

ผลของไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอกต่อปริมาณเพนโทซาน
และความคงทนของกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัส

นายวีระยุทธ อุตมาตย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF XYLANASE IN PREBLEACHING STAGE ON PENTOSAN CONTENT
AND PERMANENCY OF PAPER FROM EUCALYPTUS KRAFT PULP

Mr. Weerayut Utamat

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	ผลของไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอกต่อปริมาณ เพนโทซานและความคงทนของกระดาษจากเยื่อคราฟต์ ยูคาลิปตัส
โดย	นายวีระยุทธ อุตมาตย์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีนาท ประสงค์สุข
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. กุณิณี สุวรรณกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรัญ หาญสืบสาย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีนาท ประสงค์สุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร. กุณิณี สุวรรณกิจ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนกวรรณ เสรีภาพ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ภูวดิ์ ตูจินดา)

วาระยุทธ อุตมัตย์ : ผลของไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอกต่อปริมาณเพนโทซานและความคงทนของกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัส. (EFFECTS OF XYLANASE IN PREBLEACHING STAGE ON PENTOSAN CONTENT AND PERMANENCY OF PAPER FROM EUCALYPTUS KRAFT PULP) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีนันท ประสงค์สุข, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อาจารย์ ดร.กุนทีนี้ สุวรรณกิจ, 134 หน้า.

ในระหว่างกระบวนการต้มเยื่อแบบคราฟต์ ไซแลเนสจะทำปฏิกิริยากับต่างในน้ำยาต้มเยื่อเกิดเป็นกรดเฮกเซนยูโรนิกซึ่งส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของเยื่อในระยะยาว การใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอกอาจจะช่วยกำจัดกรดดังกล่าวออกโดยการทำปฏิกิริยากับเพนโทซานในไซแลน โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของไซแลเนสที่มีต่อปริมาณเพนโทซานในเยื่อตลอดจนสมบัติด้านความแข็งแรงและสมบัติทางแสงของกระดาษจากเยื่อไม้ฟอกและเยื่อฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้งที่ผ่านการใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก ที่ความเข้มข้นต่างๆ (6.2 U/g 18.6 U/g และ 31.0 U/g) เป็นเวลา 60 นาที 90 นาทีและ 120 นาที เปรียบเทียบก่อนและหลังการเร่งอายุกระดาษด้วยความร้อนที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน หรือเร่งอายุด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 340 นาโนเมตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยพบว่าเมื่อใช้ไซแลเนสความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้ปริมาณเพนโทซานในเยื่อลดลง ความขาวสว่างเพิ่มขึ้น ความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง กระดาษมีความเสถียรโดยรวมต่ออิทธิพลของแสงหรือความร้อนลดลง นอกจากนี้พบว่าเมื่อใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก ทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความแข็งแรงต่อแรงฉีกหลังฟอกเพิ่มมากขึ้น ส่วนความขาวสว่างหลังฟอกจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการฟอกนาน 60 นาที กระดาษที่ได้มีความเสถียรโดยรวมต่ออิทธิพลของความร้อนลดลง แต่ความเสถียรของความขาวสว่างหลังฟอกต่ออิทธิพลของแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไม่ได้ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก

สาขาวิชา เทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ...ลายมือชื่อนิสิต.....
ปีการศึกษา 2553.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5272548023 : MAJOR PULP AND PAPER TECHNOLOGY

KEYWORDS : Xylanase / Pentosan / Paper Aging Acceleration / Brightness Stability / Paper Permanency

WEERAYUT UTAMAT : EFFECTS OF XYLANASE IN PREBLEACHING STAGE ON PENTOSAN CONTENT AND PERMANENCY OF PAPER FROM EUCALYPTUS KRAFT PULP. ADVISOR : ASST.PROF. SEHANAT PRASONGSUK, Ph.D., CO-ADVISOR : KUNTINEE SUVARNAKICH, Ph.D., 134. pp.

During kraft pulping process, xylan reacts with alkaline solution to form hexenuronic acid which can affect the brightness stability of the pulp. Using xylanase in prebleaching stage may reduce hexenuronic acid by attacking pentosan in xylan. This research aimed to investigate the effects of xylanase on pentosan content and physical properties as well as optical properties of handsheets made from xylanase-treated unbleached and bleached pulp. Unbleached Eucalyptus kraft pulp was first treated with xylanase at various loads (6.2, 18.6, 31.0 U/g O.D.) for 60, 90 and 120 minutes. Subsequent bleaching was done using hydrogenperoxide at 5 % and 10 % based on an oven-dried weight basis for 60 and 120 minutes. Handsheets were made and acceleratedly aged at 105^oC for 5 days or exposed to 340 nm wavelength light for 2 hours. Paper properties were tested and compared with those of unaged handsheets. It was found that pentosan content, tensile strength and paper stability were reduced while brightness was raised when xylanase concentration in use was increased. In addition, using xylanase in prebleaching stage caused tensile strength and tear strength increase after bleaching. The brightness after bleaching also increased when the bleaching time was 60 minutes. Paper from xylanase-treated bleached pulp was less stable against the influence of heat but brightness stability against light was elevated.

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

Academic Year : 2010..... Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี โดยการอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สีนหาท ประสงค์สุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ อ.ดร. กุณทีนี สุวรรณกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูงที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา และแก้ไข วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์และถูกต้องยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อรัญ หาญสืบสาย หัวหน้าภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางภาพถ่ายและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และตรวจแก้ต้นฉบับให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. กนกวรรณ เสรีภาพ ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ และตรวจแก้ต้นฉบับให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร. ภาวดี ตูจันดา ที่กรุณาเป็นกรรมการ (ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก) ในการสอบวิทยานิพนธ์ และตรวจแก้ต้นฉบับให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ หลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ และหน่วยปฏิบัติการวิจัยการใช้ประโยชน์จากชีวมวลพืช ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ สมาชิกในหลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ และสมาชิกในหน่วยปฏิบัติการวิจัยการใช้ประโยชน์จากชีวมวลพืช ตลอดจนบุคลากรในหลักสูตรเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ ทุกท่าน

สุดท้ายนี้ขอกราบระลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา ผู้วางรากฐานให้โอกาสทางการศึกษา และพี่สาวตลอดจนผู้มีอุปการคุณทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือและเป็นที่กำลังใจที่ดีตลอดมา ทำให้งานวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฅ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3. ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4. ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.5. ข้อจำกัดของการวิจัย.....	2
1.6. คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.7. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.8. วิธีการดำเนินการวิจัย.....	3
1.9. ลำดับขั้นตอนของการเสนอผลการวิจัย.....	4
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1. แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.1.1. อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ.....	6
2.1.2. วัตถุดิบเส้นใย.....	6
2.1.3. การผลิตเยื่อด้วยกรรมวิธีคราฟต์.....	16
2.1.4. การฟอกเยื่อ.....	18
2.1.5. กระบวนการผลิตกระดาษ.....	25
2.2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
3. วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	28
3.1. วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	28

3.1.1. วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	28
3.1.2. วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
3.2. วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.2.1. การผลิตไซแลเนสจากเชื้อยีสต์ <i>Aureobasidium pullulans</i> และการ ตรวจสอบแอกติวิตีของเอนไซม์.....	31
3.2.2. การใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อ.....	32
3.2.3. การศึกษาผลการใช้ไซแลเนสต่อปริมาณเพนโทซาน.....	34
3.2.4. การศึกษาผลของไซแลเนสต่อสมบัติของกระดาษ.....	36
3.2.5. การพอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	38
3.2.6. การศึกษาผลของไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการพอกต่อความคงทน ของกระดาษ.....	40
3.3. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	40
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
4.1. ผลการตรวจวัดแอกติวิตีของไซแลเนส.....	41
4.2. ผลของไซแลเนสต่อปริมาณเพนโทซานในเยื่อกราฟต์ยูคาลิปตัสไม่พอก.....	41
4.2.1. ปริมาณเพนโทซานในเยื่อหลังจากใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยา.....	41
4.2.2. ความสัมพันธ์ระหว่างเพนโทซานในเยื่อ ต่อสมบัติด้านความแข็งแรง และสมบัติทางแสงของกระดาษ.....	44
4.3. ผลของไซแลเนสต่อสมบัติกระดาษจากเยื่อกราฟต์ยูคาลิปตัสไม่พอก.....	46
4.3.1. ความหนาแน่นและความฟาม.....	46
4.3.2. ความขาวและความขาวสว่าง.....	49
4.3.3. ความทึบแสงของกระดาษ.....	52
4.3.4. ความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	54
4.3.5. ความแข็งแรงต่อแรงฉีก.....	57
4.4. ผลของไซแลเนสต่อสมบัติกระดาษจากเยื่อกราฟต์ยูคาลิปตัสที่ผ่านการพอก ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	59
4.4.1. ความหนาแน่นของกระดาษ.....	60
4.4.2. ความขาวและความขาวสว่าง.....	62
4.4.3. ความทึบแสงของกระดาษ.....	66

4.4.4. ความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	68
4.4.5. ความแข็งแรงต่อแรงฉีก.....	70
4.5. ผลของไซแลเนสต่อความคงทนของกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัส ไม่ฟอก.....	72
4.5.1. ความขาวและความขาวสว่าง.....	72
4.5.2. ความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	79
4.5.3. ความแข็งแรงต่อแรงฉีก.....	83
4.6. ผลของไซแลเนสต่อความคงทนของกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสที่ ผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	86
4.6.1. ความขาวและความขาวสว่าง.....	86
4.6.2. ความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	92
4.6.3. ความแข็งแรงต่อแรงฉีก.....	95
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	99
5.1. สรุปผลการวิจัย.....	99
5.1.1. ผลของไซแลเนสต่อปริมาณเพนโทซานในเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัส ไม่ฟอก.....	99
5.1.2. ผลของไซแลเนสต่อสมบัติกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสไม่ฟอก	99
5.1.3. ผลของไซแลเนสต่อสมบัติกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสที่ผ่าน การฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	100
5.1.4. ผลของไซแลเนสต่อความคงทนของกระดาษจากเยื่อคราฟต์ ยูคาลิปตัส.....	101
5.2. ข้อเสนอแนะ	102
รายการอ้างอิง.....	104
ภาคผนวก.....	110
ภาคผนวก ก สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อและวิธีเตรียม.....	111
ภาคผนวก ข การเตรียมสารเคมี.....	112
ภาคผนวก ค การนับเซลล์โดยใช้ Haemocytometer.....	114
ภาคผนวก ง การเตรียมเยื่อและการคำนวณ.....	116
ภาคผนวก จ ข้อมูลทางสถิติ.....	118

