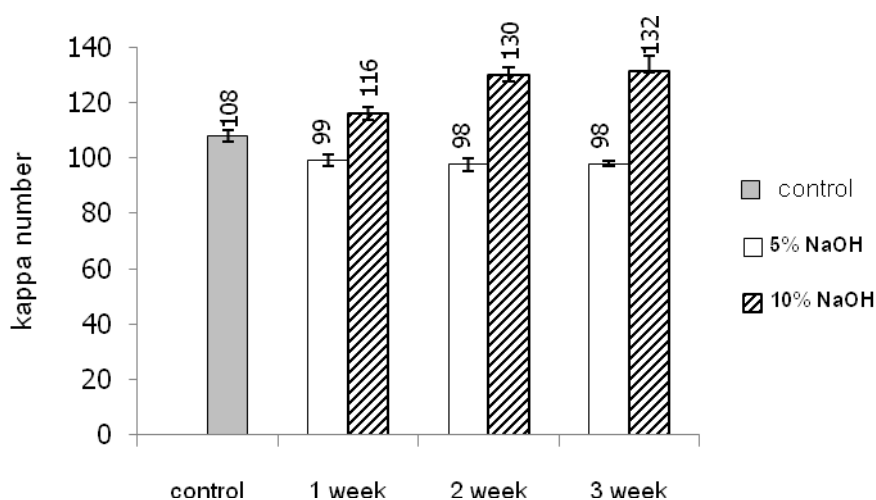


ภาพที่ 4-12 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อ

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-8 พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่ม และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่ม รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มกับเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่ม มีผลต่อปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05

4.2.3 ค่าดัชนีเคป้า

ภาพที่ 4-13 แสดงผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มที่มีต่อค่าดัชนีเคป้า ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณลิกนินในเยื่อ พบว่า เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับสภาพเส้นใยในปริมาณต่ำ ค่าดัชนีเคป้าที่ได้จะต่ำกว่าภาวะควบคุม อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณเพิ่มขึ้นและเวลาในการปรับสภาพเส้นใยนานขึ้น กลับทำให้ค่าดัชนีเคป้าสูงขึ้น ซึ่งไม่เป็นไปตามที่คาดหมาย เพราะการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ควรทำให้เส้นใยทำปฏิกิริยากับสารต้มเยื่อได้ดีขึ้น ปริมาณลิกนินในเยื่อควรน้อยลง แต่ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่า โซลิวชันที่เคลือบอยู่บนผิวของเส้นใยละลายออกมาได้ง่ายมากขึ้นระหว่างการต้มเยื่อด้วยวิธีโซดา และโซลิวชันอาจจะรบกวนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเพอร์มังกาเนตที่ใช้ในการหาค่าดัชนีเคป้ากับลิกนิน ค่าดัชนีเคป้าที่หาได้จึงสูงขึ้น



ภาพที่ 4-13 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อค่าดัชนีเคป้า

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางที่ 4-8 แสดงว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่ม เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่ม และผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองนี้ ส่งผลต่อค่าดัชนีเคป้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05

ตารางที่ 4-8 ผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้ไซโตียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อ

pulp properties	A			B			A*B		
	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}
yield	0.7057	0.1569	5.9873	0.7681	0.2758	5.1432	0.2972	1.4953	5.1432
kappa number	1.1E-06*	384.4258	5.9873	0.0108*	10.5638	5.1432	0.0054*	14.0603	5.1432
residual alkali	2.3E-05*	138.326	5.9873	0.0006*	33.5078	5.1432	0.0171*	8.6395	5.1432

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

4.2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ

ไฮโดรเซลลูโลส เป็นผลรวมของแอลฟาเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส จากการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนการต้มเยื่อ ส่งผลให้ปริมาณลิกนินในเยื่อมีแนวโน้มลดลง ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลง ในขณะที่แอลฟาเซลลูโลสมีค่ามากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตเยื่อแบบโซดาที่ไม่มีการปรับสภาพเส้นใย ดังแสดงในตารางที่ 4-9 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการปรับสภาพของเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้สารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้มากขึ้น ลิกนินจึงถูกขจัดออกไปมาก ขณะที่ในส่วนของเฮมิเซลลูโลสซึ่งมีโครงสร้างไม่แข็งแรงเมื่อเปรียบเทียบกับเซลลูโลสก็ถูกทำลายได้ง่ายขึ้น ในขณะที่ส่วนของแอลฟาเซลลูโลสไม่ถูกทำลายด้วยการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ การใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นและใช้เวลาในการปรับสภาพนานขึ้น ยิ่งส่งผลต่อการลดลงของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส รวมถึงการเพิ่มขึ้นของเซลลูโลส

ตารางที่ 4-9 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่นต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อนุ่น

NaOH pretreatment		chemical composition			
NaOH (%)	time (week)	lignin (%)	holo cellulose ^{1,2} (%)	α -cellulose ³ (%)	hemi cellulose (%)
0 ⁴	3 ⁴	22.17±0.35	74.57±0.34	66.47±0.06	8.1 ±0.28
5	1	20.20±0.61	75.80±1.15	70.52±1.47	5.28±2.62
	2	20.04±0.23	75.23±0.30	70.73±0.25	4.50±0.04
	3	20.06±0.21	75.64±1.07	71.52±0.47	4.12±1.55
10	1	19.32±0.05	76.86±0.47	72.52±0.57	4.34±1.05
	2	19.90±0.74	76.38±0.16	72.98±0.73	3.40±0.57
	3	19.30±0.16	75.92±0.13	72.48±0.05	3.44±0.18

หมายเหตุ 1. holo cellulose คือ ผลรวมของ α -cellulose กับ hemi cellulose 2. รั้อยละ holo cellulose คิดเทียบกับน้ำหนักวัตถุดิบเริ่มต้น 3. รั้อยละ α -cellulose คิดเทียบกับน้ำหนักของ holo cellulose 4. ภาวะควบคุม คือ 0%NaOH และแช่เส้นใยนุ่นในน้ำประปา 3 สัปดาห์

ตารางที่ 4-10 ผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้ไซโตเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่มีต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่ออ่อน

chemical composition	A			B			A*B		
	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}
lignin	0.0480*	6.1369	5.9874	0.6340	0.4922	5.1432	0.4484	0.9194	5.1432
holo cellulose	0.0821	4.3510	5.9874	0.4879	0.8108	5.1432	0.6363	0.4880	5.1432
α-cellulose	0.0067*	16.3844	5.9874	0.6629	0.4406	5.1432	0.4749	0.8453	5.1432
hemi cellulose	0.2841	1.3829	5.9874	0.5431	0.6770	5.1432	0.9755	0.0249	5.1432

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

ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Anova แบบ two factor ในตารางที่ 4-10 แสดงให้เห็นว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อปริมาณลิกนินและปริมาณแอลฟาเซลลูโลสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ในขณะที่เวลาในการปรับสภาพของเส้นใยไม่ส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ ส่วนผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างการปรับสภาพเส้นใยนุ่นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเวลาปรับสภาพเส้นใยนุ่นในการผลิตเยื่อต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ พบว่า ไม่ได้มีผลอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

4.2.5 คุณภาพและมิติของเส้นใย

การวิเคราะห์คุณภาพและลักษณะมิติของเส้นใยดังแสดงในตารางที่ 4-11 เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับสภาพเส้นใย พบว่า ความยาวเส้นใยแบบ LWW และความกว้างของเส้นใยลดลงเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม เพราะการปรับสภาพเส้นใยส่งผลให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นสารต้มเยื่อสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับละลายลิกนินและทำลายเฮมิเซลลูโลสทำให้เส้นใยสั้นลง เส้นใยอาจเกิดการยุบตัวมากขึ้น ความกว้างของเส้นใยจึงลดลง ขณะที่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กและดัชนีความหึงของของเส้นใยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม เมื่อเปรียบเทียบการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 และ ร้อยละ 10 พบว่า ความกว้างของเส้นใยลดลงเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำลายผนังเส้นใยทำให้ความกว้างของผนังเส้นใยลดลง ขณะที่เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้มข้นขึ้นในการปรับสภาพเส้นใย ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เพราะโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพอาจทำให้โซลิดิตินที่เคลือบบนผิวของเส้นใยหลุดออกมากขึ้น เส้นใยมีการดูดซึมน้ำและสารเคมีได้ดีขึ้นขณะต้มเยื่อเนื่องจากผิวหน้าของเส้นใยเปิด ทำให้เมื่อนำเยื่อไปอบบริเวณผิวหน้าของเส้นใยจะมีการหลุดออกเป็นเส้นใยขนาดเล็กและเส้นใยแตกแขนงเป็นเส้นใยขนาดเล็กได้ง่ายขึ้น จึงทำให้มีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเกิดขึ้นมาก เมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพเส้นใยนานขึ้นทั้งภาวะที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ส่งผลให้ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้นและความกว้างของเส้นใยมีแนวโน้มลดลง

การวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้วิธี Anova แบบ two factor ดังแสดงผลไว้ในตาราง 4-12 พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก และความกว้างของเส้นใย อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่เวลาปรับสภาพของเส้นใยส่งผลต่อลักษณะของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญเฉพาะปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก และความกว้างของเส้นใยเท่านั้น ส่วนผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่น พบว่า ไม่ส่งผลต่อมิติของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นความยาวเส้นใยแบบ

LWW และความกว้างของเส้นใย เท่านั้นที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4-11 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อคุณภาพและมิติของเส้นใย

NaOH pretreatment		fiber characteristic				
NaOH (%)	time (week)	LWW fiber length(mm)	finer content (%)	curl index	kink index	fiber width(μ m)
0	3	2.600 \pm 0.15	22.49 \pm 1.30	0.113 \pm 0.01	1.320 \pm 0.07	14.73 \pm 0.24
5	1	2.331 \pm 0.15	21.28 \pm 1.18	0.109 \pm 0.00	1.371 \pm 0.06	14.40 \pm 0.10
	2	2.106 \pm 0.05	22.42 \pm 0.97	0.098 \pm 0.00	1.305 \pm 0.04	14.04 \pm 0.12
	3	2.351 \pm 0.05	24.19 \pm 1.21	0.103 \pm 0.00	1.310 \pm 0.05	14.03 \pm 0.21
10	1	2.342 \pm 0.11	22.22 \pm 0.22	0.104 \pm 0.00	1.412 \pm 0.02	14.21 \pm 0.06
	2	2.285 \pm 0.09	23.48 \pm 1.22	0.100 \pm 0.01	1.415 \pm 0.06	13.57 \pm 0.09
	3	2.166 \pm 0.05	25.38 \pm 0.85	0.100 \pm 0.00	1.482 \pm 0.04	13.38 \pm 0.05

หมายเหตุ ภาวะควบคุม คือ 0%NaOH แช่เส้นใยนุ่มในน้ำประปา 3 สัปดาห์

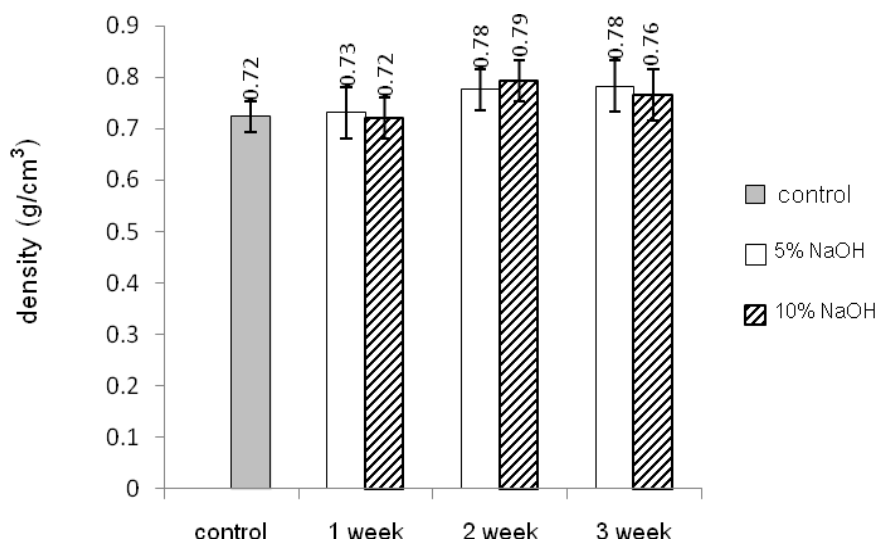
ตารางที่ 4-12 ผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้ไซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่มีต่อมิติของเส้นใย

fiber characteristic	A			B			A*B		
	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}
LWW fiber length	0.9681	0.0017	5.9874	0.0752	4.1061	5.1432	0.0273*	6.9617	5.1432
finer content	0.0328	7.6198	5.9874	0.0020*	20.9693	5.1432	0.9671	0.0336	5.1432
curl index	0.2070	2.0000	5.9874	0.0983	3.5000	5.1432	0.6297	0.5000	5.1432
kink index	0.4572	0.6311	5.9874	0.5411	0.6814	5.1432	0.3911	1.1022	5.1433
fiber width	0.0001*	72.0682	5.9874	0.0002*	52.8785	5.1432	0.0284*	6.8358	5.1432

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

4.2.6 ความหนาแน่นปรากฏ

ความหนาแน่นปรากฏของแผ่นทดสอบที่ได้จากเยื่อหนุ่นที่ปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังภาพที่ 4-14 พบว่า เมื่อปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม ทั้งนี้อาจเนื่องจากลิกนินถูกกำจัดออกจากเยื่อมากขึ้น ทำให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยของเยื่อดีขึ้น การที่ลิกนินถูกกำจัดออกไปนั้น เกิดจากการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นการเปิดผิวของเส้นใยทำให้สารที่เข้าสัมผัสเยื่อ (โซเดียมไฮดรอกไซด์) เข้าทำปฏิกิริยากับลิกนินได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยกลับส่งผลต่อความหนาแน่นอย่างไม่ชัดเจน ในขณะที่เมื่อใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยนานขึ้น ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยภาวะที่ปรับสภาพของเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5% นาน 2 หรือ 3 สัปดาห์ และภาวะที่ปรับสภาพของเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10% นาน 2 สัปดาห์ จะให้แผ่นทดสอบมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าที่ภาวะอื่น ๆ



ภาพที่ 4-14 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยหนุ่น ต่อความหนาแน่น

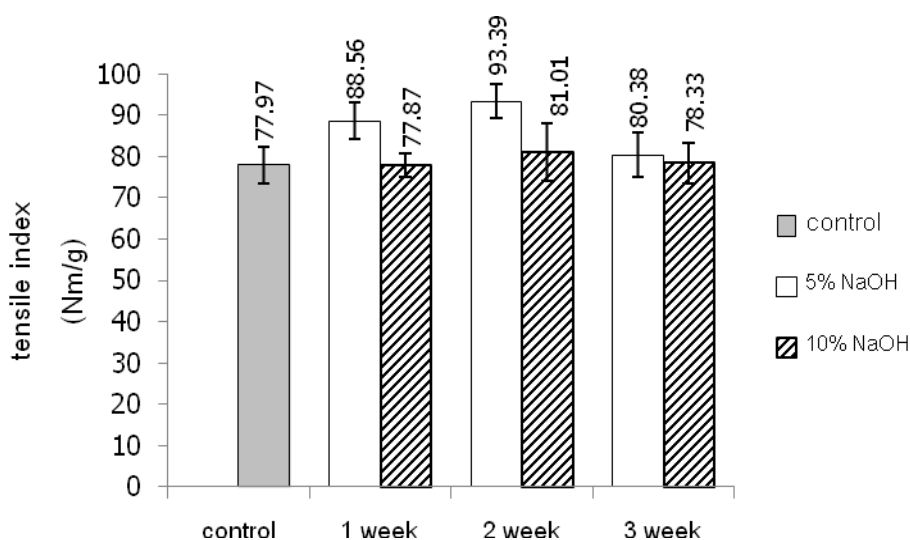
เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-13 เพื่อดูผลของการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีต่อความหนาแน่น จะเห็นว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยมีผลต่อค่าความหนาแน่นของแผ่น

ทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนั้น พบว่า ไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.7 สมบัติด้านความแข็งแรง

4.2.7.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

ภาพที่ 4-15 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากเส้นใยุ่นที่ผ่านการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากการทดลองพบว่า การปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณร้อยละ 5 ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าภาวะควบคุม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้น ไม่ได้ช่วยเอาไขควินที่เคลือบผิวเส้นใยออกเพียงอย่างเดียว หากแต่ยังละลายลิกนินออกไปด้วย ส่งผลให้มีสร้างพันธะกันระหว่างเส้นใยได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม ที่ภาวะการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 อาจเป็นการเปิดผิวหน้าของเส้นใยมากเกินไป โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่ออาจเข้าไปทำลายเฮมิเซลลูโลสมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยไม่ดี ความแข็งแรงจึงลดลง ส่วนผลเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพนั้น พบว่า การใช้เวลาในการปรับสภาพนานขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้เวลาในการปรับสภาพเยื่อนานเกินไป ความแข็งแรงต่อแรงดึงจะเริ่มลดลง



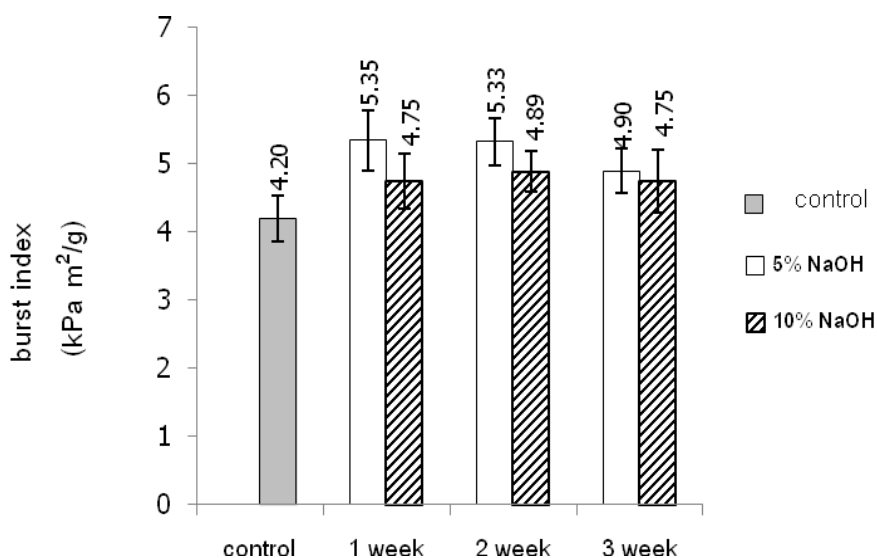
ภาพที่ 4-15 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยุ่นต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

จากการทดลองยังพบว่า ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุดเมื่อใช้ภาวะการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณร้อยละ 5 ระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใย 2 สัปดาห์ โดยมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเท่ากับ 93.39 Nm/g

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-13 พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใย ส่งผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจาก P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนั้น ไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ

4.2.7.2 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

ผลที่ได้จากค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุนั้นมีแนวโน้มไปในทางทิศเดียวกับความแข็งแรงต่อแรงดึง ซึ่งอาศัยเรื่องพันธะของเส้นใยในด้านความแข็งแรงเช่นเดียวกับความแข็งแรงต่อแรงดึง การปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงกว่าภาวะควบคุม การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 ให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงกว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 การใช้เวลาในการปรับสภาพเยื่อขนานเกินไปมีแนวโน้มทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุลดลง



ภาพที่ 4-16 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยขนานต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

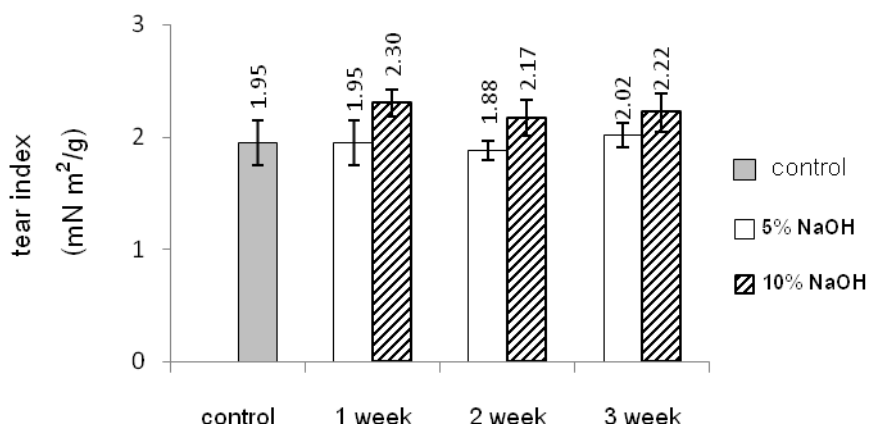
ฉะนั้น การปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณและเวลาที่มากเกินไป ส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายด้วยต่าง โดยการตัดส่วนปลายของสายเฮมิเซลลูโลส ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า peeling reaction ทำให้สายโซ่ของเฮมิเซลลูโลสสั้นลง จึงเป็นผลทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลงและส่งผลถึงการลดลงของความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุด้วย

จากการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-13 พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย ระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใย และปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง ไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.2.7.3 ความแข็งแรงต่อแรงฉีก

ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกขึ้นอยู่กับความแข็งแรงเดี่ยว ๆ ของเส้นใยมากกว่าพันธะของเส้นใย จากผลการทดลองในภาพที่ 4-17 แสดงให้เห็นว่า การปรับสภาพเส้นใยนุ่นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีแนวโน้มสูงกว่าเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม โดยเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่ามากกว่าการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณมากในการปรับสภาพของเส้นใย อาจทำให้คาร์โบไฮเดรตโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของเฮมิเซลลูโลสถูกทำลาย ส่งผลให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลง ส่วนปริมาณแอลฟาเซลลูโลสเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4-9) ด้วยเหตุนี้จึงอาจทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงมากขึ้น ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกจึงสูงขึ้น

จากการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงผลในตารางที่ 4-13 พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยส่งผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกค่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ ไม่มีผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



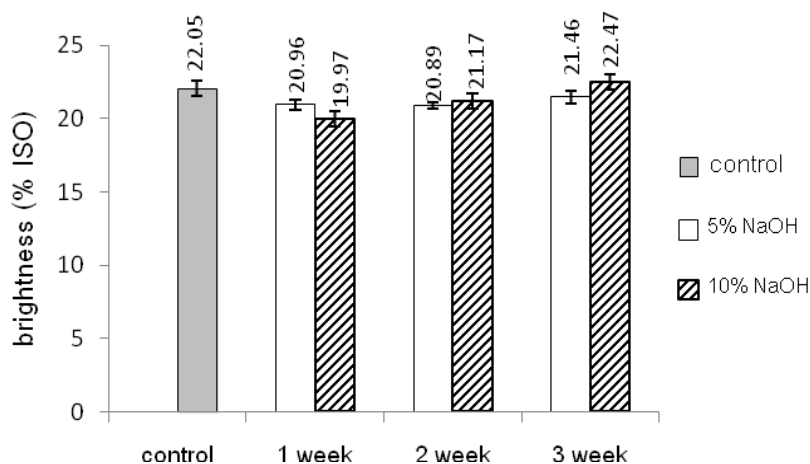
ภาพที่ 4-17 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่ม
ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก

4.2.8 สมบัติด้านทัศนศาสตร์

4.2.8.1 ความขาวสว่าง

ภาพที่ 4-18 แสดงค่าความขาวสว่างของแผ่นทดสอบที่ได้ พบว่า ค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนการต้มเยื่อด้วยส่วใหญ่มีค่าต่ำกว่าภาวะควบคุมเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก alkali darkening ส่วนการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกันให้ค่าความขาวสว่างของชิ้นแผ่นทดสอบไม่ต่างกัน ขณะที่การใช้เวลาปรับสภาพเส้นใยนานขึ้นส่งผลให้ค่าความขาวสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะโซลิวชันที่เคลือบผิวเส้นใยอาจถูกกำจัดออกด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้มาก ทำให้สารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยนุ่มได้ดีขึ้น จึงสามารถขจัดลิกนินออกจากเส้นใยได้มาก เยื่อจึงขาวสว่างขึ้น จากการทดลองยังพบว่าภาวะที่ปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ ให้ค่าความขาวสว่างที่สูงสุดโดยมีค่า $22.47 \pm 0.51\% \text{ISO}$

จากการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-13 พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย ไม่ส่งผลต่อความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย ส่งผลต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

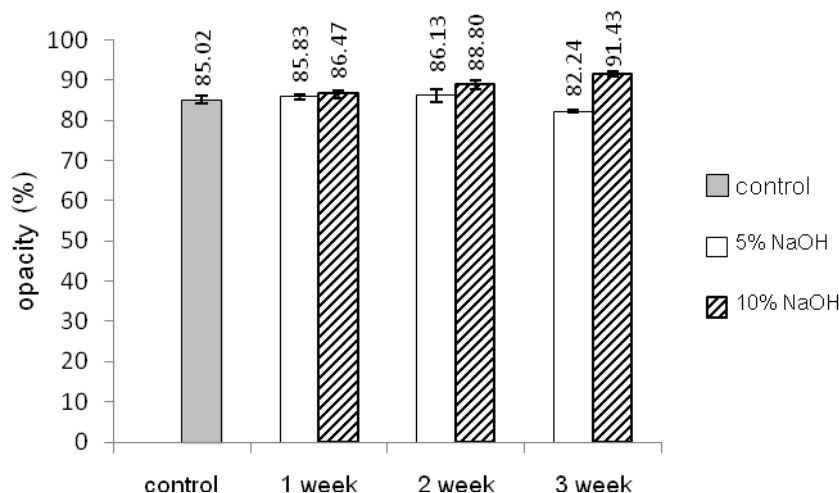


ภาพที่ 4-18 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยขนุน ต่อความขาวสว่าง

4.2.8.2 ความทึบแสง

ภาพที่ 4-19 แสดงผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยขนุนก่อนต้มเยื่อด้วยวิธีโซดาต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบ พบว่า การปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มทำให้ค่าความทึบแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุมเพียงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนั้น พบว่า ถ้าใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น จากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 10 ค่าความทึบแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้เวลาปรับสภาพเส้นใยมากขึ้น ค่าความทึบแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน เพราะปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นและเวลาปรับสภาพเส้นใยนานขึ้น ทำให้มีปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก ๆ เพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4-11) เส้นใยขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวมากจะช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสงภายในกระดาษขึ้นทดสอบทำให้ความทึบแสงเพิ่มขึ้นนั่นเอง

จากการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-13 พบว่า ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยและระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย ส่งผลต่อค่าความทึบแสงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเวลาปรับสภาพเส้นใยขนุนไม่ส่งผลต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ

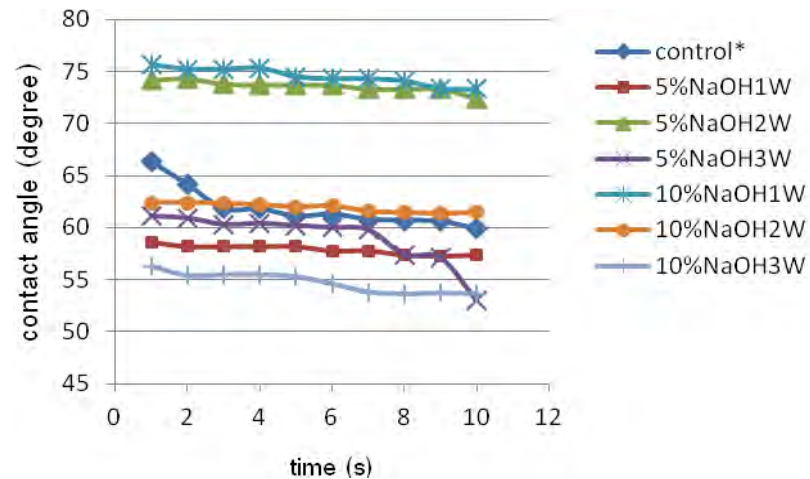


ภาพที่ 4-19 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อความทึบแสง

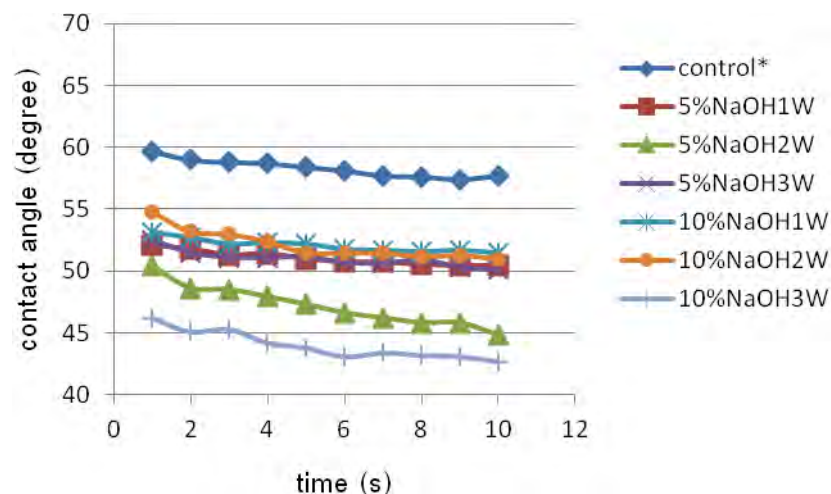
4.2.9 มุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษ

ภาพที่ 4-20 แสดงผลของการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษที่ผลิตจากเยื่ออ่อน (ด้านบน) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า มุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษอยู่ในช่วง 50 ถึง 75 องศา ภาวะที่มีค่ามุมสัมผัสมากที่สุดคือ ภาวะการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 นาน 2 สัปดาห์ และภาวะการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 นาน 1 สัปดาห์ ซึ่งไม่เป็นไปตามคาดหมาย เนื่องจากการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ควรส่งผลทำให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษมีค่าน้อยลง เนื่องจากโซลิวติวิตีถูกทำลายมากขึ้นจากการปรับสภาพและการต้มเยื่อเนื่องจากสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อสามารถซึมเข้าทำปฏิกิริยากับลิกนินได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ภาวะอื่น ๆ ที่ปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ค่ามุมสัมผัสดูเหมือนมีแนวโน้มใกล้เคียงหรือต่ำกว่าภาวะควบคุม

ภาพที่ 4-21 แสดงผลของการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษที่ผลิตจากเยื่ออ่อน (ด้านล่าง) มุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษด้านล่างอยู่ในช่วง 43 ถึง 60 องศา ซึ่งมีค่าน้อยกว่ามุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษด้านบน แต่ทุกภาวะที่ปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่ามุมสัมผัสน้อยกว่าภาวะควบคุม เนื่องจากการปรับสภาพเส้นใยทำให้โซลิวติวิตีถูกทำลายได้ง่ายขึ้น ความไม่ชอบน้ำของเส้นใยนุ่มอาจน้อยลง



ภาพที่ 4-20 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่น
ต่อมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษด้านบน



ภาพที่ 4-21 ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่น
ต่อมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษด้านล่าง

4.2.10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

เมื่อนำค่าสมบัติต่าง ๆ ที่ทดสอบได้ของเยื่อ เส้นใย และแผ่นทดสอบที่ผลิตได้จากการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 ระดับคือ ร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น และระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใย คือ 1, 2 และ 3 สัปดาห์ มาวิเคราะห์ผลทางสถิติ ด้วยวิธี Anova แบบ Two factor with replication ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ

ละ 95 ($\alpha=0.05$) โดยค่า A คือ ผลของปริมาณไซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย ค่า B คือ ผลของเวลาปรับสภาพเส้นใย และค่า $A*B$ คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยกับระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใย โดยการพิจารณาความมีนัยสำคัญของตัวแปรต่อผลที่ได้ใช้เกณฑ์เดียวกับข้อ 4.1.10 กล่าวคือ พิจารณาจากค่า P-value และค่า F ของสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อและแผ่นทดสอบเป็นหลัก