บทที่	ญ	หน้า
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....		134

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัสเปรียบเทียบกับไม้สนปรูซ.....	8
2.2	สารเคมีชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการฟอกเยื่อ.....	20
4.1	ปริมาณเพนโทซานในเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ...	42
4.2	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของไซแลเนส ในแต่ละความเข้มข้น ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ต่อปริมาณเพนโทซาน.....	43
4.3	ความหนาแน่นและความฟามของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนส ในแต่ละความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ.....	47
4.4	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของไซแลเนส ในแต่ละความเข้มข้น ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ต่อความหนาแน่นของกระดาษ.....	48
4.5	ความขาวและความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนส ในแต่ละความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ.....	49
4.6	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของไซแลเนส ในแต่ละความเข้มข้น ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ต่อค่าความขาวของกระดาษ.....	50
4.7	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้น ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษ.....	51
4.8	ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสในแต่ละความ เข้มข้นที่เวลาต่างๆ.....	53
4.9	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของไซแลเนส ในแต่ละความเข้มข้น ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ต่อค่าความทึบแสงของกระดาษ.....	54
4.10	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนส ในแต่ละความเข้มข้น ที่เวลาต่างๆ.....	55
4.11	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของไซแลเนส ในแต่ละความเข้มข้น ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ..	57
4.12	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนส ในแต่ละความเข้มข้น ที่เวลาต่างๆ.....	58
4.13	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของไซแลเนส ในแต่ละความเข้มข้น ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ.	59

ตารางที่	ม หน้า
4.14	ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไซแลเนส ภายหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 60
4.15	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาฟอก ต่อค่าความหนาแน่นของกระดาษ..... 62
4.16	ความขาวและความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ ไซแลเนส ภายหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 63
4.17	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาฟอก ต่อค่าความขาวของกระดาษ..... 65
4.18	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาฟอก ต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษ..... 65
4.19	ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไซแลเนส ภายหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 66
4.20	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาฟอก ต่อค่าความทึบแสงของกระดาษ..... 67
4.21	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ ไซแลเนส ภายหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 68
4.22	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาฟอก ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ..... 69
4.23	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ ไซแลเนส ภายหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์..... 70
4.24	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาฟอก ต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ..... 71
4.25	ความขาวและความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกหลังเร่งอายุด้วย ความร้อนหรือด้วยแสง..... 73
4.26	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของไซแลเนส และ เวลาที่ใช้ ต่อค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกหลัง เร่งอายุด้วยความร้อน..... 78
4.27	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของไซแลเนส และ เวลาที่ใช้ ต่อค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกหลัง เร่งอายุด้วยแสง..... 78

ตารางที่	หน้า
4.28	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกหลังเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง..... 80
4.29	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของไซแลเนส และเวลาที่ใช้ ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกหลังเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง..... 82
4.30	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกหลังเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง..... 84
4.31	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของไซแลเนส และเวลาที่ใช้ ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกหลังเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง..... 86
4.32	ความขาวและความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก ภายหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วนำไปเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง..... 87
4.33	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ฟอก ต่อค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อฟอกหลังเร่งอายุด้วยความร้อน..... 90
4.34	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ฟอก ต่อค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อฟอกหลังเร่งอายุด้วยแสง..... 91
4.35	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก ภายหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วนำไปเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง..... 93
4.36	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ฟอก ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากเยื่อฟอกหลังเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง..... 95
4.37	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก ภายหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วนำไปเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง..... 96

ตารางที่

หน้า

- 4.38 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ฟอก ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อฟอกหลังเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง..... 98

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2-1	องค์ประกอบของเนื้อไม้ของพีชใบเลี้ยงคู่.....	7
2-2	ลักษณะการจัดเรียงตัวขององค์ประกอบในชั้นผนังเซลล์.....	10
2-3	การจัดเรียงตัวของกลูโคสจนเป็นเส้นใยในเซลลูโลสในผนังเซลล์พีชและ ลักษณะของสากการจัดเรียงตัวของไมโครไฟบริลในผนังเซลล์พีชชั้นต่างๆ.....	10
2-4	โครงสร้างของเซลลูโลส แสดงกลูโคสสองหน่วยที่ต่อกันทำให้เกิดเป็น เซลโลไบโอส.....	11
2-5	การเรียงตัวโมเลกุลของสายพอลิเมอร์เซลลูโลสไมโครไฟบริล.....	12
2-6	โครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลมอนอเมอร์ในเฮมิเซลลูโลส.....	13
2-7	โครงสร้างของไซแลนที่มีมอนอเมอร์ ดี-ไซโลส เชื่อมต่อด้วยพันธะบีตา-1,4- ไซโลซิดิกประกอบขึ้นเป็นสายโซ่หลัก โดยมีน้ำตาลดี-กลูโคสเป็นกิ่งแขนง.....	13
2-8	โครงสร้างของลิกนินโดยมีหน่วยย่อยเป็นฟีนิวโพรเพนและอะลิฟาติกในไม้ สปรูซ.....	15
2-9	การเปลี่ยนแปลงของ 4-โอ-เมทิลกลูคูโรโนไซแลน ไปเป็นเฮกเซนยูโรโนไซแลน ในระหว่างการผลิตเยื่อแบบคราฟต์.....	17
2-10	หมู่ฟังก์ชันของกรดเฮกเซนยูโรนิกที่ติดอยู่กับไซแลน.....	18
2-11	โครงสร้างของไซแลนและการย่อยสลายไซแลนโดยเอนไซม์ เอนโดไซแลเนส แอลฟา-ดี-กลูคูโรนซิเดส และแอลฟา-แอล-อะราบิโนฟิวราโนซิเดส.....	24
2-12	เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Fourdrinier.....	25
3-1	แผนผังแสดงการใช้ไซแลเนสช่วยฟอกที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ.....	33
3-2	การต่อชุดอุปกรณ์การกลั่นสกัด.....	34
3-3	เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid Köthen.....	36
3-4	แผนผังแสดงการใช้ไซแลเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อ.....	38
4-1	ผลของไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้นต่อปริมาณเพนโทซานที่เวลาการทำ ปฏิกิริยาต่างๆ.....	43
4-2	ความสัมพันธ์ระหว่างเพนโทซานและความแข็งแรงต่อแรงดึง.....	44
4-3	ความสัมพันธ์ระหว่างเพนโทซานและความแข็งแรงต่อแรงฉีก.....	45
4-4	ความสัมพันธ์ระหว่างเพนโทซานและความขาวสว่าง.....	46

รูปที่	ณ หน้า
4-5	ผลของไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้น ทำปฏิกิริยากับเยื่อที่เวลาต่างๆ ต่อความหนาแน่นของกระดาษ..... 48
4-6	ผลของไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้น ทำปฏิกิริยากับเยื่อที่เวลาต่างๆ ต่อความขาวสว่างของกระดาษ..... 50
4-7	ผลของไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้น ทำปฏิกิริยากับเยื่อที่เวลาต่างๆ ต่อความขาวสว่างของกระดาษ..... 51
4-8	ผลของไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้น ทำปฏิกิริยากับเยื่อที่เวลาต่างๆ ต่อความทึบแสงของกระดาษ..... 54
4-9	ผลของไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้น ทำปฏิกิริยากับเยื่อที่เวลาต่างๆ ต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ..... 56
4-10	ผลของไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้น ทำปฏิกิริยากับเยื่อที่เวลาต่างๆ ต่อความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ..... 58
4-11	ผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 % และ 10 % เป็นเวลา 60 และ 120 นาที ต่อความหนาแน่นของกระดาษ เปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ใช้ไซแลเนสและการทดลองควบคุม..... 61
4-12	ผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 % และ 10 % เป็นเวลา 60 และ 120 นาที ต่อความขาวของกระดาษ เปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ใช้ไซแลเนสและการทดลองควบคุม..... 63
4-13	ผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 % และ 10 % เป็นเวลา 60 และ 120 นาที ต่อความขาวสว่างของกระดาษ เปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ใช้ไซแลเนสและการทดลองควบคุม..... 64
4-14	ผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 % และ 10 % เป็นเวลา 60 และ 120 นาที ต่อความทึบแสงของกระดาษ เปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ใช้ไซแลเนสและการทดลองควบคุม..... 67
4-15	ผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 % และ 10 % เป็นเวลา 60 และ 120 นาที ต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ เปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ใช้ไซแลเนสและการทดลองควบคุม..... 69
4-16	ผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 % และ 10 % เป็นเวลา 60 และ 120 นาที ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ เปรียบเทียบ

รูปที่	หน้า
	อายุด้วยแสง..... 88
4-27	การเปลี่ยนแปลงของค่าความยาวสว่างของกระดาษจากเยื่อฟอก ที่ใช้ไซแลเนส ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยความร้อนเปรียบเทียบกับ ก่อนเร่งอายุด้วยความร้อน..... 89
4-28	การเปลี่ยนแปลงของค่าความยาวสว่างของกระดาษจากเยื่อฟอก ที่ใช้ไซแลเนส ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยแสงเปรียบเทียบกับก่อนเร่ง อายุด้วยแสง..... 90
4-29	การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากเยื่อฟอก ที่ใช้ไซแลเนสที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยความร้อน เปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยความร้อน..... 93
4-30	การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อฟอก ที่ใช้ไซแลเนสที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยแสง เปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยแสง..... 94
4-31	การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อฟอก ที่ใช้ไซแลเนสที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยความร้อน เปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยความร้อน..... 97
4-32	การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อฟอก ที่ใช้ไซแลเนสที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยแสง เปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยแสง..... 97