จากการทดลองพบว่า ปริมาณไซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย ส่งผลต่อค่าค่าปรับปานัมเบอร์ ปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ ปริมาณลิกนิน ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก ความทึบแสง และความกว้างของเส้นใย อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha=0.05$) เนื่องจาก P-value นั้นมีค่าต่ำกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่ามากกว่าค่า F_{crit} ส่วนระยะเวลาที่ใช้ปรับสภาพเส้นใยนั้นส่งผลต่อค่าค่าปรับปานัมเบอร์ ปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ความขาวสว่าง ความทึบแสง ปริมาณเส้นใยขนาดเล็ก และความกว้างของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha=0.05$) ด้วยเหตุผลของค่า P และค่า F ดังที่กล่าวมาข้างต้น ส่วนผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไซเดียมไฮดรอกไซด์กับระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย พบว่า มีผลต่อค่าค่าปรับปานัมเบอร์ ปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ ความยาวเส้นใยแบบ LWW ความขาวสว่าง และความกว้างของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญ (P-value ต่ำกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่ามากกว่าค่า F_{crit})

4.2.11 ภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเส้นใยด้วยไซเดียมไฮดรอกไซด์

จากผลการทดลองข้างต้นในหัวข้อ 4.2 พบว่า ปริมาณไซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยและระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่เหมาะสมที่สุดคือ ปรับสภาพเส้นใยด้วยไซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักแห้ง นาน 2 สัปดาห์ เนื่องจากภาวะนี้ให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงที่สุด ค่าค่าปรับปานัมเบอร์ต่ำ อีกทั้งค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุและดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก มีค่าที่สามารถยอมรับได้เมื่อเทียบกับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อทางการค้า และมีปริมาณต่างที่เหลือหลังการต้มเยื่ออยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเยื่อกระดาษ [3]

ตารางที่ 4-13 ผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของแผ่นทดสอบ

paper properties	A			B			A*B		
	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}
density	0.8713	0.0286	5.9874	0.0040	15.8857	5.1432	0.4920	0.8000	5.1432
tensile index	0.0033*	22.0475	5.9874	0.0320*	6.4515	5.1432	0.1123	3.2182	5.1432
burst index	0.3582	0.9898	5.9874	0.4233	0.9955	5.1432	0.4209	1.0030	5.1432
tear index	0.0008*	39.5683	5.9874	0.2081	2.0622	5.1432	0.4463	0.9256	5.1432
brightness	0.6760	0.1927	5.9874	0.0040*	15.9498	5.1432	0.02591*	7.1388	5.1432
opacity	0.0060*	17.2145	5.9874	0.0034*	17.0103	5.1432	0.1897	2.2214	5.1432

หมายเหตุ A คือ ผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย B คือ ผลของระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใย A*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างการ
ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาในการปรับสภาพเส้นใย * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{\text{cal}} > F_{\text{crit}}$)

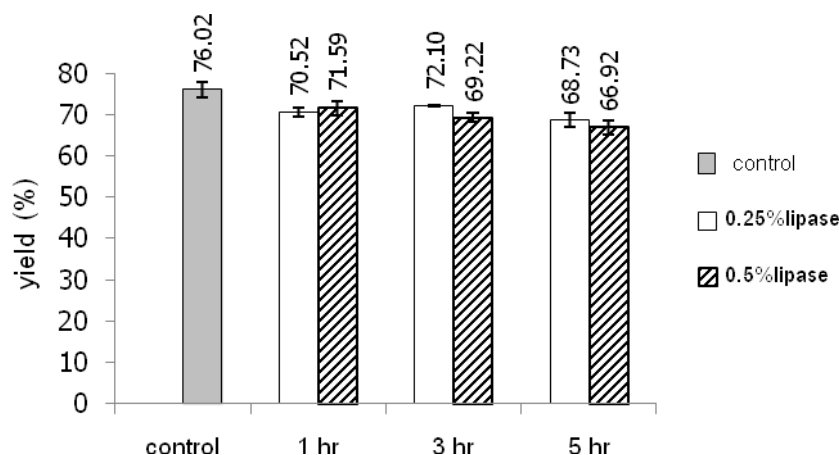
4.3 ผลการปรับสภาพเส้นใยุ่นด้วยเอนไซม์ไลเปสก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา

ผลการทดลองในหัวข้อ 4.3 นี้ เป็นผลการทดลองตอนที่ 3 ซึ่งเป็นการปรับสภาพเส้นใยุ่นด้วยเอนไซม์ไลเปสก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดา โดยทำการปรับสภาพเส้นใยุ่นด้วยเอนไซม์ไลเปสด้วยความเข้มข้นร้อยละ 0.25 และ 0.5 ของน้ำหนักแห้งของุ่น (250 LU/g และ 500 LU/g ของน้ำหนักแห้งของุ่น ตามลำดับ) และใช้เวลาในการปรับสภาพ 1,3 และ 5 ชั่วโมงสำหรับแต่ละความเข้มข้นของเอนไซม์ จากนั้นนำเส้นใยุ่นที่ผ่านการปรับสภาพแล้วมาทำการต้มเยื่อที่ภาวะเดิมคือ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ซึ่งเป็นค่าที่หาได้จากการทดลองตอนที่ 1 เมื่อต้มเยื่อเสร็จแล้ว นำเยื่อที่ได้มาผ่านการบดเยื่อ และทำการขจัดความหึงงอของเส้นใย ทดสอบสมบัติของเยื่อและปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ นำเยื่อที่ได้มาขึ้นแผ่นทดสอบแล้วทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ ทั้งนี้เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพเส้นใยุ่นด้วยเอนไซม์ไลเปส การอภิปรายผลในตอนนี้จะเริ่มจากการอภิปรายผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพต่อสมบัติของเยื่อและกระดาษ เปรียบเทียบกับภาวะที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส หากแต่เส้นใยุ่นผ่านการแช่น้ำ 3 สัปดาห์ ก่อนนำมาผลิตเป็นเยื่อุ่นโดยวิธีแบบโซดา ซึ่งภาวะที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเส้นใยุ่นด้วยเอนไซม์ไลเปสนั้นหาได้มาจากภาวะที่ดีที่สุดของการทดลองตอนที่ 1 โดยจะใช้ภาวะการผลิตเยื่อนี้เป็นการทดลองควบคุม (control) อย่างไรก็ตามเนื่องจากแหล่งที่มาของเส้นใยุ่นที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 2 นี้ ไม่ใช่แหล่งเดียวกันกับเส้นใยุ่นในการทดลองตอนที่ 1 ดังนั้นจึงได้มีการผลิตเยื่อโดยใช้ภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองตอนที่ 1 ขึ้นมาใหม่ เพื่อใช้เป็นการทดลองควบคุมสำหรับการทดลองตอนที่ 3 และการทดลองตอนที่ 4

4.3.1 ผลผลิตเยื่อ

จากผลการทดลองในภาพที่ 4-22 ซึ่งแสดงผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใยุ่นต่อผลผลิตเยื่อ พบว่า การปรับสภาพเส้นใยุ่นด้วยเอนไซม์ไลเปสทำให้ผลผลิตเยื่อลดลงเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเอนไซม์ไลเปสช่วยย่อยไขควิตินที่เคลือบผิวเส้นใย จึงช่วยเปิดผิวของเส้นใย ทำให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นสารต้มเยื่อสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้มากขึ้น และโซเดียมไฮดรอกไซด์อาจจะทำลายคาร์โบไฮเดรตในส่วนของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส จึงอาจทำให้ผลผลิตเยื่อลดลง เมื่อใช้เวลาปรับสภาพเส้นใยุ่นด้วยเอนไซม์ไลเปสเพิ่มขึ้น ผลผลิตเยื่อมีแนวโน้มลดลง ขณะที่ภาวะที่ใช้เอนไซม์ไลเปสปริมาณร้อยละ 0.25 เวลาปรับสภาพ 3 ชั่วโมง ให้ผลผลิตเยื่อมากที่สุด

จากการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงใน ตารางที่ 4-14 พบว่า การปรับสภาพเส้นใยด้วย เอนไซม์ไลเปสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ไม่ส่งผลต่อผลผลิตเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่เวลาปรับสภาพเส้นใย ส่งผลต่อผลผลิตเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ ส่วนผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ เอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนั้นไม่ส่งผลต่อผลผลิตเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ

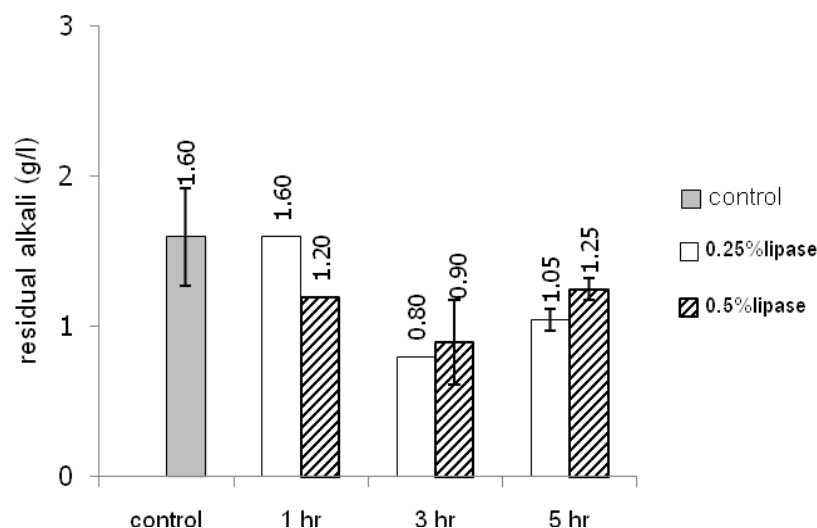


ภาพที่ 4-22 ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อผลผลิตเยื่อ

4.3.2 ปริมาณต่างเหลือหลังจากต้มเยื่อ

ภาพที่ 4-23 แสดงผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใยนุ่ม ก่อนต้มเยื่อด้วยวิธีโซดาต่อปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อ พบว่า เมื่อใช้เอนไซม์ไลเปสในการปรับสภาพเส้นใยส่งผลให้ปริมาณต่างเหลือหลังจากต้มเยื่อลดลงเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม แสดงว่าการปรับสภาพด้วยไลเปสอาจช่วยให้เส้นใยเกิดการเปิดผิวได้มาก โซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารต้มเยื่อจึงอาจเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ง่ายและมากขึ้น เมื่อพิจารณาปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยต่อปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไลเปสต่ำและเวลาปรับสภาพเส้นใยสั้น ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไลเปสสูงและเวลาปรับสภาพเส้นใยนานขึ้น ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม ภาวะที่ใช้เอนไซม์ไลเปสปริมาณร้อยละ 0.25 เวลาปรับสภาพเส้นใย 3 ชั่วโมง มีปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อต่ำที่สุด

การวิเคราะห์ผลทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-14 พบว่า ปริมาณเอนไซม์ไลเปส ระยะเวลา ปรับสภาพเส้นใย และปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง ส่งผลต่อปริมาณค่าที่เหลือหลังจากต้ม เยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากค่า P-value มีค่าต่ำกว่า 0.05

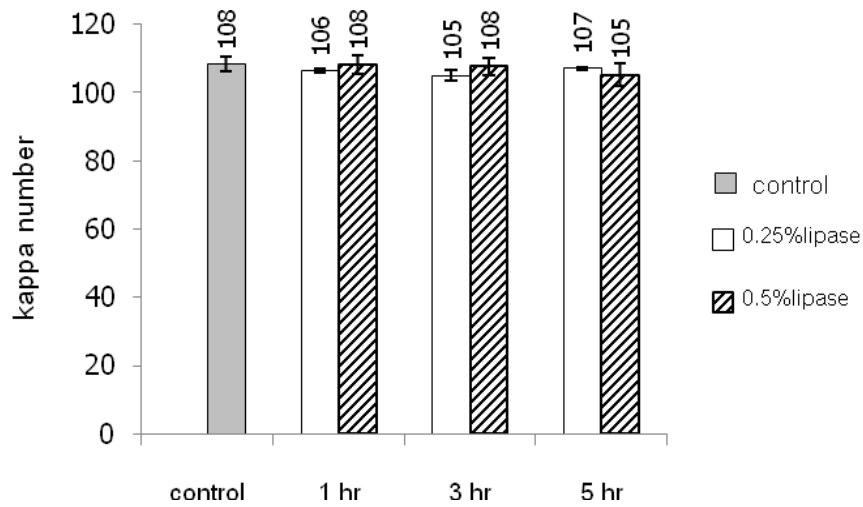


ภาพที่ 4-23 ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนุ่ม ต่อปริมาณค่าที่เหลือหลังจากต้มเยื่อ

4.3.3 ค่าคัปานัมเบอร์

ผลการทดลองในภาพที่ 4-24 ซึ่งแสดงผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลา ปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อค่าคัปานัมเบอร์ พบว่า การปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสมีผลให้ ค่าคัปานัมเบอร์ลดลงเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม เมื่อใช้เอนไซม์ไลเปสปริมาณต่ำ ค่าคัปานัมเบอร์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเอนไซม์ไลเปสช่วยย่อยไขควิดินที่เคลือบผิวเส้นใยได้ อย่างไรก็ตาม การใช้เอนไซม์ไลเปสในปริมาณมากกลับมีแนวโน้มส่งผลให้ค่าคัปานัมเบอร์มีแนวโน้มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า การใช้ปริมาณไลเปสสูงจะเกิดปฏิกิริยาได้ดี การเปิดผิวหน้าของเส้นใยอาจมากขึ้น ทำให้สารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ดีขึ้น ลิกนินและสารแทรกต่าง ๆ ละลายออกมาได้มากขึ้น ซึ่งอาจจะรบกวนการทำปฏิกิริยาระหว่างเพอร์มังกานเนตกับลิกนินในเยื่อ ได้ จึงอาจส่งผลให้ค่าคัปานัมเบอร์เพิ่มขึ้น ดังที่ได้เคยอภิปรายไว้ในข้อ 4.2.3

ฉะนั้น จากผลของค่าคัปานัมเบอร์และผลผลิตเยื่อ ชี้ให้เห็นว่า เอนไซม์ไลเปสที่ใช้ ปรับสภาพเส้นใยจะเข้าทำปฏิกิริยากับไขควิดินที่เคลือบผิวหน้าของเส้นใยและทำให้ผิวหน้าเส้นใย เปิดและสามารถรับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารต้มเยื่อได้ง่ายขึ้น



ภาพที่ 4-24 ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อค่าปทานัมเบอร์

จากการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4-14 พบว่า ทั้งการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และเวลาปรับสภาพเส้นใย ไม่ส่งผลต่อค่าปทานัมเบอร์อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างการปรับสภาพเส้นใยนุ่มด้วยเอนไซม์ไลเปสกับเวลาปรับสภาพเส้นใยนุ่มในการผลิตเยื่อแบบวิธีโซดาไม่ส่งผลต่อผลผลิตเยื่ออย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน

ตารางที่ 4-14 ผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้เอนไซม์ไลเปสและระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่มีต่อสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อ

pulp properties	A			B			A*B		
	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}
yield	0.1303	3.0696	5.9874	0.0166*	8.7602	5.1432	0.1281	2.9514	5.1432
kappa number	0.4213	0.7445	5.9874	0.6568	0.4512	5.1432	0.2468	1.7829	5.1432
residual alkali	2.3E-05*	138.3260	5.9874	0.0006*	33.5078	5.1432	0.0171*	8.6395	5.1432

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

4.3.4 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4-15 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเยื่ออ่อนเมื่อปรับสภาพเส้นใยอ่อนด้วย เอนไซม์ไลเปสก่อนนำไปผลิตเป็นเยื่อด้วยวิธีโซดา จากผลการทดลองพบว่า การปรับสภาพเส้นใยด้วย เอนไซม์ไลเปสส่งผลให้ปริมาณลิกนินในเยื่อลดลงเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม เมื่อพิจารณาถึงปริมาณ เอนไซม์ไลเปสเพียงอย่างเดียว โดยปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 0.25 เป็นร้อยละ 0.5 ส่งผลให้ปริมาณลิกนินมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเอนไซม์ไลเปส ทำปฏิกิริยากับไซควิตินบนผิวหน้าของเส้นใย ซึ่งจะทำให้ผิวหน้าเส้นใยเปิดมากขึ้น ในระหว่างการต้ม เยื่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นสารต้มเยื่อจึงสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยในส่วนของลิกนินได้มาก ขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณแอลฟาเซลลูโลสลดลงเมื่อปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสใน ปริมาณที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4-15 ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยอ่อนต่อองค์ประกอบ ทางเคมีของเยื่ออ่อน

lipase pretreatment		chemical composition			
lipase dosage (%)	time (hour)	lignin (%)	holo cellulose ^{1,2} (%)	α -cellulose ³ (%)	hemi cellulose (%)
0 ⁴	0 ⁴	22.17 ±0.5	74.57±0.34	66.47±0.06	8.10±0.28
0.25	1	19.38±0.21	75.17±0.01	66.78±1.70	8.39±1.71
	3	19.52±0.23	75.08±0.18	66.27±1.37	8.81±1.20
	5	19.11±0.23	75.18±0.06	66.30±0.35	8.88±0.41
0.5	1	17.84±0.21	77.47±0.13	64.94±0.07	12.53±0.06
	3	17.40±0.23	77.35±0.07	65.28±1.08	12.08±1.01
	5	17.36±0.33	77.17±0.26	65.08±0.00	12.09±0.26

หมายเหตุ 1. holo cellulose คือ ผลรวมของ α -cellulose กับ hemi cellulose 2. ร้อยละ holo cellulose คิดเทียบกับน้ำหนักวัตถุดิบเริ่มต้น 3. ร้อยละ α -cellulose คิดเทียบกับน้ำหนักของ holo cellulose 4. ภาวะควบคุม คือ 0%NaOH และเวลา 0 ชั่วโมงในตาราง ซึ่งเป็นภาวะที่แช่เส้นใยอ่อนใน น้ำประปา 3 สัปดาห์

ตารางที่ 4-16 ผลการวิเคราะห์สถิติของการใช้เอนไซม์ไลเปสและระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่มีต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อ

chemical composition	A			B			A*B		
	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}
lignin	1.4E-05*	161.9178	5.9874	0.1716	2.3986	5.1432	0.3052	1.4559	5.1432
holo cellulose	2.0E-07*	692.4151	5.9874	0.3851	1.1235	5.1432	0.3003	1.4799	5.1432
α -cellulose	0.0587	5.4247	5.9874	0.9719	0.0286	5.1432	0.8321	0.1895	5.1432
hemi cellulose	0.0007*	40.1094	5.9874	0.9981	0.0019	5.1432	0.7574	0.2911	5.1432

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

เมื่อพิจารณาเวลาปรับสภาพเส้นใย พบว่า มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยในทิศทางที่ไม่ชัดเจน ยกเว้นในกรณีที่ใช้ไลเปสร้อยละ 0.5 พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการปรับสภาพมากขึ้น แอลฟาเซลลูโลสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น หากแต่เฮมิเซลลูโลสกลับมีแนวโน้มลดลง

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-16 พบว่า ปริมาณเอนไซม์ไลเปสมีผลต่อปริมาณลิกนิน ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส และปริมาณเฮมิเซลลูโลสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมีค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ขณะที่ระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์ไลเปสกับระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนั้นไม่ส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ

4.3.5 คุณภาพและมิติของเส้นใย

จากการวิเคราะห์ผลคุณภาพและมิติของเส้นใยดังแสดงในตารางที่ 4-17 เมื่อใช้เอนไซม์ไลเปสปรับสภาพเส้นใย พบว่า ความยาวเส้นใยแบบ LWW มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กกลับเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม

ตารางที่ 4-17 ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยต่อคุณภาพและมิติของเส้นใย

lipase pretreatment		fiber characteristic				
		LWW fiber length (mm)	fines content (%)	curl index	kink index	fiber width (μm)
lipase dosage (%)	time (hour)					
0	0	2.60 \pm 0.15	22.49 \pm 1.30	0.113 \pm 0.01	1.32 \pm 0.07	14.73 \pm 0.24
0.25	1	2.25 \pm 0.01	24.25 \pm 1.51	0.108 \pm 0.002	1.35 \pm 0.03	15.03 \pm 0.08
	3	2.35 \pm 0.09	25.53 \pm 1.08	0.109 \pm 0.003	1.37 \pm 0.04	14.87 \pm 0.16
	5	2.20 \pm 0.04	26.85 \pm 2.01	0.109 \pm 0.004	1.39 \pm 0.03	14.77 \pm 0.02
0.5	1	2.15 \pm 0.04	26.72 \pm 0.68	0.112 \pm 0.003	1.42 \pm 0.02	14.75 \pm 0.17
	3	2.26 \pm 0.11	26.14 \pm 1.08	0.109 \pm 0.003	1.36 \pm 0.09	14.88 \pm 0.14
	5	2.32 \pm 0.07	24.30 \pm 0.76	0.111 \pm 0.003	1.35 \pm 0.01	14.69 \pm 0.12

หมายเหตุ ภาวะควบคุม คือ 0%lipase และเวลา 0 ชั่วโมง เป็นภาวะที่แช่เส้นใยนุ่นในน้ำประปา 3 สัปดาห์ ต้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักนุ่นแห้ง

ตารางที่ 4-18 ผลการวิเคราะห์สถิติของการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสและเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่มีต่อมิติของเส้นใย

fiber characteristic	A			B			A*B		
	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}
LWW fiber length	0.1110	3.4885	5.9874	0.14042	2.7718	5.1432	2.0019	0.2157	5.1432
finer content	0.9952	3.9E-05	5.9874	0.8669	0.1463	5.1432	0.0693	4.3033	5.1432
curl index	0.5677	0.3653	5.9874	0.4276	0.9821	5.1432	0.4109	1.0353	5.1432
kink index	0.8413	0.0437	5.9874	0.8131	0.2142	5.1432	0.2393	1.8318	5.1432
fiber width	0.1110	3.4885	5.9874	0.1404	2.7718	5.1432	0.2157	2.0019	5.1432

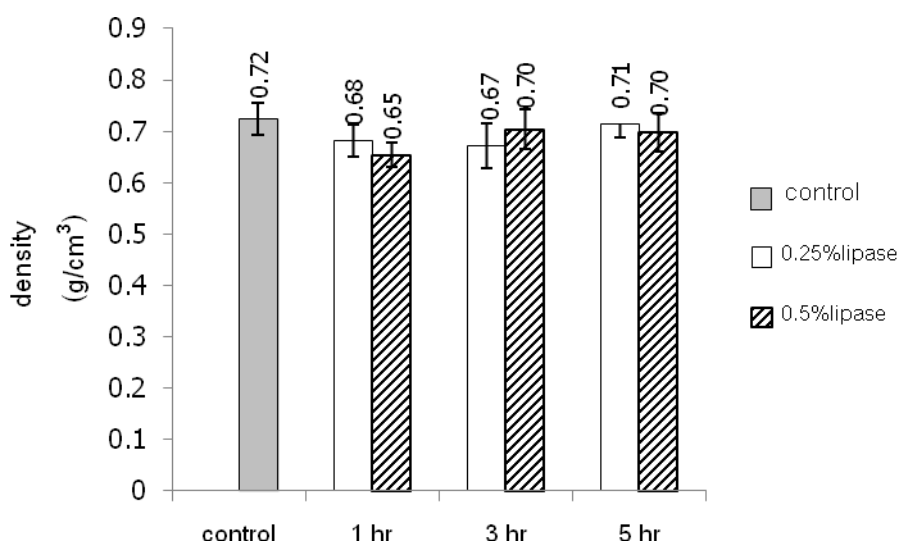
หมายเหตุ A คือ ผลของเอนไซม์ไลเปสที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย B คือ ผลของระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใย A*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างการใช้เอนไซม์ไลเปสและเวลาในการปรับสภาพเส้นใย * คือ มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\text{-value} \leq 0.05$ และ $F_{cal} > F_{crit}$)

ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเอนไซม์ไลเปสช่วยในการเปิดผิวของเส้นใย ทำให้เส้นใยถูกทำปฏิกิริยากับสารต้มเยื่อมากขึ้น เส้นใยเป็นอิสระต่อกันมากขึ้น และเมื่อนำเยื่อที่ได้นี้ไปผ่านการบด จึงอาจส่งผลให้เส้นใยจึงมีขนาดสั้นลงและปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากขึ้น ขณะที่ดัชนีความโค้งงอและดัชนีความหักงอของเส้นใยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเส้นใยแยกออกเป็นอิสระได้ดีเมื่อผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส เมื่อบดเยื่อแบบจวนบดจึงทำให้เส้นใยเดี่ยว ๆ เกิดการหักงอได้มากกว่าจากแรงเฉือนขณะบดเยื่อ เมื่อพิจารณาผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใยพบว่า ส่งผลต่อมิติของเส้นใยจากเยื่อนุ่นไม่ชัดเจนนัก

ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-18 พบว่า ปริมาณเอนไซม์ไลเปสและระยะเวลาปรับสภาพเส้นใยนั้น รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองไม่ส่งผลต่อคุณภาพและลักษณะด้านมิติของเส้นใยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.3.6 ความหนาแน่นปรากฏ

ภาพที่ 4-25 แสดงผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใยนุ่นต่อความหนาแน่น พบว่า การสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสมีผลต่อความหนาแน่นของแผ่นทดสอบน้อยมาก เนื่องจากให้ค่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบใกล้เคียงกันกับภาวะควบคุม ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-19 พบว่า ปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่ใช้ เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย และปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองนี้ต่างไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

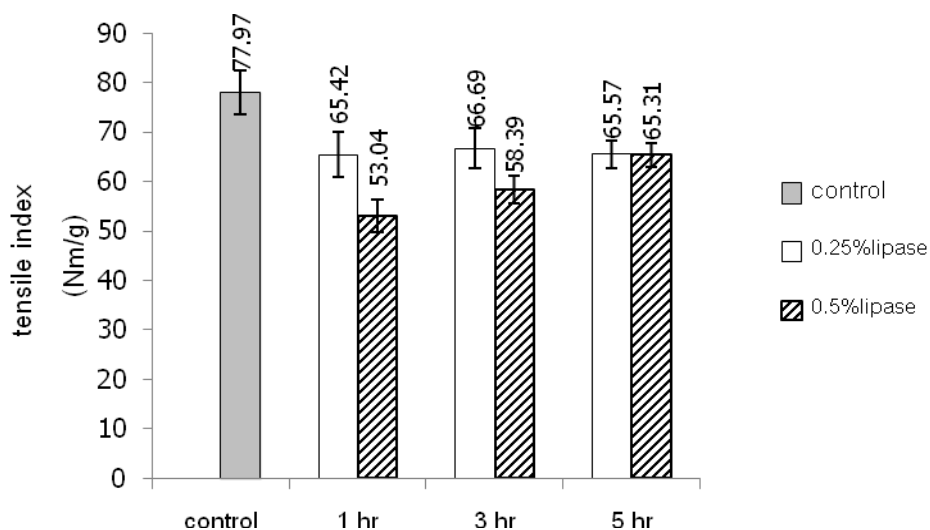


ภาพที่ 4-25 ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใยนุ่นต่อความหนาแน่น

4.3.7 สมบัติด้านความแข็งแรง

4.3.7.1 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

ภาพที่ 4-26 แสดงผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง พบว่า การปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสส่งผลให้ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ดี และอาจไปทำลายคาร์โบไฮเดรต โดยทำให้ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสลดลง แต่ปริมาณเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4-15) ซึ่งอาจส่งผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง ความแข็งแรงต่อแรงดึงซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยด้วยเช่นกันจึงลดลง เมื่อพิจารณาปริมาณเอนไซม์ไลเปสในการปรับสภาพเส้นใย พบว่า เอนไซม์ไลเปสปริมาณร้อยละ 0.25 ให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าปริมาณเอนไซม์ไลเปสร้อยละ 0.5 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณแอลฟาเซลลูโลสในเส้นใยลดลงเมื่อใช้เอนไซม์ไลเปสมากขึ้น ดังนั้นความแข็งแรงของเส้นใยเดี่ยว ๆ ลดลง จึงส่งผลทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงด้วย ในส่วนของผลของเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพนั้น พบว่าเวลามีผลทำให้ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเฉพาะในกรณีที่ใช้เอนไซม์ไลเปสร้อยละ 0.5 เท่านั้น เนื่องจากค่าปริมาณแอลฟาเซลลูโลสเพิ่มขึ้นและปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลง (ตารางที่ 4-15) จากการทดลองพบว่าเมื่อเทียบระหว่างภาวะที่ปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 และร้อยละ 0.5 ภาวะที่ใช้เอนไซม์ไลเปสร้อยละ 0.25 เวลา 3 ชั่วโมง ในการปรับสภาพเส้นใย ให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุด

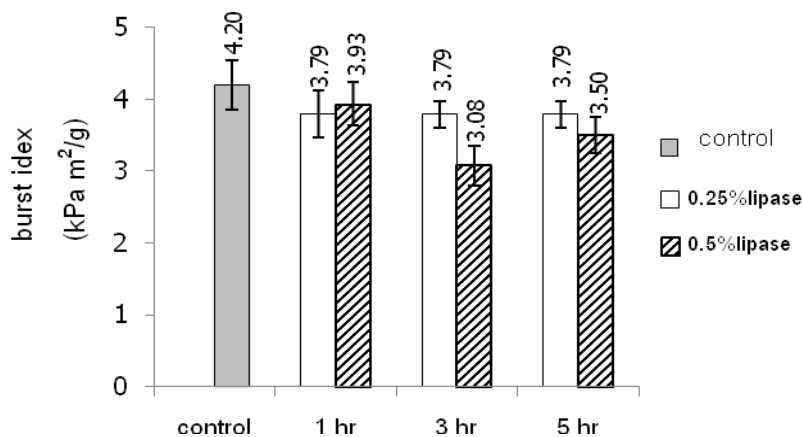


ภาพที่ 4-26 ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-19 พบว่า ปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่ใช้ปรับสภาพเส้นใย เวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย และปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง ส่งผลต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.3.7.2 ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

ภาพที่ 4-27 แสดงผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใย นุ่นต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ พบว่า ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีแนวโน้มเหมือนกับดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง คือ มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม ทั้งนี้อาจเนื่องจากการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสสามารถย่อยไขควิดินที่ผิวของเส้นใยได้ดี ทำให้สารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้มากขึ้น ซึ่งสารเคมีดังกล่าวจะไม่ละลายเฉพาะลิกนินเท่านั้น หากยังไปทำลายเซลลูโลสด้วย จึงทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยและการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยเกิดได้ไม่ดี ส่งผลให้ทั้งความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุและความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง เมื่อพิจารณาปริมาณเอนไซม์ไลเปสเพื่อปรับสภาพเส้นใย พบว่าเอนไซม์ไลเปสปริมาณร้อยละ 0.25 ให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุในแนวโน้มสูงกว่าเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไลเปสร้อยละ 0.5

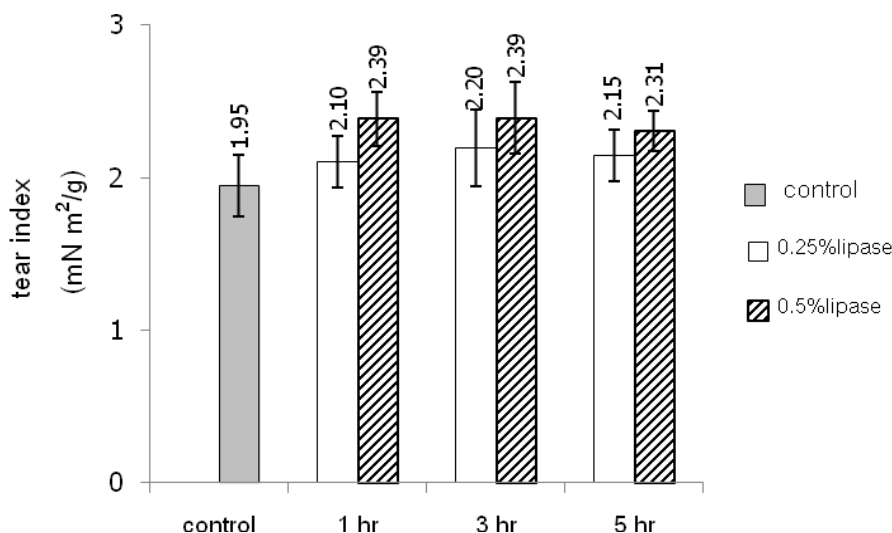


ภาพที่ 4-27 ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใย นุ่นต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