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไม้อยู่คาลิปตัสเป็นแหล่งวัตถุดิบเส้นใยสั้น ที่ถูกใช้ป้อนเข้าสู่สายการผลิตหลักในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษทั่วโลกรวมทั้งประเทศไทย ด้วยเหตุผลที่สามารถปลูกทดแทนได้ในระยะเวลาอันสั้น ทำให้สามารถส่งเข้ากระบวนการแปรรูปได้อย่างต่อเนื่อง กอปรกับคุณภาพของผลผลิตเยื่อที่ได้ยังคงอยู่ในระดับสูงตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน อีกทั้งยังสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์กระดาษได้หลากหลายชนิด แต่เนื่องจากสถานการณ์ด้านมลภาวะเป็นพิษจากส่วนการผลิตและกระแสแรงกดดันด้านสิ่งแวดล้อม ทำให้ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษทั่วโลกต่างหันมาให้ความสำคัญกับกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น ซึ่งกระบวนการฟอกเป็นอีกหนึ่งขั้นตอนที่มีการปลดปล่อยของเสียเป็นพิษออกมามากที่สุด ดังนั้นการนำเอาความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีชีวภาพมาประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการฟอก สามารถลดของเสียที่เป็นพิษในระบบเหล่านั้นลงได้ พร้อมทั้งยังย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ [1] โดยไซแลเนสเป็นหนึ่งในเอนไซม์ที่มีประสิทธิภาพ และได้รับความนิยมในการนำมาช่วยฟอกเพื่อเป็นการลดสารเคมีที่เป็นพิษในกระบวนการฟอกเยื่อลง [2] ในขณะที่ได้ความขาวสว่างเพิ่มมากขึ้น [3] ทั้งนี้นอกจากจะช่วยเพิ่มด้านความขาวสว่างแล้ว ไซแลเนสยังอาจมีส่วนช่วยในการกำจัดกรดเฮกเซนยูโรนิกที่เกิดขึ้นเมื่อไซแลนทำปฏิกิริยากับต่างในน้ำยาต้มเยื่อ โดยกรดดังกล่าวจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการฟอกโดยรวม รวมถึงเป็นต้นเหตุสำคัญของการสิ้นเปลืองสารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกและสารเคมีที่ใช้ปรับสภาวะของการฟอกให้เหมาะสม [4] ตลอดจนความเสถียรของความขาวสว่าง อีกทั้งความคงทนของผลผลิตกระดาษในระยะยาว โดยสามารถพิจารณาจากปริมาณเพนโทซานและสมบัติของกระดาษที่เปลี่ยนแปลงไป ในแต่ละปริมาณไซแลเนสที่ใช้ ณ เวลาต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังการเร่งอายุของกระดาษ ซึ่งเป็นการศึกษาหลักของงานวิจัยนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาผลของไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอกต่อปริมาณเพนโทซานของเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสฟอกและไม่ฟอก

1.2.2 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงแสงก่อนและหลังการเร่งอายุของกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนส กับเยื่อที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาผลของไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก ต่อปริมาณเพนโทซานของเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัส โดยใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสที่ 0.0U/g (ชุดการทดลองควบคุม), 6.2U/g, 18.6U/g และ 31.0U/g ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เป็นเวลา 60, 90 และ 120 นาทีที่ค่าความเป็นกรด - ด่างเท่ากับ 5.5 ± 0.2 ในแต่ละความเข้มข้นของไซแลเนส นำเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสไปทำการกลั่นสกัด แล้วนำของเหลวที่กลั่นสกัดได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณเพนโทซานในเยื่อ หลังจากนั้นนำเยื่อที่เหลือไปขึ้นเป็นแผ่นกระดาษ โดยให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 75 กรัมต่อตารางเมตร และนำกระดาษที่ได้ส่วนหนึ่งไปวัดสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความขาว ความขาวสว่าง ความทึบแสง ความหนาแน่น ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ แบ่งกระดาษส่วนที่เหลือออกเป็นสองชุด เพื่อนำไปทำการเร่งอายุด้วยแสงหรือด้วยความร้อน แล้วนำไปวัดสมบัติต่างๆ ของกระดาษหลังผ่านการเร่งอายุเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุจากทั้งสองลักษณะการเร่งพิจารณาเลือกสภาวะของการทดลองที่ให้ปริมาณเพนโทซานในเยื่อต่ำที่สุดที่ยังคงรักษาสมบัติต่างๆ ในระดับที่เหมาะสมไว้ได้เพื่อทำการทดลองซ้ำอีกครั้งควบคู่กับชุดการทดลองควบคุม โดยนำเยื่อที่ได้ไปฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่ร้อยละ 5 และ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เป็นเวลา 60 และ 120 นาทีที่ค่าความเป็นกรด - ด่างเท่ากับ 10.0 ± 0.2 นำเยื่อที่ผ่านการฟอกไปขึ้นเป็นแผ่นกระดาษให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 75 กรัมต่อตารางเมตร แบ่งกระดาษออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งนำไปวัดสมบัติต่างๆ และแบ่งกระดาษส่วนที่เหลือเป็นสองชุดเพื่อนำไปทำการเร่งอายุด้วยแสงหรือด้วยความร้อน แล้วนำมาวัดสมบัติต่างๆ ของกระดาษหลังผ่านการเร่งอายุเพื่อเปรียบเทียบกับก่อนและหลังการเร่งอายุจากทั้งสองลักษณะการเร่งอีกครั้ง

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

การทดลองจะศึกษาและเปรียบเทียบปริมาณเพนโทซาน ในแต่ละความเข้มข้นของไซแลเนสที่ใช้ที่เวลาต่างๆ เปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสที่ผ่านการใช้ไซแลเนส และเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสแล้วนำไปฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ก่อนและหลังการเร่งอายุด้วยแสงหรือด้วยความร้อน

1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย

การควบคุมอัตราการกลั่นสกัดของเหลวที่ได้ ในขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณเพนโทซานอาจทำได้ยาก หากการเดือดและปริมาตรของกรดซัลฟิวริกในพลาสติกก้นกลมไม่คงที่ เนื่องจากความร้อนที่ให้และการเติมกรดลงในพลาสติกก้นกลมไม่สม่ำเสมอ

1.6 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

การใช้เทคโนโลยีทางชีวภาพมาช่วยฟอกเป็นการใช้เอนไซม์ เช่น ไซแลเนส มาใช้ในการฟอกเยื่อ เพื่อเป็นการลดใช้สารเคมีในการฟอก และยังคงช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการ เช่น ความเสถียรของความขาวสว่างของกระดาษ ให้เพิ่มสูงขึ้นได้ นอกจากนี้ เอนไซม์ยังสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ทำให้เป็นการช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย

การฟอกเยื่อเป็นการปรับปรุงความขาวสว่างของเยื่อให้สูงขึ้น เนื่องจากเยื่อไม่ฟอกที่ได้จากระบวนการผลิตวิธีคราฟต์มักจะมีค่าความขาวสว่างไม่สูงมากนัก แต่สามารถเพิ่มค่าความขาวสว่างสุดท้ายขึ้นได้ด้วยการฟอกเยื่อ

การเร่งอายุกระดาษเป็นการนำกระดาษไปผ่านสภาวะที่รุนแรง เช่น สภาวะที่กระดาษได้รับแสงหรือได้รับความร้อนจัดเป็นเวลาดำเนินเรื่อง เสมือนกระดาษได้ผ่านสภาวะนั้นๆ อย่างไม่รุนแรงเป็นเวลานาน

ความเสถียรของกระดาษคือความทนต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของกระดาษ เมื่อถูกเก็บหรือถูกใช้เป็นเวลานาน หรือเมื่อกระดาษได้รับการเร่งอายุ โดยหากมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ไปในทางลบน้อยลง แสดงว่ากระดาษมีความเสถียรมากขึ้น

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบผลของไซแลเนสต่อปริมาณเพนโทซานในเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัส รวมถึงทราบผลของไซแลเนสต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงแสงของกระดาษก่อนและหลังการเร่งอายุด้วยแสงหรือด้วยความร้อน แล้วนำผลที่ทราบไปประยุกต์ใช้งานจริงในส่วนกระบวนการฟอกในโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

1.8 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.8.1 ค้นคว้าเอกสาร ข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.8.2 ศึกษาวิธีการทดลอง เตรียมตัวอย่างและอุปกรณ์
- 1.8.3 วางแผนการทดลองและทำการทดลองตามขั้นตอน
- 1.8.4 วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้และสรุปผลการทดลอง

1.8.5 เรียบเรียงเนื้อหาเพื่อส่งผลงานไปเผยแพร่ และเขียนวิทยานิพนธ์

1.9 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ในการเสนอผลการวิจัย จะนำเสนอตามลำดับขั้นตอนของการทดลองที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษ ดังนี้

1.9.1 อิทธิพลของไซแลเนส ที่มีผลต่อปริมาณเพนโทซานในเยื่อคราฟต์ไม่พอกจากไม้ยูคาลิปตัส

1.9.2 อิทธิพลของไซแลเนส ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษจากเยื่อคราฟต์ไม่พอกจากไม้ยูคาลิปตัส

1.9.3 อิทธิพลของไซแลเนส ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสที่ผ่านการพอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1.9.4 อิทธิพลของไซแลเนส ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัส หลังผ่านการเร่งอายุด้วยแสงหรือด้วยความร้อน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษจัดเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ ซึ่งอัตราการขยายตัวของอุตสาหกรรมนี้สามารถเป็นตัวชี้วัดให้เห็นถึงความก้าวหน้าทางสังคมและการขยายตัวทางเศรษฐกิจได้ โดยปริมาณการบริโภคกระดาษของคนไทยในปี 2548 มีเพียง 50 กิโลกรัมต่อคนต่อปี ในขณะที่ประเทศอื่นในเอเชีย เช่น เกาหลีใต้ ไต้หวัน และญี่ปุ่นมีอัตราการบริโภคกระดาษที่สูงกว่าประเทศไทย กล่าวคือประเทศเกาหลีใต้มีการบริโภคกระดาษประมาณ 169 กิโลกรัมต่อคนต่อปี ในขณะที่ประเทศไต้หวันและญี่ปุ่นมีการบริโภคกระดาษประมาณ 206 และ 241 กิโลกรัมต่อคนต่อปีตามลำดับ [5] ซึ่งจะเห็นได้ว่าประเทศที่มีการพัฒนาแล้วจะมีการบริโภคกระดาษต่อคนเป็นจำนวนที่สูงมาก ดังนั้นการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคมของประเทศจึงเป็นตัวกระตุ้นหนึ่งที่สำคัญต่อการเพิ่มศักยภาพในการผลิต และการขยายตัวของอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษให้เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและสังคมจะช่วยส่งผลให้เกิดความต้องการใช้กระดาษและผลิตภัณฑ์ต่างๆจากกระดาษเพิ่มสูงขึ้น

อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษของไทยเริ่มต้นขึ้นในปี พ.ศ. 2466 จากการก่อตั้งโรงงานผลิตกระดาษแห่งแรก คือ โรงงานกระดาษสามเสน ของกรมแผนที่ทหารบก กระทรวงกลาโหม โดยใช้เศษกระดาษเป็นวัตถุดิบ และสามารถผลิตกระดาษได้วันละ 1 ตัน ต่อมารัฐบาลได้ก่อตั้งโรงงานกระดาษกาญจนบุรีในปี พ.ศ. 2478 ซึ่งโรงงานนี้ใช้ไม้เป็นวัตถุดิบ โดยทำการผลิตทั้งเยื่อและกระดาษพิมพ์เขียน มีกำลังการผลิต 10 ตันต่อวัน ต่อมาได้โอนกิจการโรงงานทั้งสองมาขึ้นกับกรมโรงงานอุตสาหกรรมเมื่อมีการจัดตั้งกระทรวงอุตสาหกรรมขึ้นในปี พ.ศ. 2485 หลังจากนั้นจึงได้มีการจัดตั้งโรงงานกระดาษบางปะอินในปี พ.ศ. 2488 โดยใช้ฟางข้าวและหญ้าขจรจบเป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ มีกำลังการผลิตประมาณปีละ 9,000 ตัน และผลิตกระดาษพิมพ์เขียนได้ประมาณปีละ 12,000 ตัน สำหรับภาคเอกชนได้เริ่มเข้ามามีบทบาทในช่วงปี 2490 เป็นต้นมา โดยที่รัฐบาลได้เริ่มให้มีการส่งเสริมการลงทุนแก่อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษตั้งแต่ปี พ.ศ. 2505 ทั้งนี้โรงงานที่ตั้งขึ้นในระยะแรกเป็นการผลิตกระดาษประเภทต่างๆ ส่วนการผลิตเยื่อกระดาษเพิ่งเริ่มขึ้นอย่างจริงจังในปลายปี พ.ศ. 2525 ซึ่งผลิตเยื่อใยสั้นเท่านั้น ทำให้

ประเทศไทยสามารถส่งออกเยื่อกระดาษบางส่วนไปจำหน่ายในต่างประเทศได้ แต่ในขณะเดียวกัน ก็ยังคงต้องพึ่งพาการนำเข้าด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะการนำเข้าเยื่อใยยาวที่ไม่สามารถผลิตได้ในประเทศ [6] แหล่งนำเข้าเยื่อกระดาษที่สำคัญ ได้แก่ แคนาดา สหรัฐอเมริกา นิวซีแลนด์ ชิลี ส่วนเยื่อกระดาษที่ส่งออกนั้นจะเป็นเยื่อใยสั้น แหล่งส่งออกที่สำคัญ คือ เกาหลีใต้ ญี่ปุ่น และกลุ่มสหภาพยุโรป

2.1.2 วัตถุดิบเส้นใย

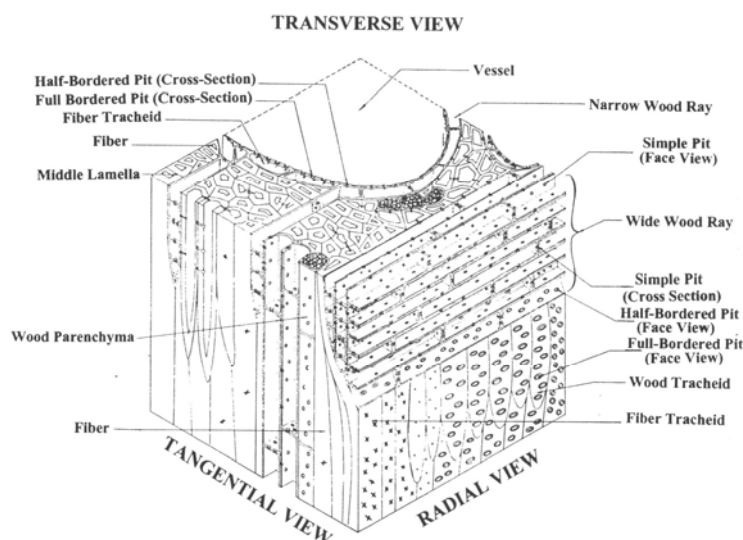
วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อ เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตเยื่อเพื่อใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์กระดาษ นอกจากนี้ยังเป็นตัวกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์กระดาษที่ได้อีกด้วย โดยมีแหล่งวัตถุดิบเส้นใยธรรมชาติจากพืชที่ไม่มีเนื้อไม้ (Non woody fiber) เช่น ฝ้าย ชานอ้อย ข้าวโพด ฟางข้าว เป็นต้น และพืชที่มีเนื้อไม้ (Wood fiber) เช่น สน ยูคาลิปตัส กระถิน เป็นต้น ซึ่งเส้นใยที่ได้จากพืชที่มีเนื้อไม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะของเส้นใย คือ เส้นใยของพืชเมล็ดเปลือย (Softwood) และเส้นใยจากเนื้อไม้ของพืชใบเลี้ยงคู่ (Hardwood)

2.1.2.1 เนื้อไม้ของพืชเมล็ดเปลือย (Softwood)

พืชเมล็ดเปลือย (Gymnosperm) มีลักษณะใบที่เล็กและแคบ ส่วนใหญ่เป็นพืชตระกูลสน มีโครงสร้างในแนวตั้งประกอบขึ้นด้วยเซลล์ที่เกือบทั้งหมดมีลักษณะยาวเรียว เรียกว่า เทรคีด (Tracheid) มีปริมาณ 90 - 95% เทรคีดมักจะมีควมยาวประมาณ 2 - 4 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 0.02 - 0.04 มิลลิเมตร [7] ทำหน้าที่ด้านความแข็งแรงและด้านการลำเลียงน้ำไปตาม เทรคีดผนังบางในไม้ต้นฤดูผ่านช่องเปิดมีขอบ (Bordered pits) เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างไม้ต้นฤดู (Earlywood) และไม้ปลายฤดู (Latewood) พบว่าเทรคีดในไม้ปลายฤดูมักจะมีลักษณะที่ยาวและแคบกว่าในไม้ต้นฤดู [1] ในพืชเมล็ดเปลือยบางชนิดอาจมีท่อเรซิน (Resin canal) ในแนวตั้งด้วย ส่วนระบบการลำเลียงสารในแนวนอนประกอบขึ้นจากเรย์เซลล์ (Ray cell) (5 - 10%) โดยเรย์เซลล์มี 2 ลักษณะคือ เรย์พาเรงคิมา (Ray parenchyma) เป็นเซลล์ที่มีชีวิตผนังบาง พบได้ในพืชเมล็ดเปลือยหลายชนิด และเรย์เทรคีด (Ray tracheid) มักมีขนาดที่เท่าๆ กัน ทำหน้าที่ในการลำเลียงน้ำทางด้านข้าง ซึ่งจะพบเรย์เทรคีดในพืชเมล็ดเปลือยบางชนิดเท่านั้น [8] เส้นใยที่ได้จากพืชเมล็ดเปลือยจะมีความยาวประมาณ 3 - 5 มิลลิเมตร มีความเหนียวและความแข็งแรงสูง

2.1.2.2 เนื้อไม้ของพืชใบเลี้ยงคู่ (Hardwood)

พืชใบเลี้ยงคู่มีเซลล์หลายชนิดเป็นองค์ประกอบซึ่งทำหน้าที่แตกต่างกันออกไปซึ่งเซลล์ชนิดที่สำคัญที่สุดคือ ลิบริฟอร์มเซลล์ (Libriform cell) ไฟเบอร์เทรเคอิด (Fiber tracheid) เวสเซล (Vessel) และเซลล์พาเรงคิมา (Parenchyma cell) โดยส่วนใหญ่ในโครงสร้างแนวตั้งจะประกอบขึ้นด้วยเซลล์ 2 ลักษณะคือ เซลล์ที่มีลักษณะค่อนข้างยาวและแคบ ผนังหนา ช่องว่างภายในเซลล์ขนาดเล็ก มีช่องเปิดแบบไม่มีขอบ (Simple pit) เรียกว่า ลิบริฟอร์มเซลล์ ส่วนเซลล์ที่มีลักษณะที่สั้นและกว้างกว่า ผนังบางกว่า มักเรียงต่อกันเป็นท่อยาวทำให้มีประสิทธิภาพในการลำเลียงน้ำสูงกว่าเซลล์เทรเคอิดในไม้ของพืชเมล็ดเปลือย เรียกเซลล์ชนิดนี้ว่า เวสเซล โดยเวสเซลในไม้จากพืชชนิดนี้โดยทั่วไป จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่พอที่จะสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าในด้ามตัดขวาง (Cross-section) ของเนื้อไม้ ซึ่งจะเรียกว่าพอร์ (Pore) หรือมองเห็นร่องยาวเป็นชุดๆ ในแนวตั้ง นอกจากนี้ยังอาจพบพาเรงคิมาในแนวตั้งและแนวนอนได้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2-1 ขนาดของเวสเซลจะแตกต่างกันออกไปในไม้ต้นฤดู (Earlywood) และไม้ปลายฤดู (Latewood) ภายในวงปี (Annual ring) ของไม้ [8] เส้นใยที่ได้จากพืชชนิดนี้จะมีขนาดเล็กและละเอียด ความแข็งแรงค่อนข้างน้อย ความยาวเส้นใยประมาณ 1 - 2 มิลลิเมตร



รูปที่ 2-1 องค์ประกอบของเนื้อไม้ของพืชใบเลี้ยงคู่ [8]

ไม้ยูคาลิปตัส

ยูคาลิปตัสเป็นไม้ต่างประเทศ มีมากกว่า 700 ชนิด มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปออสเตรเลียเป็นส่วนใหญ่ ประเทศไทยได้เริ่มนำยูคาลิปตัสชนิดต่างๆ มาทดลองปลูกประมาณปี