ผลการวิเคราะห์ผลทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-19 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย ระยะเวลาที่ใช้ปรับสภาพเส้นใย รวมถึงปฏิสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรทั้งสอง ส่วนแล้วแต่ไม่ส่งผลต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุอย่างมีนัยสำคัญทาง สถิติ

4.3.7.3 ความแข็งแรงต่อแรงฉีก

ภาพที่ 4-28 แสดงผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใย ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก พบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับภาวะ ควบคุม ซึ่งผลที่ได้ไม่เป็นไปตามสมมติฐาน อาจเนื่องจากการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปสส่งผลให้ ความยาวของเส้นใยลดลง ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสมีแนวโน้มลดลง ปริมาณเฮมิเซลลูโลสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งดูแล้วอาจจะส่งผลให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปสส่งผลให้ปริมาณลิกนินลดลง จึงอาจส่งผลให้ค่าดัชนี ความแข็งแรงต่อแรงฉีกเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เอนไซม์ไลเปสในการปรับสภาพเส้นใยในปริมาณเพิ่มขึ้น ปริมาณลิกนินยิ่งน้อยลง (ตารางที่ 4-15) จึงอาจทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกเมื่อปรับสภาพ เส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสปริมาณร้อยละ 0.5 สูงกว่าปริมาณร้อยละ 0.25



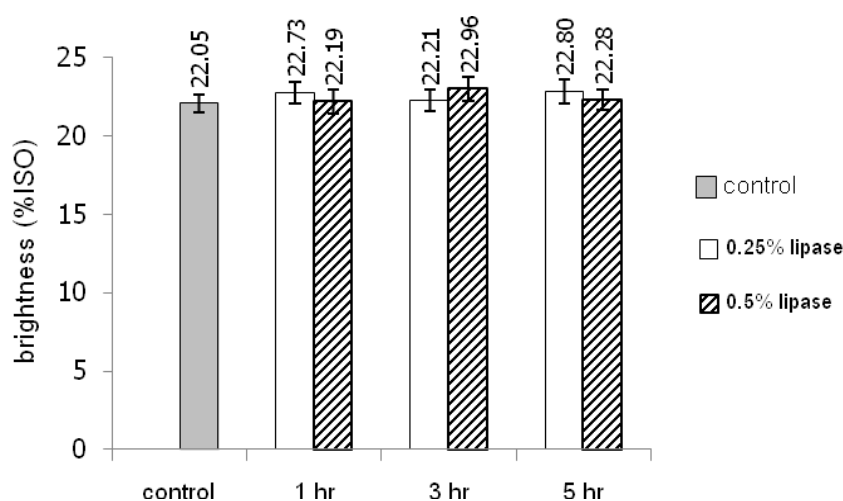
ภาพที่ 4-28 ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใย
ต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก

การวิเคราะห์ผลทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-19 พบว่า ปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย ส่งผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ระยะเวลาปรับสภาพเส้นใยและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์ไลเปสและระยะเวลาในการปรับสภาพนั้นไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกอย่างมีนัยสำคัญ

4.3.8 สมบัติด้านทัศนศาสตร์

4.3.8.1 ความขาวสว่าง

ภาพที่ 4-29 แสดงผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใย นุ่นต่อความขาวสว่าง พบว่า เมื่อปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสแผ่นทดสอบมีค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม ซึ่งความขาวสว่างที่เพิ่มขึ้นนั้นอาจเป็นเพราะค่าคัปปานัมเบอร์ที่ลดลงด้วย (ภาพที่ 4-24) เนื่องจากมีการกำจัดลิกนินออกจากเยื่อ ทำให้เยื่อมีความขาวสว่างเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณเอนไซม์ไลเปสและระยะเวลาปรับสภาพเส้นใยมีผลต่อค่าความขาวสว่างน้อยมาก เนื่องจากค่าความขาวสว่างที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

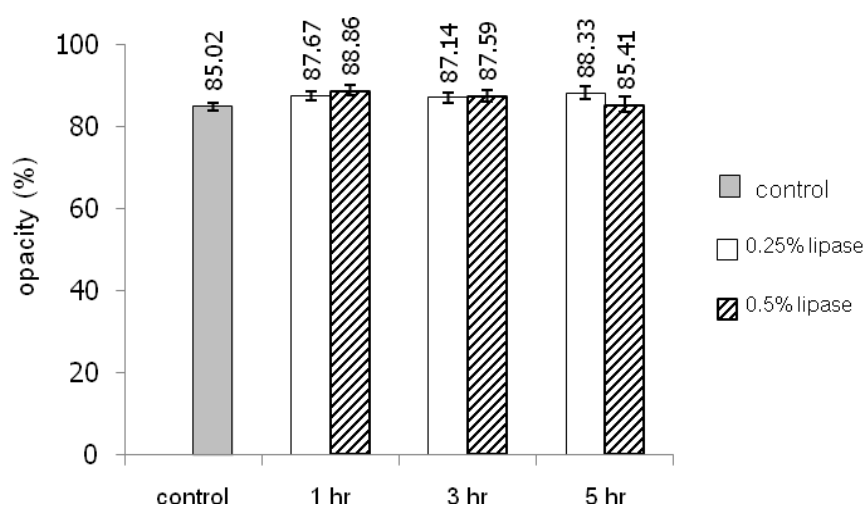


ภาพที่ 4-29 ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใย นุ่นต่อความขาวสว่าง

ผลจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-19 พบว่า ปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย ระยะเวลาปรับสภาพเส้นใย รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองไม่ส่งผลต่อความขาวสว่างของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ

4.3.8.2 ความทึบแสง

ภาพที่ 4-30 แสดงผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อความทึบแสง พบว่า การปรับสภาพเส้นใยด้วยไลเปสส่งผลให้ค่าความทึบแสงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพด้วยไลเปสส่งผลให้มีปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมากขึ้น (ตารางที่ 4-17) ทำให้มีพื้นที่ในการกระเจิงของแสงในชั้นของแผ่นทดสอบมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความทึบแสงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยและระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยนั้นมีผลต่อความทึบแสงน้อยมาก เนื่องจากให้ค่าความทึบแสงใกล้เคียงกัน



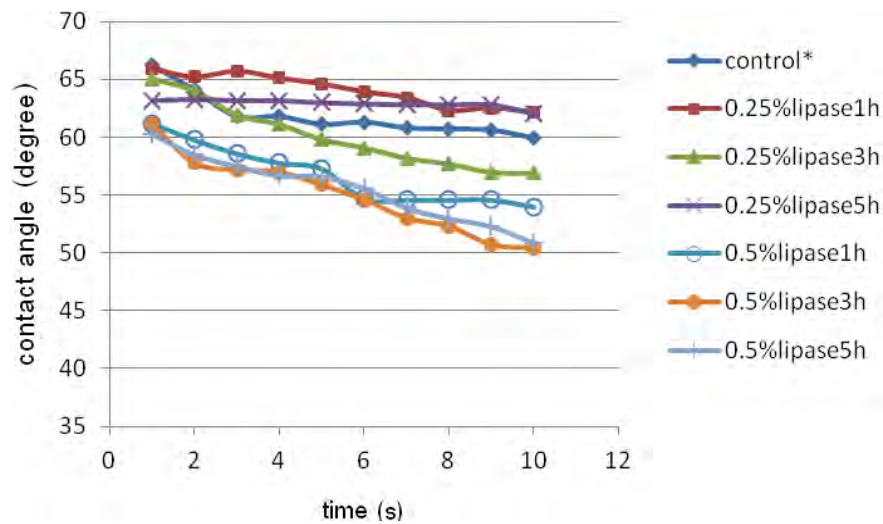
ภาพที่ 4-30 ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใยนุ่มต่อความทึบแสง

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติดังแสดงไว้ในตารางที่ 4-19 พบว่า ปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย ระยะเวลาปรับสภาพเส้นใย รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองนั้น ไม่ส่งผลต่อความทึบแสงของแผ่นทดสอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

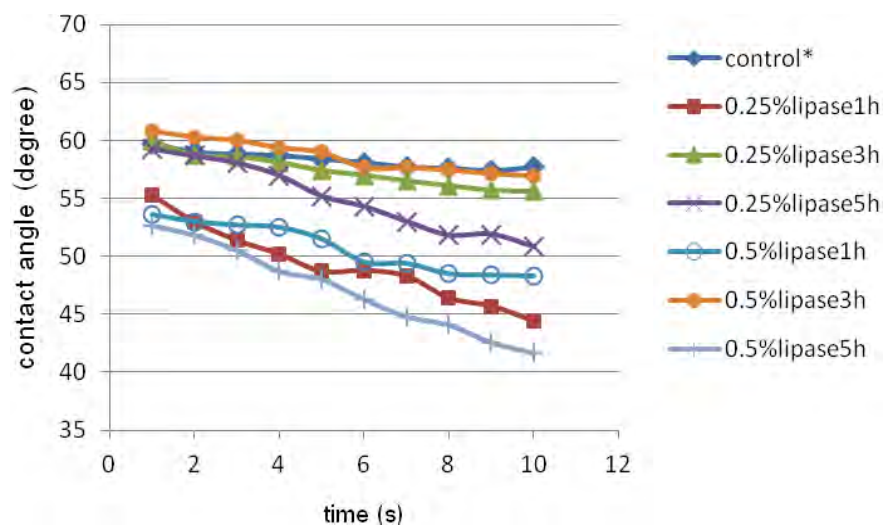
4.3.9 มุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษ

ภาพที่ 4-31 แสดงผลของการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสต่อมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษที่ผลิตจากเยื่ออ่อน (ด้านบน) พบว่า ภาวะที่ปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสส่วนใหญ่มีมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษน้อยกว่าภาวะควบคุม ยกเว้นในกรณีของภาวะที่ปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสร้อยละ 0.25 เวลา 1 และ 5 ชั่วโมง ซึ่งมีค่ามุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษมากกว่าภาวะ

ควบคุม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสในปริมาณที่มากสามารถกำจัดไขคิวตินบนผิวหน้าเส้นใยได้มาก กระดาษจึงซึมน้ำได้ง่ายขึ้น



ภาพที่ 4-31 ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยบนต่อมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษด้านบน



ภาพที่ 4-32 ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสและเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยบนต่อมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษด้านล่าง

จากผลของมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษด้านล่างดังแสดงในภาพที่ 4-32 พบว่า ภาวะที่ปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสมีค่ามุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษน้อยกว่าภาวะควบคุมทุกภาวะ และยิ่งเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไลเปสเพิ่มขึ้น ค่ามุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษยิ่งลดลง เพราะมีการกำจัดไขควิตินได้มากขึ้นนั่นเอง

4.3.10 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

เมื่อนำค่าสมบัติต่าง ๆ ที่ทดสอบได้ของเยื่อ เส้นใย และแผ่นทดสอบที่ผลิตได้จากการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสที่ความเข้มข้น 2 ระดับคือ ร้อยละ 0.25 และร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น หรือ เท่ากับ 250 LU/g และ 500 LU/g ของน้ำหนักแห้งของนุ่น ตามลำดับ และระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใย คือ 1, 3 และ 5 ชั่วโมง มาวิเคราะห์ผลทางสถิติ ด้วยวิธี Anova แบบ Two factor with replication ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha=0.05$) โดยค่า A คือ ผลของปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย ค่า B คือ ผลของเวลาปรับสภาพเส้นใย และค่า A*B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยกับระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใย โดยการพิจารณาความมีนัยสำคัญของตัวแปรต่อผลที่ได้ใช้เกณฑ์เดียวกับข้อ 4.1.10 กล่าวคือ พิจารณาจากค่า P-value และค่า F ของสมบัติต่าง ๆ ของเยื่อและแผ่นทดสอบเป็นหลัก จากการทดลอง พบว่า ปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยส่งผลต่อปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ ปริมาณลิกนิน ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส ปริมาณเฮมิเซลลูโลส ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง และดัชนีความแข็งแรงตึงคอกอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha=0.05$) เนื่องจาก P-value มีค่าต่ำกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่ามากกว่าค่า F_{crit} ส่วนระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยนั้น ส่งผลต่อผลผลิตเยื่อ ปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ และดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($\alpha=0.05$) เนื่องจาก P-value นั้นมีค่าต่ำกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่ามากกว่าค่า F_{crit} ส่วนผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์ไลเปสกับระยะเวลาปรับสภาพเส้นใย พบว่า มีผลต่อปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อและดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เพราะมี P-value ต่ำกว่า 0.05 และค่า F_{cal} มีค่ามากกว่าค่า F_{crit}

4.3.11 ภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปส

จากผลการทดลองข้างต้นในข้อ 4.3 พบว่า ภาวะปริมาณเอนไซม์ไลเปสและระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพเส้นใยที่เหมาะสมที่สุดคือ ปริมาณเอนไซม์ไลเปสร้อยละ 0.25 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น เวลา 3 ชั่วโมง เนื่องจากภาวะนี้มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและผลผลิตเยื่อสูงที่สุด ขณะที่มีความคัปานัมเบอร์และปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อต่ำ

ตารางที่ 4-19 ผลการวิเคราะห์สถิติของการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสและเวลาในการปรับสภาพเส้นใยที่มีต่อสมบัติของแผ่นทดสอบ

paper properties	A			B			A*B		
	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}	P-value	F _{cal}	F _{crit}
density	1.0000	0.0000	5.9874	0.1172	3.1296	5.1432	0.1958	2.1667	5.1432
tensile index	0.0003*	57.4524	5.9874	0.0045*	15.1640	5.1432	0.0047*	14.9296	5.1432
burst index	0.1085	3.5510	5.9874	0.1586	2.5422	5.1432	0.1586	2.5422	5.1432
tear index	0.0007*	40.7075	5.9874	0.3020	1.4715	5.1432	0.3591	1.2207	5.1432
brightness	0.8874	0.0218	5.9874	0.9845	0.0156	5.1432	0.6492	0.4646	5.1432
opacity	0.6548	0.2211	5.9874	0.4857	0.8164	5.1432	0.2207	1.9641	5.1432

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

4.4 ผลการปรับสภาพเส้นใยนุ่นด้วยเอนไซม์ไลเปสก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อแบบโซดาโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณร้อยละ 10 ในการต้มเยื่อ

ผลการทดลองที่แสดงภายใต้หัวข้อ 4.4 นี้ เป็นผลการทดลองตอนที่ 4 ซึ่งเป็นการทดลองการปรับสภาพเส้นใยนุ่นด้วยเอนไซม์ไลเปส โดยปริมาณเอนไซม์ไลเปสและระยะเวลาในการปรับสภาพที่ใช้ นั้นเป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองตอนที่ 3 เมื่อทำการปรับสภาพเส้นใยนุ่นแล้ว นำนุ่นที่ผ่านการปรับสภาพมาต้มเยื่อด้วยวิธีโซดาโดยจะลดปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการต้มเยื่อลงเหลือปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น ต้มเยื่อที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 120 นาที เมื่อต้มเยื่อเสร็จแล้ว นำเยื่อที่ได้มาผ่านการบดเยื่อ และทำการขจัดความหึงของของเส้นใย ทดสอบสมบัติของเยื่อและปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ นำเยื่อที่ได้มาขึ้นแผ่นทดสอบ แล้วทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองควบคุมและการทดลองที่หาได้จากภาวะที่เหมาะสมจากตอนที่ 2 และ 3 ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลผลิตเยื่อ ปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ คัปปานัมเบอร์ และความหนาแน่น