พ.ศ. 2493 แต่ได้มีการทดลองกันจริงๆ เมื่อประมาณ พ.ศ. 2507 ปรากฏว่า ไม้ยูคาลิปตัส คามาสดูเลนซิส (*Eucalyptus camaldulensis*) สามารถเจริญเติบโตได้ในแทบทุกสภาพพื้นที่ และมีอัตราการเจริญเติบโตสูงจึงนิยมปลูกกันอย่างแพร่หลาย สามารถเจริญเติบโตได้ในทุกสภาพของดินแทบทุกประเภทตั้งแต่ในที่ริมน้ำ ที่ราบน้ำท่วมบางระยะในรอบปี แม้แต่ในดินที่เป็นทรายและมีความแห้งแล้งติดต่อกันเป็นเวลานาน พื้นที่ดินเลวที่มีปริมาณน้ำฝนน้อยกว่า 650 มม.ต่อปี รวมทั้งพื้นที่ที่มีดินเค็ม ดินเปรี้ยว แต่จะไม่ทนทานในดินที่มีหินปูนสูง เนื้อไม้สามารถนำไปแปรรูปทำเยื่อ ไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งมูลค่าผลผลิตเยื่อไม้ราคาตันละ 17,000 บาท โดยท่อนไม้ยูคาลิปตัส 4.5 ตัน ผลิตเยื่อไม้ได้ 1 ตัน เยื่อไม้ให้สารพวกเซลลูโลส ซึ่งนำไปใช้ทำเส้นใยเรยอนและทำผ้าแทนเส้นใยฝ้าย และปยุ่นุ่นได้อีกด้วย โดยมูลค่าเพิ่มขึ้นเป็นตันละ 60,000 บาท และเมื่อนำเส้นใยเรยอนมาปั่นเป็นเส้นด้าย และทอเป็นผ้า จะมีมูลค่าสูงถึง ตันละ 75,000 บาท และ 300,000 บาท ตามลำดับ ในการปลูกไม้ยูคาลิปตัสเพื่ออุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ เฟอร์นิเจอร์ หรือไม้ที่ใช้ในการก่อสร้างที่ต้องการไม้ขนาดโต ควรใช้ระยะปลูก 2x3, 2x4 หรือ 4x4 เมตร ซึ่งจะปลูกได้ 100 - 270 ต้น/ไร่ สามารถตัดมาเพื่ออุตสาหกรรมอื่นๆ ได้เมื่ออายุ 3 ปี ขึ้นไป ส่วนไม้เพื่อการก่อสร้างต้องมีอายุมากกว่า 5 ปี การปลูกระยะห่างนั้น ในปีที่ 1 - 2 สามารถปลูกพืชเกษตรควบลงในระหว่างต้นและแถวของไม้ได้ เป็นการให้พื้นที่ให้เป็นประโยชน์อย่างเต็มที่ และยังมีรายได้ระหว่างคอยผลจากต้นไม้อีกด้วย [9] เยื่อไม้ยูคาลิปตัสมีสมบัติเด่นคือ มีความฟูสูง และมีความทึบแสง ประกอบกับไฟเบอร์มีความแข็งแรงเหมาะต่อการใช้ทำกระดาษพิมพ์เขียนประเภทต่างๆ โดยได้แสดงองค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัสไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัสเปรียบเทียบกับไม้สน (Spruce) [10]

องค์ประกอบทางเคมี	นอร์เวย์ สน (%)	ยูคาลิปตัส (%)
เซลลูโลส (Cellulose)	42	51
ลิกนิน (Lignin)	27	28
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)		
กลูโคแมนแนน (Glucomannan)	16	2.0
กลูคูโรโนไซแลน (Glucuronoxylan)	8.6	13
พอลิแซ็กคาไรด์ชนิดอื่น (Other polysaccharides)	3.4	*
สารแทรก (Total extractives)	1.7	2.0
สารอนินทรีย์ (Residual inorganic materials)	0.9	*

* ยังไม่มีการวิเคราะห์

2.1.2.3 การจัดเรียงตัวขององค์ประกอบผนังเซลล์พืช

ผนังเซลล์พืชมีความหนาบางไม่เท่ากัน ขึ้นกับบทบาทหน้าที่ที่มีต่อโครงสร้างพืช และอายุของเซลล์ โดยชั้นของเซลลูโลสจะประกอบกันเป็นผนังเซลล์ชั้นแรก (Primary wall) โดยชั้นนอกของผนังเซลล์ชั้นแรก เรียกว่าส่วนมิดเดิลลามลลา (Middle lamella) ส่วนชั้นในของผนังเซลล์ชั้นแรกเป็นส่วนผนังเซลล์ชั้นที่สอง (Secondary wall) (รูปที่ 2-2)

ชั้นมิดเดิลลามลลา

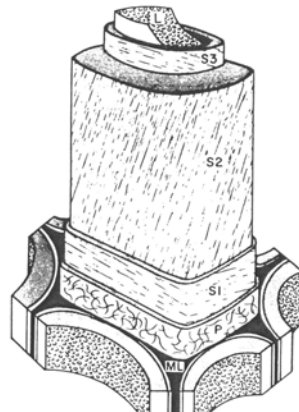
มิดเดิลลามลลาเป็นส่วนที่อยู่ระหว่างเส้นใย ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างเส้นใย ประกอบด้วยสารประเภทเพกติก (Pectic substances) เมื่อพืชเจริญขึ้น มีการสร้างลิกนินก็จะมีลิกนินเกิดขึ้นบริเวณนี้ก่อน แล้วจึงเกิดต่อไปยังผนังเซลล์ชั้นแรก และผนังเซลล์ชั้นที่สอง ดังนั้นมิดเดิลลามลลาจึงเป็นชั้นที่มีความเข้มข้นของลิกนินอยู่มากที่สุด

ชั้นผนังเซลล์ชั้นแรก

ผนังเซลล์ชั้นแรกเป็นส่วนที่มีผนังบาง มีความหนาประมาณ 0.1 - 0.2 ไมโครเมตร ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เพกติน เอนไซม์ และไกลโคโปรตีน ผนังเซลล์ชั้นแรกสามารถมีลิกนินได้ เซลล์ในชั้นนี้อยู่ในระยะเจริญ และมักจะมีการแบ่งตัวเกิดขึ้นได้ เซลล์เหล่านี้ทำหน้าที่เช่น สังเคราะห์ด้วยแสง หายใจ และส่งผ่านสารต่างๆ

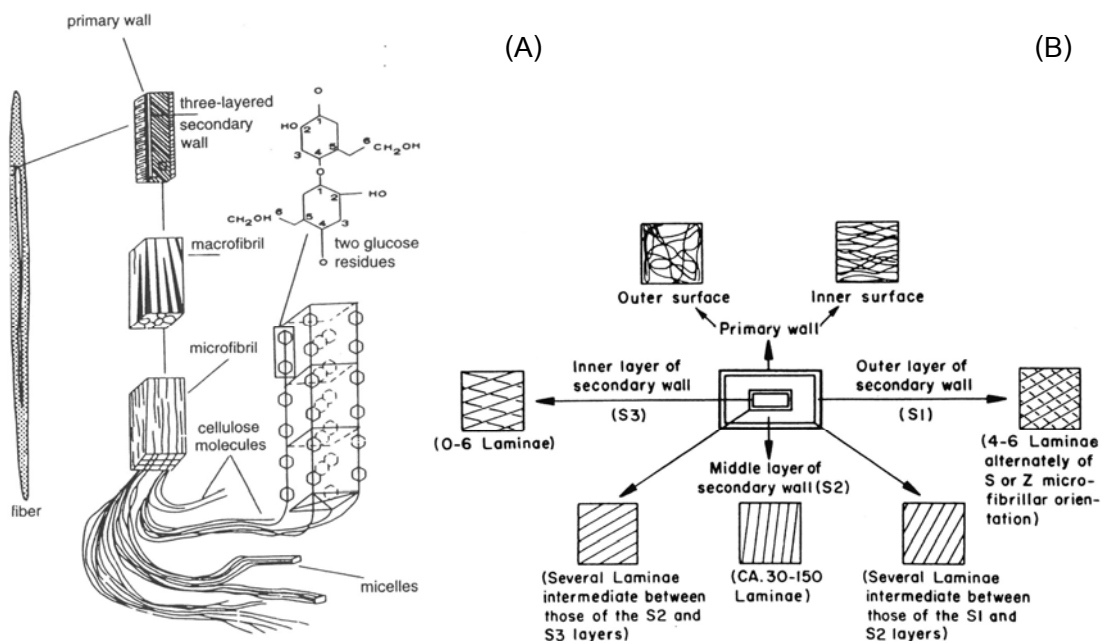
ชั้นผนังเซลล์ชั้นที่สอง

ผนังเซลล์ชั้นที่สองเกิดขึ้นหลังจากที่เซลล์หยุดเจริญแล้ว มีความสำคัญในเซลล์ที่เปลี่ยนไปทำหน้าที่เฉพาะ ซึ่งเมื่อมีผนังเซลล์ชั้นนี้เกิดขึ้น โพรโทพลาสต์มักจะตายลง ในผนังเซลล์ชั้นนี้มีองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส โดยมีเป็นปริมาณมากกว่าในผนังเซลล์ชั้นแรก และไม่พบสารจำพวกเพกติก เอนไซม์ และไกลโคโปรตีน แต่ในส่วนของเมทริกซ์ (Matrix) จะพบเฮมิเซลลูโลส โดยผนังเซลล์ชั้นที่สองเป็นชั้นที่หนาที่สุด ดังนั้นจึงมีปริมาณรวมของลิกนินสูงที่สุด และประกอบไปด้วยการเรียงตัวของเส้นใยขนาดย่อยอีก 3 ชั้น คือ S_1 , S_2 และ S_3 ดังแสดงในรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 ลักษณะการจัดเรียงตัวขององค์ประกอบในชั้นผนังเซลล์ [8]

เมื่อพิจารณาโครงสร้างในภาพรวมจะพบว่า โมเลกุลของเซลลูโลสจะเรียงตัวกันเป็นสายเรียกว่า ไมเซลล์ (Micelles) ซึ่งมารวมกันเป็นไมโครไฟบริล (Microfibril) กว้างประมาณ 10 นาโนเมตร โดยไมโครไฟบริลจะประกอบกันเป็นมาโครไฟบริล (Macrofibril) (รูปที่ 2-3 A) ซึ่งเป็นสายที่สามารถส่องดูได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา [11] ซึ่งลักษณะและองศาการจัดเรียงตัวของไมโครไฟบริลจะแตกต่างกันไปในแต่ละชั้นของผนังเซลล์ ซึ่งส่งผลให้ผนังเซลล์ในแต่ละชั้นมีความแข็งแรงไม่เท่ากัน ดังแสดงไว้ในรูป 2-3 (B)



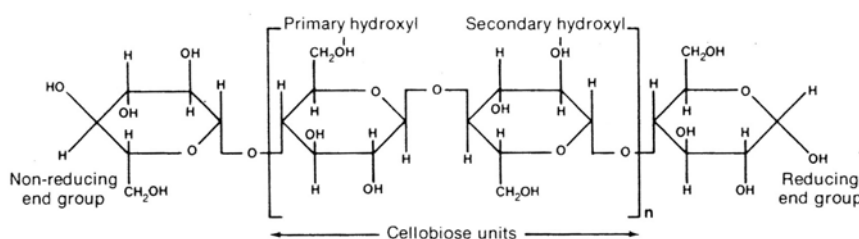
รูปที่ 2-3 (A) การจัดเรียงตัวของกลูโคสจนเป็นเส้นใยในเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช และ (B) ลักษณะองศาการจัดเรียงตัวของไมโครไฟบริลในผนังเซลล์พืชชั้นต่างๆ [8]

2.1.2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้

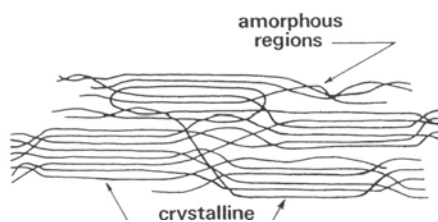
ในทางเคมี สามารถแบ่งองค์ประกอบของเนื้อไม้ ออกได้เป็น 4 ส่วน คือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และสารแทรก (Extractive) โดยองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในกระบวนการผลิตเยื่อ (Pulping process) วัตถุประสงค์หลักในกระบวนการผลิตเยื่อคือให้คงไว้ซึ่งปริมาณของเซลลูโลสให้ได้มากที่สุด [7] ซึ่งโดยปกติแล้วเฮมิเซลลูโลสจะมีแนวโน้มปริมาณที่ได้ไปในทิศทางเดียวกันกับเซลลูโลส ในขณะที่ลิกนินและสารแทรกเป็นองค์ประกอบที่ถูกกำจัดออกจากเส้นใยในระหว่างการผลิตเยื่อ องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้โดยทั่วไปมักมีความแตกต่างกันระหว่างชนิด โดยทั่วไปแล้วเนื้อไม้ของพืชใบเลี้ยงคู่ (Hardwood) มักมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าในเนื้อไม้ของพืชเมล็ดเบลี้อย

เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ (Homopolysaccharide) ประกอบด้วยสายพอลิเมอร์ของกลูโคสที่เชื่อมกันแบบไม่มีกิ่งแขนงสาขา (Unbranched polymer) มีพันธะเชื่อมแบบ β -1,4 ในพืช ค่าดีกรีของการเป็นพอลิเมอร์ (Degree of polymerization) ของกลูโคสซึ่งเป็นจำนวนหน่วยของกลูโคสที่เรียงตัวต่อกันเป็นสาย ประมาณ 14,000 หน่วย กลูโคสแต่ละหน่วยที่เชื่อมกันหมุน 180 องศาของแกนของสายพอลิเมอร์ กลูโคสสองหน่วยที่ต่อกันนี้ทำให้เกิดเป็นเซลโลไบโอส (Cellulose) (รูปที่ 2-4) ซึ่งจะมีหน่วยเชื่อมกันซ้ำ (Repeating unit) เป็นสายกลูแคน (Glucan) ในเซลลูโลส สายของกลูแคนพอลิเมอร์จะมีการยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) และพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดการเรียงตัวแบบผลึก โดยในธรรมชาติเซลลูโลสไม่มีการอยู่เป็นสายเดี่ยว แต่จะอยู่เป็นผลึกที่เป็นระเบียบ (Crystalline) เรียงตัวกันเป็นไมโครไฟบริลและจับกันเป็นกลุ่มที่มีความแข็งแรง มีสมบัติไม่ละลายน้ำเนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนจำนวนมากที่ยึดระหว่างสายพอลิเมอร์ ทำให้น้ำไม่สามารถเข้าไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 2-5 โดยที่ 1 crystal unit cell มีขนาด $10.5 \text{ \AA} \times 3.35 \text{ \AA} \times 7.9 \text{ \AA}$ [11] โดยเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของเนื้อไม้ ประมาณ 40 - 45 % ของน้ำหนักแห้งของเนื้อไม้เกือบทุกชนิด โดยจะพบเป็นปริมาณมากในผนังเซลล์ชั้นที่สองเป็นหลัก [1]



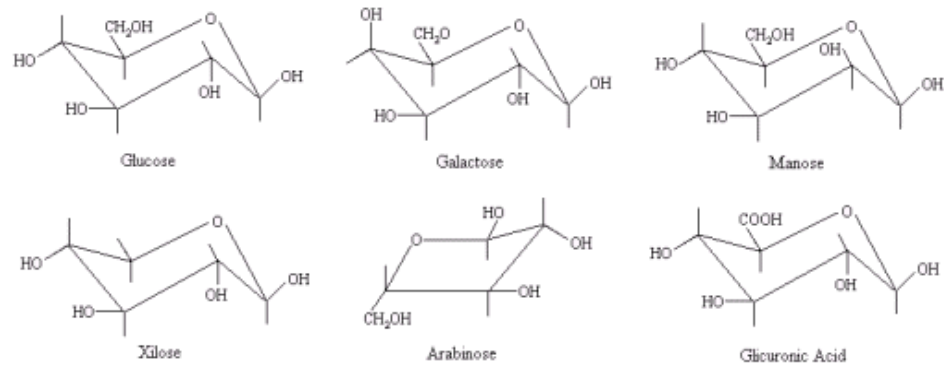
รูปที่ 2-4 โครงสร้างของเซลลูโลส แสดงกลูโคสสองหน่วยที่ต่อกันทำให้เกิดเป็นเซลโลไบโอส [8]



รูปที่ 2-5 การเรียงตัวโมเลกุลของสายพอลิเมอร์เซลลูโลสไมโครไฟบริล [8]

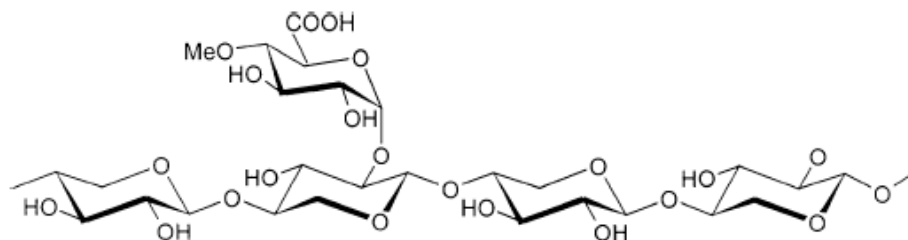
เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) ที่มีพอลิเมอร์ยึดติดกับเซลลูโลสในผนังเซลล์ของพืช มีหน้าที่ช่วยเสริมโครงสร้างของผนังเซลล์ให้หนาและแข็งแรงขึ้นในระหว่างที่พืชมีการเจริญเติบโต ซึ่งเฮมิเซลลูโลสมีสมบัติที่ไม่ละลายน้ำเช่นเดียวกับเซลลูโลส แต่สามารถทำให้ละลายในต่างกันได้ง่ายกว่าเซลลูโลส ดังนั้นจึงอาจนำสมบัตินี้มาแยกเฮมิเซลลูโลสออกจากเซลลูโลสเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับเซลลูโลสเป็นแอลฟา-เซลลูโลส (α -cellulose) เฮมิเซลลูโลสมีองค์ประกอบหลักเป็นน้ำตาลสองชนิด คือ น้ำตาลเฮกโซส (Hexose) เช่นคือ ดี-กลูโคส (D-glucose) ดี-กาแลกโตส (D-galactose) ดี-แมนโนส (D-mannose) กับน้ำตาลเพนโทส (Pentose) เช่น ดี-ไซโลส (D-xylose) แอล-อะราบินโนส (L-arabinose) และกรดกลูคูโรนิก (D-glucuronic acid) เป็นต้น (รูปที่ 2-6) เฮมิเซลลูโลสมักจะมีโครงสร้างเป็นแบบกิ่งแขนงปกติ ค่าดีกรีของการเป็นพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสประมาณ 100 - 200 หน่วยของน้ำตาล เฮกโซสเป็นน้ำตาลที่มีจำนวนคาร์บอน 6 อะตอม มักพบในเฮมิเซลลูโลสในรูปของบีตา-ดี-กาแลกโตไพราโนส (β -D-galactopyranose) บีตา-ดี-กลูโคไพราโนส (β -D-glucopyranose) และบีตา-ดี-แมนโนไพราโนส (β -D-mannopyranose) ส่วนเพนโทส เป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอมมักพบในเฮมิเซลลูโลสในรูปของแอลฟา-แอล-อะราบินโนไพราโนส (α -L-arabinopyranose) แอลฟา-แอล-อะราบินโนฟูราโนส (α -L-arabinofuranose) และบีตา-ดี-ไซโรไพราโนส (β -D-xylopyranose) ซึ่งจะเรียกเฮมิเซลลูโลสจากน้ำตาลเฮกโซสโดยทั่วไปว่า เฮกโซแซน (Hexosan) และเรียกเฮมิเซลลูโลสจากน้ำตาลเพนโทสโดยทั่วไปว่า เพนโทซาน (Pentosan)



รูปที่ 2-6 โครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลมอนอเมอร์ในเฮมิเซลลูโลส

เพนโทซานที่สำคัญชนิดหนึ่งคือ ไซแลน (Xylan) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลสในเนื้อไม้ของพืชใบเลี้ยงคู่หลายชนิด ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงเฮมิเซลลูโลสในเนื้อไม้ของพืชใบเลี้ยงคู่จึงมักจะหมายถึงไซแลนเป็นหลัก โดยไซแลนจะยึดเกาะกับเฮมิเซลลูโลสชนิดอื่นและเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจน พบได้ตามธรรมชาติทั้งไม้จากพืชเมล็ดเปลือยและไม้จากพืชใบเลี้ยงคู่รวมถึงพืชล้มลุก ซึ่งจะมีปริมาณและโครงสร้างต่างกันออกไป ในไม้จากพืชใบเลี้ยงคู่มีปริมาณกลูคูโรโนไซแลน (Glucuronoxylan) มากถึงร้อยละ 15 - 30 ของน้ำหนักแห้งของไม้ มีปริมาณกลูโคแมนแนน (Glucomannan) เพียงแค่อ้อยู่ 2 - 5 ของน้ำหนักแห้งของไม้เท่านั้น โครงสร้างของไซแลนเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลดี-ไซโลส (D-xylose) ซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม เชื่อมต่อกันด้วยพันธะบีตา-1,4-ไซโลซิดิก (β -1,4-xylosidic) เป็นสายหลัก และมีมอนอเมอร์ของน้ำตาลชนิดอื่นๆ หรือโอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharide) สายสั้นๆ มาเชื่อมเป็นสายกิ่ง ซึ่งสายกิ่งของไซแลนอาจประกอบด้วยน้ำตาลอะราบินโนส กรดกลูคูโรนิก หรือหมู่อะซิทิล (Acetyl group) ดังรูปที่ 2-7