จากตารางที่ 4-20 แสดงผลผลิตเยื่อ ปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อ คัปปานัมเบอร์ และความหนาแน่นของเยื่อ โดยกำหนดให้ A คือ เยื่อที่ได้จากการทดลองควบคุม ซึ่งเป็นการทดลองที่เส้นใยนุ่นไม่ผ่านการปรับสภาพ หากแต่เพียงแช่น้ำไว้เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ ก่อนนำมาต้มเยื่อ B คือ เยื่อที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ C คือ เยื่อที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส และ D คือ เยื่อที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส หากแต่ลดปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นสารต้มเยื่อลงครึ่งหนึ่ง คือ จากร้อยละ 20% เป็นร้อยละ 10% ของน้ำหนักแห้งของนุ่น จากการทดลองพบว่า ผลผลิตเยื่อจากภาวะ D (เยื่อผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปสหากแต่ลดปริมาณสารต้มเยื่อลงครึ่งหนึ่ง) มีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับภาวะที่เหมาะสมของแต่ละการทดลอง ยกเว้นภาวะที่เยื่อผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปสเหมือนกันซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อพบว่าภาวะ D (เยื่อผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปสหากแต่ลดปริมาณสารต้มเยื่อลงครึ่งหนึ่ง) มีปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อสูงที่สุดเมื่อเทียบกับภาวะที่เหมาะสมของแต่ละการทดลอง แสดงว่าการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสช่วยเปิดผิวเส้นใย อีกทั้งปริมาณของสารต้มเยื่อทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ดี จึงเป็นผลให้ประหยัดสารเคมีในการต้มเยื่อลงด้วย เมื่อพิจารณาค่าคัปปานัมเบอร์ พบว่าภาวะที่เยื่อผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปสหากแต่ลดปริมาณสารต้มเยื่อลงครึ่งหนึ่ง (ภาวะ D)

ให้ค่าคัปปานัมเบอร์สูงกว่าภาวะอื่น ๆ ขณะที่ความหนาแน่นนั้น ทุกภาวะมีค่าความหนาแน่นที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

ตารางที่ 4-20 การเปรียบเทียบสมบัติของเยื่อและแผ่นทดสอบที่ผลิตด้วยวิธีโซดาของแต่ละภาวะที่เหมาะสม

condition	yield (%)	residual alkali (g/l)	kappa number	density (g/cm ³)
A	76.02±1.79	1.60±0.57	108±2.22	0.72±0.03
B	75.02±2.25	3.50±0.14	98±2.10	0.80±0.04
C	72.10 ±0.12	0.80±0.00	105±1.50	0.68±0.04
D	71.25±4.02	3.90±0.14	116±4.30	0.73±0.02

หมายเหตุ A คือ การทดลองควบคุม ซึ่งเป็นการทดลองที่เส้นใยนั้นไม่ผ่านการปรับสภาพ หากแช่น้ำทิ้งไว้เป็นเวลา 3 สัปดาห์ B คือ การทดลองที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ C คือ ทดลองที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปส และ D คือ เยื่อที่ผลิตจากการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสร้อยละ 0.25 เวลา 3 ชั่วโมง หากแต่ต้มเยื่อโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักนุ่นแห้ง

4.4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อที่ผลิตด้วยวิธีโซดา

ตารางที่ 4-21 แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อที่ผลิตด้วยวิธีโซดาของภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อแต่ละตอนการทดลอง จากการทดลองพบว่า ภาวะที่เยื่อผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปสหากแต่ลดปริมาณสารต้มเยื่อลงครึ่งหนึ่ง (ภาวะ D) ส่งผลให้ปริมาณลิกนินในเยื่อมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแต่ละภาวะที่เหมาะสมของการทดลองแต่ละตอน ขณะที่ปริมาณไฮโลเซลลูโลสและปริมาณเฮมิเซลลูโลสมีแนวโน้มสูงกว่าเมื่อเทียบกับแต่ละภาวะ แสดงว่าการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสและลดปริมาณสารต้มเยื่อลงนั้น ยังมีการเปิดผิวของเส้นใยและสารเคมีในการต้มเยื่อไม่ทำลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ทำให้ยังคงความแข็งแรงของเส้นใยให้คงอยู่

ตารางที่ 4-21 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเยื่อที่ผลิตด้วยวิธีโซดาของแต่ละภาวะที่เหมาะสม

condition	chemical composition			
	lignin (%)	holo cellulose (%)	α -cellulose (%)	hemi cellulose (%)
A	22.17 \pm 0.35	74.57 \pm 0.34	66.47 \pm 0.06	8.1 \pm 0.28
B	20.04 \pm 0.23	75.23 \pm 0.30	70.73 \pm 0.25	4.50 \pm 0.04
C	19.52 \pm 0.23	75.08 \pm 0.18	66.27 \pm 1.37	8.81 \pm 1.20
D	18.46 \pm 0.37	76.76 \pm 0.76	67.30 \pm 0.13	9.47 \pm 0.62

หมายเหตุ A คือ การทดลองควบคุม ซึ่งเป็นการทดลองที่เส้นใยไม่ผ่านการปรับสภาพ เช่นน้ำทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ B คือ การทดลองที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ C คือ การทดลองที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปส และ D คือ เยื่อที่ผลิตจากการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสร้อยละ 0.25 เวลา 3 ชั่วโมง หากแต่ต้มเยื่อโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักนุ่นแห้ง

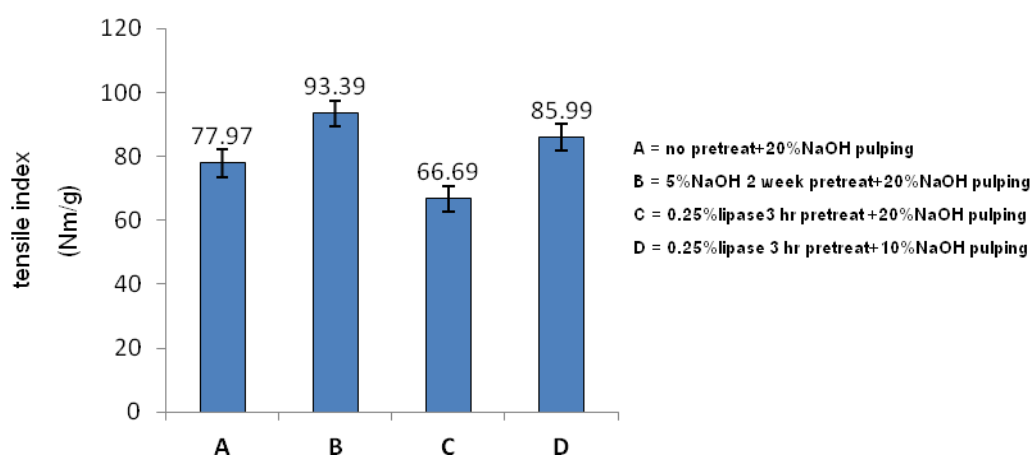
4.4.3 สมบัติด้านความแข็งแรงและสมบัติด้านทัศนศาสตร์

ตารางที่ 4-22 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติด้านความแข็งแรงและสมบัติด้านทัศนศาสตร์ของแผ่นทดสอบของเยื่อที่ผลิตด้วยวิธีโซดาจากภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเยื่อแต่ละตอนการทดลอง จากผลการทดลองพบว่า ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ดังแสดงในภาพที่ 4-33 และตารางที่ 4-22 พบว่า ภาวะ D ซึ่งเป็นภาวะที่มีการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส หากแต่ใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงครึ่งหนึ่งในการต้มเยื่อ มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าภาวะ A (การทดลองควบคุม) และ C (การทดลองที่ได้มาจากภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส) แต่ต่ำกว่าภาวะ B (การทดลองที่ได้มาจากภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์) และเมื่อเทียบระหว่างภาวะที่มีการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสเหมือนกัน (ภาวะ C กับ D) พบว่า ภาวะ D ซึ่งปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปส เวลา 3 ชั่วโมง แล้วต้มเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณร้อยละ 10 ให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าภาวะ C ซึ่งปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปส เวลา 3 ชั่วโมง แล้วต้มเยื่อด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณร้อยละ 20 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสนั้น เอนไซม์ไลเปสจะไปย่อยไขควิติน ช่วยเปิดผิวเส้นใย ทำให้สารเคมีในการต้มเยื่อเข้าทำปฏิกิริยากับลิกนินในเส้นใย และทำลายคาร์โบไฮเดรตของเส้นใยด้วย ฉะนั้น หากใช้ปริมาณสารเคมีในการต้มเยื่อมากเกินไป แอลฟาเซลลูโลสของเส้นใยอาจถูกทำลายไปมาก ความแข็งแรงของเส้นใยจึงอาจลดลง ส่งผลต่อการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยในแผ่นทดสอบ ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจึงลดลง

ตารางที่ 4-22 การเปรียบเทียบสมบัติด้านความแข็งแรงและสมบัติด้านทัศนศาสตร์ของแผ่นทดสอบของเยื่อที่ผลิตด้วยวิธีโซดาของแต่ละภาวะที่เหมาะสม

condition	tensile index (Nm/g)	burst index (kPa m ² /g)	tear index (mN m ² /g)	brightness (%ISO)	opacity (%)
A	77.97±4.45	4.20±0.34	1.95±0.20	22.05±0.54	85.02±0.96
B	93.39±4.11	5.33±0.35	1.88±0.09	20.89±0.21	86.13±1.50
C	66.69±4.02	3.79±0.18	2.20±0.25	22.21±0.69	87.14±1.17
D	85.99±4.36	4.74±0.29	1.60±0.89	20.97±0.43	84.68±1.40

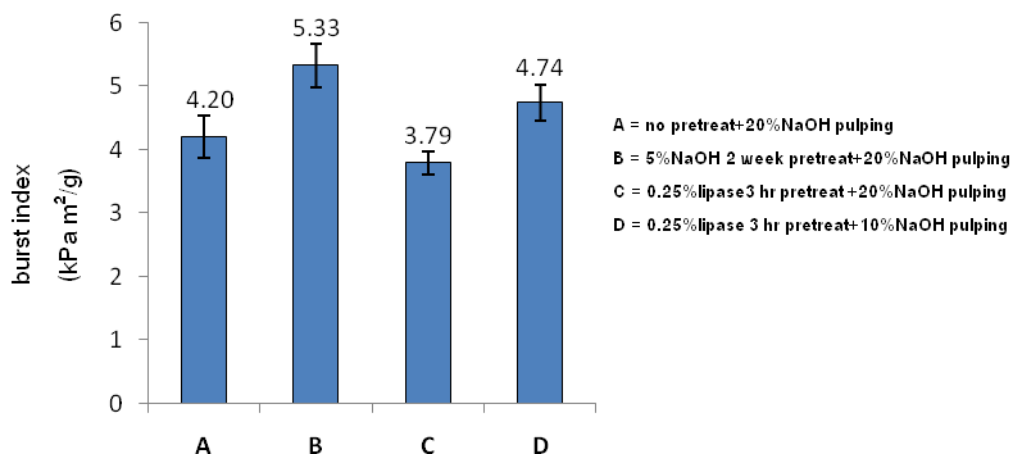
หมายเหตุ A คือ การทดลองควบคุม ซึ่งเป็นการทดลองที่เส้นใยนั้นไม่ผ่านการปรับสภาพ หากแช่น้ำทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ B คือ การทดลองที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ C คือ ทดลองที่ได้จากภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปส และ D คือ เยื่อที่ผลิตจากการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสร้อยละ 0.25 เวลา 3 ชั่วโมง หากแต่ต้มเยื่อโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักแห้ง



ภาพที่ 4-33 ภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตอนการทดลองต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

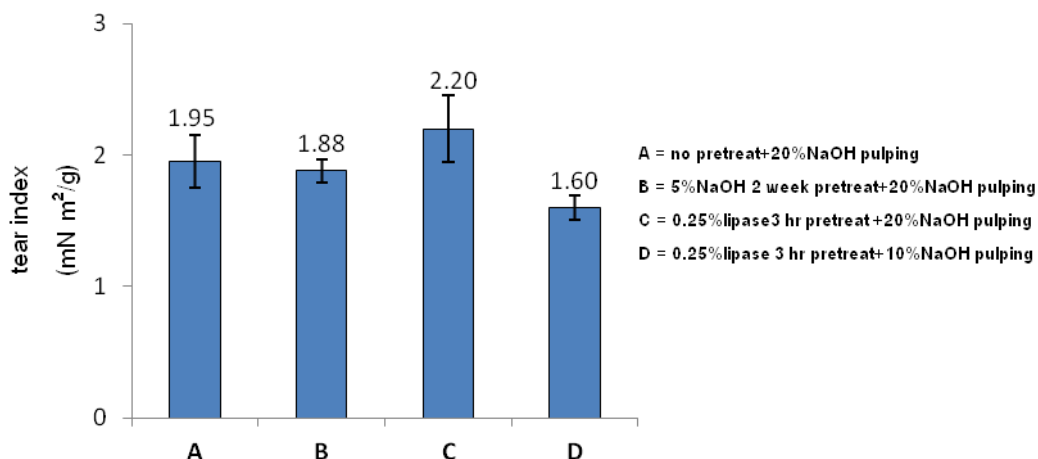
ผลจากดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีแนวโน้มเหมือนกับดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ซึ่งจากตารางที่ 4-22 และภาพที่ 4-34 พบว่า ภาวะ D มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าภาวะ B แต่จะสูงกว่าภาวะ A และ ภาวะ C และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาวะที่มีการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสเหมือนกัน ภาวะ D ซึ่งใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อน้อยกว่า

จะมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงกว่าภาวะ C ทั้งนี้อาจเนื่องจากคาร์โบไฮเดรตถูกทำลายน้อยกว่า ความแข็งแรงของเส้นใยจึงดีกว่า ซึ่งความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุอาศัยความแข็งแรงของเส้นใยและการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยเป็นหลัก



ภาพที่ 4-34 ภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตอนการทดลองต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

ตารางที่ 4-22 และภาพที่ 4-35 แสดงภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตอนการทดลองต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก พบว่า ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของภาวะ D (การปรับสภาพโดยใช้เอนไซม์ไลเปส หากแต่ต้มเยื่อโดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงครั้งหนึ่ง) มีค่าต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะอื่น ขณะที่ภาวะ C (ภาวะที่เหมาะสมจากการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส) มีค่าสูงสุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปส เอนไซม์จะช่วยเปิดผิวของเส้นใย เกิดเป็นเกิดเส้นใยเล็ก ๆ ขนาดสั้น การใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงในการต้มเยื่อ จึงทำลายเส้นใยสั้น ๆ ทำให้เหลือสัดส่วนของเส้นใยยาวมากขึ้น ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกจึงเพิ่มขึ้น

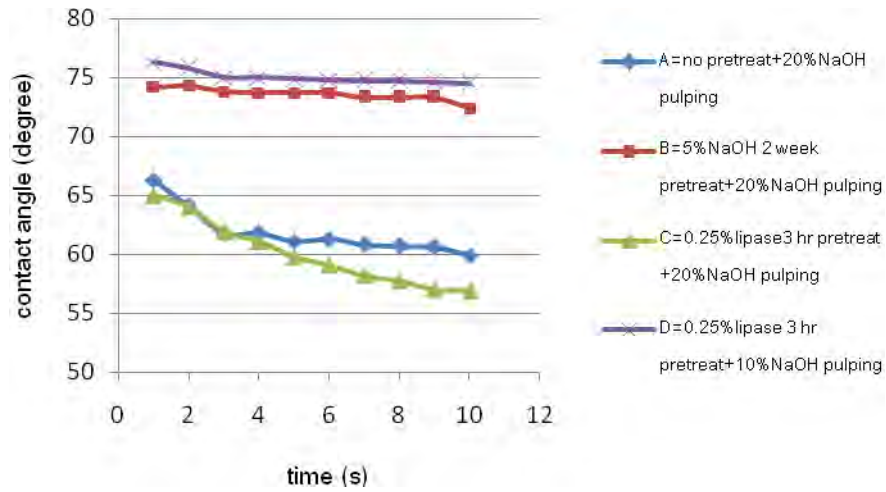


ภาพที่ 4-35 ภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตอนการทดลองต่อดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก

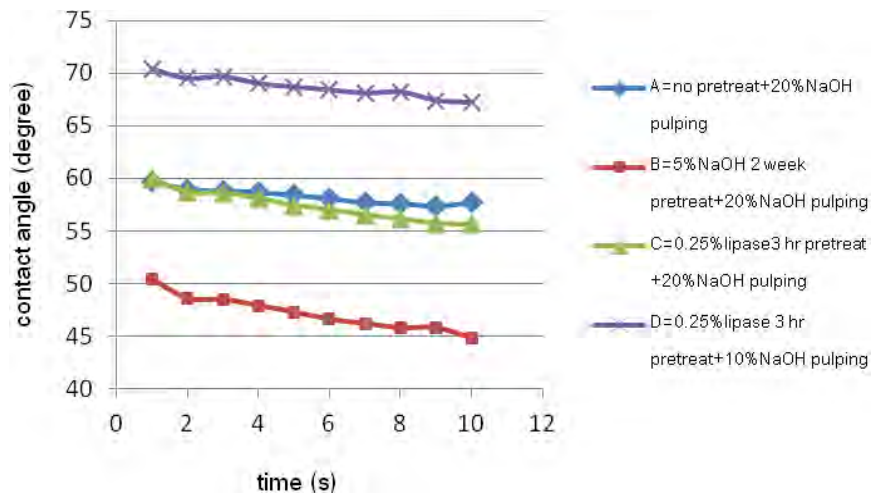
ผลของสมบัติด้านทัศนศาสตร์ คือ ความขาวสว่างและความทึบแสง ดังแสดงในตารางที่ 4-22 พบว่า ค่าความขาวสว่างของภาวะ D (การปรับสภาพโดยใช้เอนไซม์ไลเปส หากแต่ต้มเยื่อโดยใช้ปริมาณไฮดรอกไซด์เพียงครั้งหนึ่ง) มีค่าใกล้เคียงกับภาวะ B (ภาวะที่เหมาะสมจากการปรับสภาพด้วยไฮดรอกไซด์) แต่มีค่าต่ำกว่าภาวะ A (การทดลองควบคุม) และ C (ภาวะที่เหมาะสมจากการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาวะที่ปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปส ระหว่างภาวะ C และ D พบว่าความขาวสว่างของภาวะ D ต่ำกว่าภาวะ C เนื่องจากภาวะ C มีค่าคัปานัมเบอร์ต่ำกว่า (จากตารางที่ 4-20) จึงส่งผลให้มีความขาวสว่างสูงกว่า ขณะที่ความทึบแสงของภาวะ D มีค่าต่ำกว่าทุกภาวะการทดลอง

4.4.4 มุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษ

ภาพที่ 4-36 และภาพที่ 4-37 แสดงการเปรียบเทียบภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตอนการทดลองต่อมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษด้านบนและด้านล่างของแผ่นทดสอบ พบว่า แผ่นทดสอบภาวะที่ปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสปริมาณร้อยละ 0.25 ต่อน้ำหนักเยื่อแห้ง เวลา 3 ชั่วโมง ต้มเยื่อด้วยไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 มีค่ามุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษทั้งสองด้านมากกว่าภาวะการทดลองอื่น ๆ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปส ส่งผลให้สารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้มากขึ้น ทั้งส่วนที่เป็นไซควิตินและส่วนที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย เมื่อมีการใช้สารเคมีในการต้มเยื่อในปริมาณที่ต่ำลง อาจเป็นไปได้ว่าไซควิตินถูกจำกัดน้อยลง จึงส่งผลให้ด้านการซึมน้ำยังมีค่าสูง



ภาพที่ 4-36 ภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตอนการทดลองต่อมุมสัมผัสผิวด้านบน
บนกระดาษด้านบน



ภาพที่ 4-37 ภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตอนการทดลองต่อมุมสัมผัสผิวด้านล่าง
บนกระดาษด้านล่าง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การผลิตเยื่อวิธีโซดาจากเส้นใยุ่นเพื่อใช้เป็นการทดลองควบคุม

จากการนำุ่นมาผลิตเยื่อกระดาษแบบวิธีโซดาด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า เมื่อมีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้ผลิตผลของเยื่อมีแนวโน้มลดลง ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อที่โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ไม่พบปริมาณต่างที่เหลือ หลังจากการต้มเยื่อ เมื่อเพิ่มระดับโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นร้อยละ 15 พบว่า เริ่มมีปริมาณต่างที่เหลือหลังจากการต้มเยื่อและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ค่าคัปปานัมเบอร์ไม่สามารถหาแนวโน้มได้ แต่พบว่า ที่โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 มีค่าคัปปานัมเบอร์ต่ำสุด คือ 108 เมื่อนำเยื่อที่ผลิตได้จากวิธีโซดาที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่าง ๆ มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่า ปริมาณลิกนินและปริมาณเฮมิเซลลูโลสในเยื่อลดลง

เมื่อนำเยื่อที่ผลิตด้วยวิธีโซดาโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่าง ๆ มาขจัดความหึงงอของเส้นใย ดัชนีความโค้งงอของเส้นใยและดัชนีการหักงอของเส้นใยลดลง ขณะที่ความยาวเส้นใยแบบ LWW มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อนำเยื่อทั้งก่อนและหลังขจัดความหึงงอของเส้นใยมาขึ้นแผ่นและทดสอบสมบัติต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน พบว่า เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น ความหนาแน่น ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุเพิ่มขึ้น แต่ความขาวสว่าง ความทึบแสง และค่ามูมสัมพัทธ์ของน้ำบนกระดาษมีแนวโน้มลดลง ขณะที่การขจัดความหึงงอของเส้นใยทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงด้นทะลุเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกสูงสุด คือ 2.16 (mN m²/g) ความทึบแสง และค่ามูมสัมพัทธ์ของน้ำบนกระดาษเพิ่มขึ้น

สำหรับภาวะที่เหมาะสมที่ใช้เป็นการทดลองควบคุมและจะนำไปทำการทดลองต่อในตอนที่ 2 และตอนที่ 3 ซึ่งเป็นการปรับสภาพเส้นใยก่อนการผลิตเยื่อแบบโซดา พบว่า การต้มเยื่อโดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 และขจัดความหึงงอของเส้นใยก่อนนำไปขึ้นแผ่นทดสอบเป็นภาวะที่เหมาะสมในการเป็นภาวะควบคุมและผลิตเยื่อต่อในตอนที่ 2 และตอนที่ 3 เนื่องจากให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงฉีกที่ดีที่สุด และให้ค่าคัปปานัมเบอร์ต่ำกว่าภาวะอื่น ๆ

5.1.2 การผลิตเยื่อแบบโซดาจากเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

การปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยใช้ระดับและเวลาต่าง ๆ ก่อนนำไปผลิตเยื่อแบบโซดา พบว่า เมื่อปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผลผลิตเยื่อไม่ลดลง เมื่อเทียบกับภาวะควบคุม ปริมาณต่างที่เหลือหลังการต้มเยื่อและค่าค่าป่านัมเบอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นและใช้เวลาในการปรับสภาพนานขึ้น ขณะที่ค่าค่าป่านัมเบอร์ลดลงเมื่อปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่น้อย จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อที่ปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า เมื่อปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณลิกนินและเฮมิเซลลูโลสลดลง ความยาวเส้นใยแบบ LWW และความกว้างของเส้นใยลดลง แต่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้ความหนาแน่นของแผ่นทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองควบคุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพเส้นใยนานขึ้น การปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดึง ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ และความแข็งแรงต่อแรงฉีกเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองควบคุม และเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณน้อยในการปรับสภาพเส้นใย ส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงขึ้นกว่าเมื่อใช้ปริมาณมาก ขณะที่การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณมากในการปรับสภาพเส้นใยส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงฉีกเพิ่มขึ้น

ค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนการต้มเยื่อด้วยส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าภาวะควบคุมเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก alkali darkening ส่วนการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกันให้ค่าความขาวสว่างของชิ้นแผ่นทดสอบไม่ต่างกัน ขณะที่การใช้เวลาปรับสภาพเส้นใยนานขึ้นส่งผลให้ค่าความขาวสว่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีแนวโน้มทำให้ค่าความทึบแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุมเพียงเล็กน้อย โดยเมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากและใช้เวลาในการปรับสภาพนานมีแนวโน้มทำให้ค่าความทึบแสงยิ่งสูงขึ้น ส่วนค่ามอดุลัสของน้ำบนกระดาษส่วนใหญ่มีแนวโน้มลดลงหรือใกล้เคียงกับการทดลองควบคุม โดยเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณสูงขึ้นไปภาวะการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 เวลา 1 สัปดาห์ มีค่ามอดุลัสมากที่สุด

สำหรับภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเยื่อแบบโซดาจากเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ การปรับสภาพเส้นใยด้วยปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์

ร้อยละ 5 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น เวลา 2 สัปดาห์ เนื่องจากภาวะนี้มีค่าดัชนีต่อแรงดึงสูงที่สุด กับมีค่าคัปานัมเบอร์ต่ำ อีกทั้งให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุและดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกที่สามารถยอมรับได้

5.1.3 การผลิตเยื่อแบบโซดาจากเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส

การปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสในระดับและระยะเวลาต่าง ๆ ส่งผลให้ผลผลิตเยื่อลดลงเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม เมื่อใช้เอนไซม์ไลเปสในการปรับสภาพเส้นใยส่งผลให้ปริมาณต่างหลงเหลือหลังจากต้มเยื่อลดลงเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม เมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไลเปสต่ำและเวลาปรับสภาพเส้นใยสั้น ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไลเปสสูงและเวลาปรับสภาพเส้นใยนานขึ้น ปริมาณต่างที่เหลือหลังจากต้มเยื่อมีแนวโน้มลดลง การปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสมีผลให้ค่าคัปานัมเบอร์ ปริมาณลิกนิน ปริมาณแอลฟาเซลลูโลสลดลง หากแต่ปริมาณเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับภาวะควบคุม การเพิ่มระดับเอนไซม์ไลเปสและเวลาปรับสภาพเส้นใยทำให้ปริมาณลิกนินและปริมาณแอลฟาเซลลูโลสลดลง หากแต่ปริมาณเฮมิเซลลูโลสเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เอนไซม์ไลเปสปรับสภาพเส้นใย พบว่า ความยาวเส้นใยแบบ LWW มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ปริมาณเส้นใยขนาดเล็กกลับเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม การปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสส่งผลให้ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีแนวโน้มลดลง หากแต่ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์ไลเปสเพิ่มขึ้น การปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสส่งผลให้แผ่นทดสอบมีค่าความขาวสว่างและความทึบแสงเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับภาวะควบคุม

ส่วนภาวะเหมาะสมของการผลิตเยื่อแบบโซดาของเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปส คือ ปริมาณเอนไซม์ไลเปสร้อยละ 0.25 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น หรือ 250 LU/g ของน้ำหนักแห้งของนุ่น เวลา 3 ชั่วโมง ในการปรับสภาพเส้นใย เนื่องจากภาวะนี้ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและผลผลิตเยื่อสูงที่สุด ขณะที่มีความคัปานัมเบอร์และปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อต่ำ

5.1.4 การผลิตเยื่อแบบโซดาจากเส้นใยนุ่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส หากแต่ลดปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อลงครึ่งหนึ่ง

การผลิตเยื่อแบบโซดาใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น หลังจากปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.25 ของน้ำหนักแห้ง

ของนุ่น เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อดูผลของการลดปริมาณไซโตไคน์ไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษเมื่อเปรียบเทียบกับภาวะที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละการทดลอง พบว่า เยื่อผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปสหากแต่ลดปริมาณสารต้มเยื่อลงครึ่งหนึ่ง มีค่าผลผลิตเยื่อต่ำกว่าปริมาณต่างที่เหลือจากการต้มเยื่อสูงกว่า และมีค่าคัปปานัมเบอร์สูงกว่าเมื่อเทียบกับภาวะที่เหมาะสมของแต่ละการทดลอง ขณะที่ทุกภาวะมีค่าความหนาแน่นที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ภาวะที่เยื่อผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปสหากแต่ลดปริมาณสารต้มเยื่อลงครึ่งหนึ่ง ส่งผลให้ปริมาณลิกนินในเยื่อมีแนวโน้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแต่ละภาวะที่เหมาะสมของการทดลองแต่ละตอน ขณะที่ปริมาณไฮโดรเซลลูโลสและปริมาณเฮมิเซลลูโลสมีแนวโน้มสูงกว่าเมื่อเทียบกับแต่ละภาวะ

ภาวะที่มีการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส หากแต่ใช้ปริมาณไซโตไคน์ไฮดรอกไซด์เพียงครึ่งหนึ่งในการต้มเยื่อ มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าภาวะการทดลองควบคุมและการทดลองที่ได้มาจากรภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส แต่ต่ำกว่าการทดลองที่ได้มาจากรภาวะที่เหมาะสมของการปรับสภาพด้วยไซโตไคน์ไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ภาวะที่มีการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส หากแต่ใช้ปริมาณไซโตไคน์ไฮดรอกไซด์เพียงครึ่งหนึ่งในการต้มเยื่อจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงต่ำกว่าภาวะการทดลองควบคุม แต่จะสูงกว่าภาวะที่เหลือ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาวะที่มีการปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสเหมือนกัน ภาวะซึ่งใช้ปริมาณไซโตไคน์ไฮดรอกไซด์ในการต้มเยื่อน้อยกว่าจะมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่า การปรับสภาพโดยใช้เอนไซม์ไลเปส หากแต่ต้มเยื่อโดยใช้ปริมาณไซโตไคน์ไฮดรอกไซด์เพียงครึ่งหนึ่ง ยังส่งผลให้ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับภาวะอื่น การปรับสภาพโดยใช้เอนไซม์ไลเปสหากแต่ต้มเยื่อโดยใช้ปริมาณไซโตไคน์ไฮดรอกไซด์เพียงครึ่งหนึ่ง ยังให้ค่าความขาวสว่างค่าใกล้เคียงกับภาวะที่เหมาะสมจากการปรับสภาพด้วยไซโตไคน์ไฮดรอกไซด์ แต่มีค่าต่ำกว่าภาวะการทดลองควบคุมและภาวะที่เหมาะสมจากการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปส นอกจากนี้ยังพบว่า การปรับสภาพด้วยเอนไซม์ไลเปสมีค่ามอดูลัสของน้ำบนกระดาษทั้งสองด้านมากกว่าภาวะการทดลองอื่น ๆ

ดังนั้น จากงานวิจัยนี้สามารถกล่าวโดยสรุปรวมได้ว่า เส้นใยนุ่นมีศักยภาพเพียงพอในการนำมาผลิตเป็นเยื่อและกระดาษ การปรับสภาพเส้นใยทั้งด้วยไซโตไคน์ไฮดรอกไซด์และเอนไซม์ไลเปสนั้น สามารถลดระยะเวลาในการเตรียมเยื่อก่อนการผลิตเยื่อแบบโซดาได้ โดยการปรับสภาพเส้นใยยังคงความแข็งแรงของกระดาษและ/หรือช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของกระดาษได้ นอกจากนี้ การปรับสภาพเส้นใยด้วยเอนไซม์ไลเปสยังสามารถลดปริมาณสารต้มเยื่อลง และยังคงความแข็งแรงของเยื่อและกระดาษและยังปรับปรุงสมบัติของกระดาษบางประเภทด้วย แต่ทั้งนี้การ

เลือกวิธีการปรับสภาพเส้นใยด้วยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือเอนไซม์ไลเปสนั้น ควรพิจารณาถึงความต้องการนำเยื่อหรือกระดาษจากนุ่นนี้ไปใช้งาน โดยพิจารณาสมบัติที่ได้เป็นสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในการทดลองการผลิตเยื่อนุ่นแบบโซดานั้นควรใช้วัตถุดิบที่มาจากแหล่งเดียวกัน เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการนำผลมาวิเคราะห์หรือเปรียบเทียบกัน

2) ควรทำการทดลองใช้เอนไซม์คิวทีเนสในการทดลองต่อไป เพื่อดูประสิทธิภาพของเอนไซม์นี้เปรียบเทียบกับเอนไซม์ไลเปส