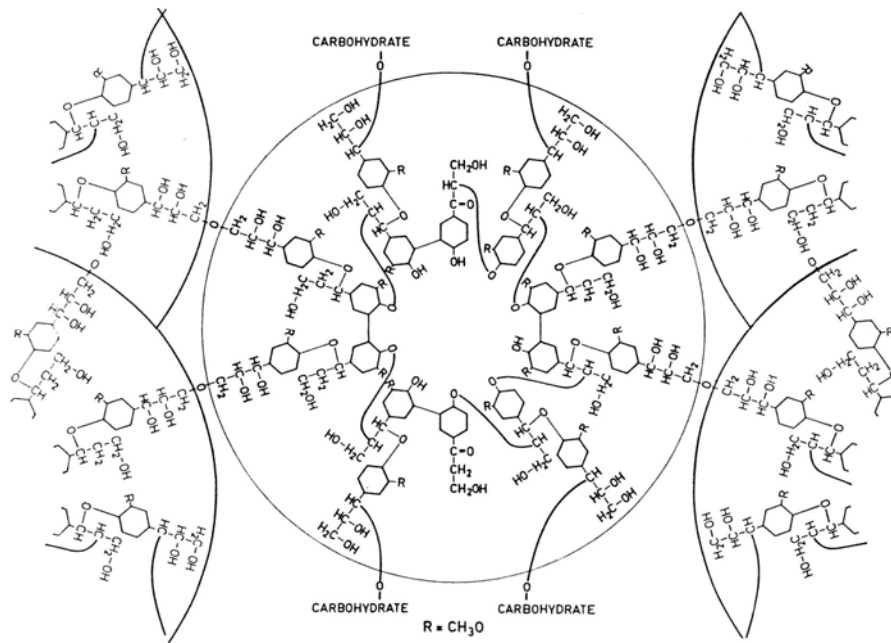


รูปที่ 2-7 โครงสร้างของไซแลนที่มีมอนอเมอร์ ดี-ไซโลส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะบีตา 1,4-ไซโลซิดิก ประกอบขึ้นเป็นสายโซ่หลัก โดยมีน้ำตาลดี-กลูโคสเป็นกิ่งแขนง [12]

โครงสร้างของไซแลนโดยทั่วไปในไม้ของพืชใบเลี้ยงคู่คือ โอ-อะซีทิล-(4-โอ-เมทิลกลูคูโรโน)-ไซแลน (4-O-acetylglucurono)-xylan) ซึ่งมีสายหลักเป็นไซโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะบีตา-1,4-ไซโลซิดิก และมีกรด 4-โอ-เมทิล-ดี-กลูคูโรนิก (4-O-methyl-D-glucuronic acid) เชื่อมต่อที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และมีหมู่อะซีทิลต่อที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และตำแหน่งที่ 2 ของไซโลสแตกต่างกันไปตามชนิดพืช สำหรับโครงสร้างไซแลนในไม้ของพืชเมล็ดเปลือยจะเป็นแบบ อะราบิโน-(4-โอ-เมทิลกลูคูโรโน)-ไซแลน (arabino-(4-O-methylglucurono)-xylan) ซึ่งสายหลักเป็นไซโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะบีตา-1,4-ไซโลซิดิก และมีกรด 4-โอ-เมทิล-ดี-กลูคูโรนิกเชื่อมต่อที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และมีหมู่แอล-อะราบิโนสเชื่อมต่อที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 ของไซโลส [1] อย่างไรก็ตาม น้ำตาลไซโลสสามารถเชื่อมต่อกันเป็นสายหลักของไซแลนโดยปราศจากน้ำตาลชนิดอื่นเชื่อมต่อเป็นกิ่งแขนงได้ ซึ่งจะพบในสาหร่ายทะเล *Palmariales* และ *Nemaliales* [12]

ลิกนิน

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบขึ้นด้วยหน่วยย่อยที่เป็นฟีนิลโพรเพน (Phenyl propane) และอะลิฟาติกโดยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะหลายชนิด สานต่ออย่างไม่มีระเบียบทำให้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนแทรกอยู่ในผนังเซลล์ชั้นที่สองของพืช ทำให้ลิกนินถูกย่อยสลายได้ยาก การสลายตัวของลิกนินจึงมักเป็นไปอย่างช้าๆ ดังนั้นลิกนินจึงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของฮิวมัส โดยในพืชต่างๆ จะมีลิกนินอยู่ประมาณร้อยละ 10 - 30 โดยเฉพาะในพืชที่มีท่อลำเลียง ซึ่งลิกนินจะทำหน้าที่ด้านความแข็งแรง เชื่อมต่อกับเส้นใยของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์ไว้ด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2-8 โดยปกติลิกนินจะมีความเข้มข้นสูงที่สุดในชั้นมิดเดิลลามেলা แต่จะมีปริมาณมากที่สุดในชั้นผนังเซลล์ชั้นที่สองเนื่องจากเป็นชั้นที่มีความหนาแน่นมากที่สุด



รูปที่ 2-8 โครงสร้างของลิกนินโดยมีหน่วยย่อยเป็นฟีนิลโพรเพนและอะลิฟาติกในไม้สปรูซ

ลิกนินจะถูกกำจัดออกในขั้นตอนการผลิตเยื่อ (Pulping process) เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักในการผลิตเยื่อคือต้องการแยกเส้นใยเดี่ยวๆ ออกมา ดังนั้นจึงต้องมีการทำให้ลิกนินที่ทำหน้าที่เสมือนตัวเชื่อมเส้นใยให้ติดอยู่ด้วยกันละลายออกมา นอกจากนี้ลิกนินยังจะถูกกำจัดออกจากเยื่อได้ในกระบวนการฟอก (Bleaching process) เนื่องจากลิกนินจะส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของเยื่อและผลผลิตกระดาษที่ได้ จากองค์ประกอบทางเคมีที่เรียกว่า โครโมฟอร์ (Chromophore) อีกทั้งลิกนินยังทำให้ผลผลิตเยื่อที่ได้มีความแข็งแรงต่ำอีกด้วย

สารแทรก

สารแทรกจัดได้ว่าเป็นส่วนประกอบภายนอกของพืช ที่สามารถแยกออกจากผนังเซลล์ของพืชได้โดยใช้สมบัติของการถูกละลายในน้ำหรือสารละลายอินทรีย์ สารแทรกพบทั่วไปในปริมาณร้อยละ 10 ซึ่งมีบทบาทสำคัญที่ทำให้พืชมีสมบัติเฉพาะตัว และมีผลต่อการนำไม้ไปใช้ประโยชน์ สารแทรกจัดเป็นสารทุติยภูมิที่พืชสร้างขึ้นมา เพื่อเป็นส่วนช่วยในการป้องกันอันตรายที่อาจมีต่อพืชจากสิ่งแวดล้อมหรือศัตรูภายนอก เช่น แมลง เชื้อโรค โดยอาจจำแนกออกเป็น 5 ประเภทตามคุณสมบัติทางเคมี ได้ดังนี้

1. สารประเภทสารประกอบไฮโดรคาร์บอนลักษณะแบบโซ่เปิดและแบบวง (Aliphatic และ Aromatic hydrocarbon) เช่น กรดไขมัน (Fatty acid) ไข (Wax) กรดอินทรีย์ต่างๆ

2. สารประเภทของสารประกอบไนโตรเจน (Nitrogenous compound) เช่น แอลคาลอยด์ (Alkaloids)

3. สารประเภทไอโซพรีน (Isoprene) เช่น เทอร์ปีน (Terpenes) เทอร์ปีนอย (Terpenoids) สเตอรอยด์ (Steroids)

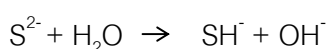
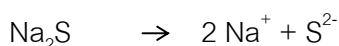
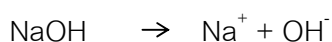
4. สารประเภทคาร์โบไฮเดรต เช่น โมโนแซ็กคาไรด์ (Monosaccharide) ไดแซ็กคาไรด์ (Disaccharide) และพอลิแซ็กคาไรด์อื่นๆ มีนอกเหนือไปจากเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เช่น กัม (Gum) ไกลโคไซด์ (Glycosides)

5. สารประเภทเบนซีนอยด์ (Benzenoids) และสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds) เช่น ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) คูมาริน (Coumarins) และแทนนิน (Tannins) [11]

2.1.3 การผลิตเยื่อด้วยกรรมวิธีคราฟต์ (Kraft pulping process)

2.1.3.1 เคมีของกระบวนการคราฟต์

การผลิตเยื่อด้วยวิธีคราฟต์ จะใช้สารเคมี 2 ชนิดคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซัลไฟด์ (Na₂S) ในสภาวะการต้มที่ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 12 ที่อุณหภูมิ 160 - 180 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำประมาณ 800 กิโลปาสกาล ใช้เวลาประมาณ 0.5 - 3 ชั่วโมง จากสภาวะนี้จะทำให้เส้นใยในเนื้อไม้สามารถแยกออกจากกันได้โดยการละลายลิกนินที่อยู่ชั้นในเม็ดเซลลูลอสออก การผลิตเยื่อด้วยกรรมวิธีคราฟต์ใช้ได้กับไม้หลายชนิด โดยเยื่อที่ได้จะมีความแข็งแรง แต่มีข้อเสียคือผลผลิตเยื่อที่ได้นั้นจะต่ำเนื่องจากเกิดการสูญเสียคาร์โบไฮเดรตของเส้นใย ซึ่งการแตกตัวของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ แสดงดังนี้