3) อาจมีการทดลองทำการปรับสภาพเส้นใยด้วยวิธีการทางเคมีร่วมกับวิธีการทางชีวภาพ ก่อนที่จะนำเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพแล้วเข้าสู่การต้มเยื่อต่อไป

4) ควรมีการวิเคราะห์ปริมาณของคิวติน รวมถึงปริมาณของสารแทรก เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลของการปรับสภาพของเส้นใยด้วยวิธีทางเคมีและวิธีทางชีวภาพ ว่ามีผลต่อการกำจัดคิวตินและสารแทรกอย่างไร

รายการอ้างอิง

- [1] กลุ่มอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ (Pulp and paper industry club). ไฟกัศทิศทางอุตสาหกรรมกระดาษ, [ออนไลน์].2009. แหล่งที่มา http://ftiweb.off.fti.or.th/industrialgroup/paper/news_dt.asp?id=5682 [2553, ธันวาคม 24]
- [2] อุทุมพร วงศ์สายสุวรรณ และ สุณีย์ วัฒนชันะกิจ. การผลิตเยื่อกระดาษจากเส้นใยขนุน. โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์, ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [3] Apirakchaiskul, A. The Use of Kapok Fiber to Improve Strength of Paper. Master's Thesis Department of Imaging and Printing Technology Faculty of Science Chulalongkorn University, 2008.
- [4] Bierman, C.J. Essentials of Pulping and Papermaking. San Diego: Academic Press, 1993.
- [5] Gullichsen, J. ,and Paulapuro, H. Papermaking Science and Technology : Chemical Pulping Book 6A. Jyväskylä: Gummerus Printing, 2000.
- [6] Sjöström, E. Wood Chemistry : Fundamentals and applications. 2nd ed. Harcourt Brace Jovanovich, 1992.
- [7] Roberts, J.C. The Chemistry of Paper. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1996.
- [8] Casey, J.P. Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology. 3rd ed. Vol I. New York : John Wiley & Sons, 1980.
- [9] Smook, G. A. Handbook of Pulp & Paper Technologists. 3rd ed. Vancouver, BC, Canada, Angus Wilde Publications, 2002:191-193
- [10] Sjöström, E. ,and Alén, R. Analytical Methods in Wood Chemistry, Pulping, and Papermaking. Berlin: Springer-verlag, 1999.
- [11] Stenius, P. Forest Products Chemistry. 1st ed. Papermaking Science and Technology. Jyväskylä, Finland, Gummerus Printing: p. 34, 35, 43, 2000.
- [12] พืชที่ให้ผลผลิตสำหรับยัดไส้สิ่งของ, [ออนไลน์].2009.แหล่งที่มา:<http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK17/chapter8/t17-8-l2.htm#sect1>, [2009, December 11]
- [13] Kapok, [Online] Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Kapok>, [2009, December 11]
- [14] Kobayashi, Y., Matsuo, R., and Nishiyama, M. Method for Adsorption of Oils. Japanese Patent 52,138,081, 1977.

- [15] Lim, T.T., and Huang, X., Evaluation of Kapok (Ceiba pentandra (L.) Gaertn.) as a Natural Hollow Hydrophobic–Oleophilic Fibrous Sorbent for Oil Spill Cleanup, *Chemosphere*, 66, (2007):955–963
- [16] Huang, X. F., and Lim, T. T. Performance and Mechanism of a Hydrophobic–Oleophilic Kapok Filter for Oil/Water Separation. *Desalination* 190(2006): 297
- [17] Sixta, H. Handbook of Pulp. Vol II. Weinheim: Wiley-VCH, 2006.
- [18] Avinash, P.M., et al. The Influence of Alkali Pretreatment in Lyocell Resin Finishing-Fiber Structure, *Carbohydrate Polymers*, 71(4) (2008):664-671
- [19] ศักยภาพและการประยุกต์ทางเทคโนโลยีชีวภาพ [ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา: <http://www.Std.kku.ac.th/4830500452/งาน/ศักยภาพ.doc> [2554, กุมภาพันธ์ 24]
- [20] ฅกัณฐภักท จินดา.เอนไซม์ไลเปส: แหล่งและประโยชน์ระดับอุตสาหกรรม. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย. 24, 3 (กันยายน-ธันวาคม 2547): 20-34
- [21] Novozymes. Liporase. Product Sheet 2001:1-4
- [22] TAPPI. TAPPI Test Methods. Atlanta: TAPPI Press, 2002.
- [23] Scott , W.E. Properties of Paper, An Introduction. Atlanta: Tappi press, 2000.
- [24] Zhang, W., Okubayashi, S., and Bechtoid, T., Fibrillation Tendency of Cellulosic Fibers-Part 3. Effects of Alkali Pretreatment of Lyocell Fiber, *Carbohydrate Polymers*, 59,2(2005):173-179
- [25] Scott, G.M., Akhtar, M., Lentz, M.J., Kirk, T.K., and Swaney, R., New Technology for Papermaking: Commercializing Biopulping, *TAPPI Journal*, 81,11,1998: 220-225
- [26] Agrawal, P.B., Nierstrasz, V.A., and Warmoeskerken, M.M.C.G., Role of Mechanical Action in Low-Temperature Cotton Scouring with *F.solani pisi* Cutinase and Pectate Lyase , *Enzyme and Microbial Technology*, 42 (2008): 473-482
- [27] Browning, B.L. Method in Wood Chemistry. New York: Interscience Publisher, 1963.

ภาคผนวก

การคำนวณสารเคมีในการผลิตเยื่อและการเตรียมเยื่อ

1. วิธีการหาความชื้นของนุ่นแห้ง

นำนุ่นมาซึ่งน้ำหนักก่อนอบหลังจากนั้นทำการอบที่อุณหภูมิ 106 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้เย็นใน desicator หลังจากนั้นทำการชั่งน้ำหนักหลังอบและนำมาคำนวณหาปริมาณความชื้นของนุ่น ดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความชื้นของนุ่น (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักนุ่นก่อนอบ} - \text{น้ำหนักนุ่นหลังอบ}}{\text{น้ำหนักนุ่นก่อนอบ}} \times 100$$

2. วิธีการคำนวณสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อ

ยกตัวอย่างของภาวะที่มีการใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง กำหนดให้นุ่นมีน้ำหนัก 105 กรัม มีความชื้นร้อยละ 5 และในการต้มเยื่อกำหนดให้มีค่าของเหลวต่อน้ำหนักชิ้นไม้แห้ง (L: W) เป็น 17 ต่อ 1 ซึ่ง NaOH 20 กรัม ละลายในน้ำ 1,695 มิลลิลิตร

3. วิธีการคำนวณน้ำเยื่อไว้ใช้สำหรับการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ

กำหนดให้น้ำหนักของแผ่นขึ้นทดสอบมีน้ำหนักเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร และเครื่องขึ้นแผ่นมีรัศมีเท่ากับ 10.02 เซนติเมตร ดังนั้นพื้นที่ของเครื่องขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบจะมีพื้นที่เท่ากับ 0.0315 ตารางเมตร ถ้าจะทำการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตรจะต้องใช้เยื่อแห้งเท่ากับดังนี้

แผ่นขึ้นทดสอบ 1 ตารางเมตร จะต้องใช้เยื่อแห้งในการขึ้นแผ่น 60 กรัม

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

ฉะนั้นจะต้องใช้เยื่อแห้ง 1.89 กรัมในการขึ้นแผ่นเพื่อทำให้แผ่นขึ้นทดสอบมีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร แต่สถานะจะทำการขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ 10 แผ่น จึงต้องใช้เยื่อทั้งหมดในการขึ้นแผ่นเท่ากับ $1.89 \times 10 = 18.9$ กรัม

4. วิธีการคำนวณเยื่อในการตีกระจายเพื่อกำจัดความหึงงอของเส้นใย

การตีกระจายเยื่อนั้นต้องปรับให้เยื่อมีความเข้มข้นร้อยละ 1.5 เนื่องจากปริมาตรที่เครื่องสามารถรองรับได้เท่ากับ 2 ลิตร จึงกำหนดน้ำเท่ากับ 1.8 ลิตร กำหนดให้เยื่อมีความเข้มข้นร้อยละ 82 ดังนั้น คำนวณเยื่อที่ต้องการได้ดังนี้

ความเข้มข้นร้อยละ 82 แสดงว่าเมื่อชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความเข้มข้น 100 กรัม จะมีเยื่อแห้งอยู่ 18 กรัม

ถ้าต้องการทำให้เยื่อมีความเข้มข้นเท่ากับ 1.5 ปริมาตรทั้งหมด 1800 มิลลิลิตร เยื่อที่หักความชื้นออก (เยื่อแห้ง) เท่ากับ 18 กรัม

ต้องชั่งน้ำหนักเยื่อที่มีความเข้มข้นเท่ากับ $(1.5 \times 1800) / 18 = 150$ กรัม

ดังนั้นต้องชั่งเยื่อที่มีความเข้มข้นร้อยละ 82 มา 150 กรัม เติมน้ำให้มีปริมาตรรวมทั้งหมด 1800 มิลลิลิตร

5. วิธีการคำนวณน้ำเยื่อสำหรับการขึ้นแผ่นทดสอบ

เนื่องจากตามมาตรฐาน TAPPI T 227 om-94 กำหนดให้ใช้ความเข้มข้นของเยื่อเท่ากับร้อยละ 0.3 ในปริมาตรทั้งหมด 1000 มิลลิลิตร เนื่องจากเยื่อที่ผ่านการกำจัดความหึงงอของเส้นใยมีค่าความเข้มข้นเยื่อ เท่ากับ ร้อยละ 1.5 ดังนั้นจะใช้สูตรดังต่อไปนี้ในการตวงปริมาตรน้ำเยื่อเพื่อมาทำการปรับความเข้มข้นของน้ำเยื่อให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.3

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อในเครื่องตีกระจายคือ ร้อยละ 1.5

C_2 = ความเข้มข้นของน้ำเยื่อตามมาตรฐานที่ต้องการคือ ร้อยละ 0.3

V_1 = ปริมาตรน้ำเยื่อทั้งหมดในเครื่องตีกระจาย คือ 1800 มิลลิลิตร

V_2 = ปริมาตรน้ำเยื่อทั้งหมดที่ต้องการ

$$1.5 \times 1800 = 0.3 \times V_2$$

$$V_2 = (1.5 \times 1800) / 0.3$$

$$V_2 = 9000 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้นปริมาตรรวมที่ต้องการคือ 9000 มิลลิลิตร เนื่องจากมีปริมาตรน้ำเยื่ออยู่แล้ว 1800 มิลลิลิตร ฉะนั้นต้องเติมน้ำอีก เท่ากับ 7200 มิลลิลิตร จนมีปริมาตรครบ 9000 มิลลิลิตร

6. วิธีการคำนวณน้ำเยื่อสำหรับดวงขึ้นแผ่นขึ้นทดสอบ

ต้องการขึ้นแผ่นทดสอบให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 60 กรัมต่อตารางเมตร ต้องใช้เยื่อแห้งเท่ากับ 1.89 กรัม (จากการคำนวณตามข้อที่ 3) ต้องตวงน้ำเยื่อดังนี้

น้ำหนักเยื่อ 0.3 กรัม ตวงมาจากน้ำเยื่อ 100 มิลลิลิตร

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

ดังนั้นตวงน้ำเยื่อจำนวน 630 มิลลิลิตรมาทำการขึ้นแผ่น ก็จะได้น้ำหนักแผ่นขึ้นทดสอบที่มีขนาด 60 กรัมต่อตารางเมตร

7. วิธีการคำนวณโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ในการปรับสภาพเส้นใย

ต้องการปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ซึ่งเส้นใยนุ่นมา 500 กรัม น้ำหนักแห้ง ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องใช้สามารถคำนวณได้ดังนี้

น้ำหนักโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 กรัม ของเยื่อแห้ง 100 กรัม

ถ้ามีเยื่อแห้ง 500 กรัม จะได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ $(500 \times 5) / 100 = 25$ กรัม

ดังนั้นชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์มา 25 กรัม ละลายในน้ำ 13 ลิตร จากนั้นนำเยื่อนุ่น 500 กรัม น้ำหนักแห้ง ไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้ตามเวลาที่กำหนด

แต่ถ้าปรับสภาพเส้นใยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ $(500 \times 10) / 100 = 50$ กรัม

8. วิธีการคำนวณเอนไซม์ไลเปสใช้ในการปรับสภาพเส้นใย

เอนไซม์ไลเปสมีแอกทีวิตี เท่ากับ 100 KLU/g ต้องการปรับสภาพเส้นใยนุ่น 500 กรัม น้ำหนักแห้ง ด้วยเอนไซม์ไลเปสร้อยละ 0.25 และ 0.5 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น สามารถคำนวณ ปริมาณเอนไซม์ที่ใช้ต่อกรัมของน้ำหนักแห้งของนุ่นได้ดังนี้

ปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่ใช้เท่ากับ ร้อยละ 0.25 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น โดยใช้นุ่น 500 กรัม น้ำหนักแห้ง

ฉะนั้นจะใช้เอนไซม์ไลเปสทั้งหมดเท่ากับ $(500 \times 0.25) / 100 = 1.25$ กรัม

เนื่องจากเอนไซม์มีค่าแอกทีวิตี เท่ากับ 100 KLU/g

ฉะนั้นจะใช้ปริมาณเอนไซม์ เท่ากับ $100 \times 1.25 = 125$ KLU

ดังนั้นปริมาณเอนไซม์ที่ใช้ต่อกรัมของน้ำหนักแห้งของนุ่นเท่ากับ $125 / 500$ กรัม น้ำหนักแห้งของนุ่น = 0.25 KLU/g หรือ = 250 LU/g

ดังนั้นตวงเอนไซม์ไลเปสมา 1.25 กรัม ใส่ในน้ำ 13 ลิตร นำเยื่อนุ่น 500 กรัม น้ำหนักแห้ง ไปแช่ในเอนไซม์ไลเปสเจือจางด้วยน้ำที่เตรียมไว้ตามเวลาที่กำหนด

ปริมาณเอนไซม์ไลเปสที่ใช้เท่ากับ ร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักแห้งของนุ่น โดยใช้นุ่น 500 กรัม น้ำหนักแห้ง

ฉะนั้นจะใช้เอนไซม์ไลเปสทั้งหมดเท่ากับ $(500 \times 0.5) / 100 = 2.5$ กรัม

เนื่องจากเอนไซม์มีค่าแอกทีวิตี เท่ากับ 100 KLU/g

ฉะนั้นจะใช้ปริมาณเอนไซม์ เท่ากับ $100 \times 2.5 = 250$ KLU

ดังนั้นปริมาณเอนไซม์ที่ใช้ต่อกรัมของน้ำหนักแห้งของนุ่นเท่ากับ $250 / 500$ กรัม น้ำหนักแห้งของนุ่น = 0.5 KLU/g หรือ = 500 LU/g

ดังนั้นตวงเอนไซม์ไลเปสมา 2.5 กรัม ใส่ในน้ำ 13 ลิตร นำเยื่อนุ่น 500 กรัม น้ำหนักแห้ง ไปแช่ในเอนไซม์ไลเปสเจือจางด้วยน้ำที่เตรียมไว้ตามเวลาที่กำหนด

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติส่วนตัว

นางสาวทิพวรรณ หอมไม่เวาย เกิดเมื่อวันที่ 2 พฤษภาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี

ประวัติการศึกษา

- ปี พ.ศ. 2547 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนนครพนมสุตศึกษาลัยจังหวัดสุพรรณบุรี
- ปี พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์(ศูนย์รังสิต)

ผลงานวิชาการ

- Hommaivai, T., Suvanakich, K., Chaiarekij, S. and Kiatkamjornwong, S. (2010). Alkali Pretreatment of Kapok Fiber for Pulping and Papermaking. 1stPolymer Conference of Thailand. October 7-8, 2010. Convention Center, Chulabhorn Research Institute, Bangkok.

รางวัลที่ได้รับ

- Best Oral Presentation Award: Polymers for Food and Agriculture Session. Alkali Pretreatment of Kapok Fiber for Pulping and Papermaking. 1stPolymer Conference of Thailand (PCT-1). October 7-8, 2010. Convention Center, Chulabhorn Research Institute, Bangkok.