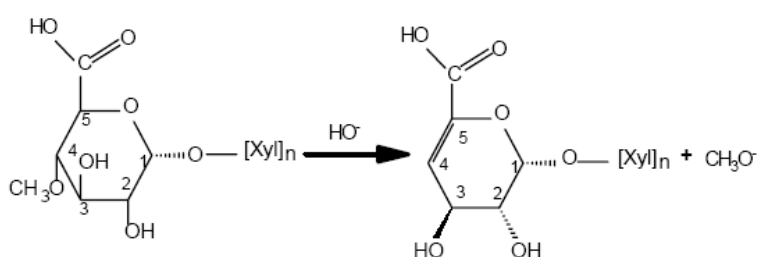


ในการผลิตเยื่อด้วยกรรมวิธีคราฟต์ ต้องการให้มีเพียงแต่ลิกนินเท่านั้นที่ถูกทำปฏิกิริยาโดยสารเคมีในน้ำยาต้มเยื่อ แต่ในความเป็นจริงส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรตทั้งเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกเข้าทำปฏิกิริยาด้วย OH⁻ ในระหว่างกระบวนการผลิตเยื่อ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น ซึ่งทำให้คาร์โบไฮเดรตมีขนาดโมเลกุลเล็กลง ทำให้ค่าผลผลิตเยื่อต่ำลง ปริมาณไม้จะลดลงมากกว่า 20% จากการที่เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกทำปฏิกิริยาไปในการต้มเยื่อ

โดยเฮมิเซลลูโลสจะถูกทำลายเร็วและมากกว่าเซลลูโลส เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสมีโมเลกุลขนาดเล็ก และมีกิ่งเป็นจำนวนมาก [7] โดยปัจจัยสำคัญในการผลิตเยื่อด้วยกรรมวิธีคราฟต์มีดังนี้คือ ชนิด ขนาดและความสม่ำเสมอของชิ้นไม้สับ สัดส่วนของ Effective Alkali ต่อน้ำหนักของชิ้นไม้สับและความเข้มข้นของ Effective Alkali และสัดส่วนของของเหลวต่อชิ้นไม้สับ (Liquor to wood ratio) ค่าความเป็นกำมะถัน (Sulfidity) ค่า H-factor เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตเยื่อ

2.1.3.2 ปฏิกริยาของไซแลนในกระบวนการคราฟต์

ลักษณะดั้งเดิมของไซแลนจะถูกเปลี่ยนแปลงไประหว่างการต้มเยื่อแบบคราฟต์ (Kraft cooking) โดยจะเกิดการย่อยสลายไซแลนจากปฏิกิริยาฟีดลิง (Peeling reaction) ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) และเกิดปฏิกิริยาฟีดลิงครั้งที่สอง (Secondary peeling) ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลโดยรวมของพอลิแซ็กคาไรด์ลดลง โดยหมู่อะซิเตต (Acetate group) จะถูกไฮโดรไลซ์ทันทีในน้ำยาต้มเยื่อคราฟต์ซึ่งมีสภาพเป็นด่าง แล้วทำให้กรด 4-โอ-เมทิลกลูคูโรนิก (4-O-methylglucuronic acid) ถูกกำจัดออกจากสายหลักของไซแลน ซึ่งทำให้เกิดเป็นเมทานอล (Methanol) และกรดเฮกเซนยูโรนิก (Hexenuronic acid) ได้ [3] (รูปที่ 2-9)

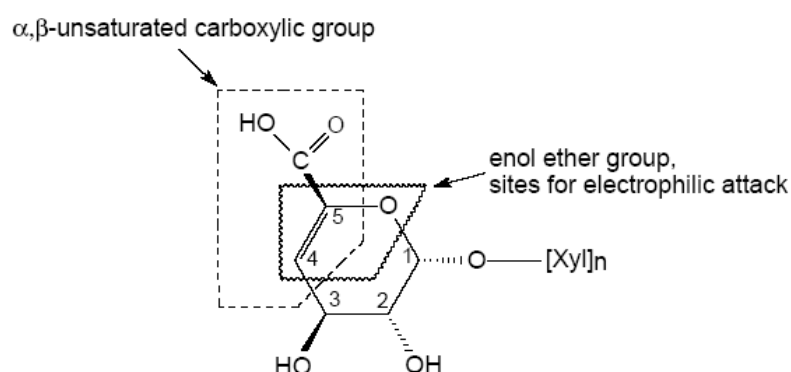


รูปที่ 2-9 การเปลี่ยนแปลงของ 4-โอ-เมทิลกลูคูโรนไซแลน (4-O-methylglucuronoxylan) ไปเป็นเฮกเซนยูโรนไซแลน (Hexenuronoxylan) ในระหว่างการผลิตเยื่อแบบคราฟต์ [4]

กรดเฮกเซนยูโรนิก (Hexenuronic acid)

ในช่วงปี พ.ศ. 2506 มีความเชื่อว่าภายใต้สภาวะแบบต่าง ปฏิกริยาบีตา-อีลิมีเนชัน (β -elimination) ของเมทานอลจากกรดเมทิลกลูคูโรนิก ทำให้เกิดเป็นพันธะคู่ในกรดยูโรนิกของไซแลน [13] ซึ่งทฤษฎีนี้ได้รับการสนับสนุนจาก Johansson และคณะ [14] จนกระทั่งประมาณปี พ.ศ. 2538 มีการตรวจพบกรด 4-ดีออกซี-บีตา-แอล-เทรโอ-เฮก-4-เอนโนไพราโนซิลูโรนิก (4-deoxy- β -L-threo-hex-4-enopyranosyluronic acid) ในเยื่อที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบคราฟต์ โดย Teleman และคณะ [15] ซึ่งก็คือกรดเฮกเซนยูโรนิกนั่นเอง

กรดเฮกเซนยูโรนิกประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่เป็นแบบอินอล - อีเทอร์ (Enol - ether) และกรดคาร์บอกซิลิกไม่อิ่มตัว (Unsaturated carboxylic acids) ดังแสดงในรูปที่ 2-10 ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวจะมีสภาพค่อนข้างเฉื่อยในสภาวะกรดอ่อน แต่อย่างไรก็ตามในกรดแก่หมู่อินอล - อีเทอร์จะถูกไฮโดรไลซิสอย่างรวดเร็วกลายเป็นแอลดีไฮด์ (Aldehydes) ซีโตน (Ketones) และแอลกอฮอล์ กรดเฮกเซนยูโรนิกที่พบในเยื่อไม้ฟอกเป็นต้นเหตุสำคัญของการเพิ่มการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อโดยเปล่าประโยชน์ เช่น คลอรีนไดออกไซด์ (Chlorinedioxide) โอโซน รวมถึงไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide) โดยสารเคมีที่ใช้ในการฟอกจะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดดังกล่าวก่อนแล้วค่อยเข้าทำปฏิกิริยากับลิกนิน ซึ่งส่งผลโดยตรงโดยทำให้ต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น ผลผลิตเยื่อที่ได้มีคุณภาพต่ำลง อีกทั้งยังมีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งมีสาเหตุมาจากของเสียที่เกิดขึ้นจากการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อที่เพิ่มขึ้นด้วย [16] นอกจากนี้ กรดเฮกเซนยูโรนิกยังทำให้เกิดการกลับสี (Brightness reversion) ในเยื่อที่ฟอกจนได้ความขาวสว่างที่ต้องการแล้ว โดยเฉพาะเยื่อที่ฟอกด้วยกระบวนการฟอกแบบปราศจากคลอรีนและอนุพันธ์ (Totally Chlorine Free, TCF) และยังพบว่ากรดเฮกเซนยูโรนิกสามารถส่งผลต่อการกลับสีของเยื่อได้มากกว่าลิกนินและสารอื่นๆ อีกด้วย [10]



รูปที่ 2-10 หมู่ฟังก์ชันของกรดเฮกเซนยูโรนิกที่ติดอยู่กับไซแลน [16]

2.1.4 การฟอกเยื่อ (Bleaching)

สีของเยื่อ หรืออาจเรียกได้ว่าเป็นการดูดกลืนแสงของเยื่อ ได้รับอิทธิพลสืบเนื่องโดยตรงจากปริมาณของลิกนินในเยื่อ ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าความขาวสว่างในระดับที่ต้องการ จะต้องมีการกำจัดลิกนินออกจากเยื่อ หรืออาจทำให้เยื่อปราศจากหมู่ฟังก์ชันที่มีการดูดกลืนแสงสูง ที่เรียกว่าโครโมฟอร์ (Chromophore) ซึ่งการกำจัดลิกนินและหมู่ฟังก์ชันดังกล่าว สามารถทำได้ 2 กรณีคือ การฟอกสีลิกนิน (Lignin-preserving bleaching) เป็นกระบวนการที่เปลี่ยน

โครงสร้างของหมู่โครโมฟอร์ในลิกนินทำให้เยื่อไม่ปรากฏลักษณะเป็นสีเหลือง แต่ยังไม่ได้กำจัดลิกนินออกจากเยื่อภายหลังการฟอกแต่อย่างใด ทำให้เยื่อมีโอกาสกลับมาเหลืองได้อีกครั้งเมื่อสัมผัสกับความชื้นหรือแสงแดด แต่มักจะนิยมฟอกเยื่อในลักษณะแบบนี้หากไม่ต้องการให้ผลผลิตเยื่อหลังฟอกลดลงมากนัก เช่นเยื่อที่ได้จากการผลิตด้วยวิธีเชิงกล ส่วนการฟอกแบบกำจัดลิกนินออก (Delignifying) เป็นกระบวนการที่มีการใช้สารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยากับเยื่อเพื่อกำจัดลิกนินที่ตกค้างหลงเหลือในโครงสร้างออก มักนิยมใช้กับเยื่อเคมีโดยเยื่อที่ได้จากการฟอกในลักษณะนี้จะมีคุณภาพและความเสถียรของความขาวสว่างค่อนข้างสูง แต่อาจส่งผลทำให้ผลผลิตเยื่อหลังฟอกลดลงได้ การฟอกเยื่อในลักษณะนี้สามารถใช้สารเคมีได้หลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.2 หรือมีการใช้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาเพื่อช่วยฟอก หรืออาจใช้ทั้งสารเคมีและเอนไซม์ร่วมกันได้ในการฟอกเยื่อทั้งสองลักษณะ

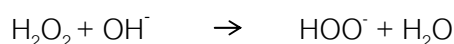
ตารางที่ 2.2 สารเคมีชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการฟอกเยื่อ [17]

สารเคมี	ตัวย่อ	หน้าที่	ชนิดเยื่อ	ข้อดี	ข้อจำกัด
Chlorine (Cl ₂)	C	Oxidize lignin Chlorinate lignin	เยื่อเคมี	ราคาถูก ใช้งานง่าย	มีสารก่อมะเร็ง
Chlorine dioxide (ClO ₂)	D	Oxidize lignin Brighten pulp	เยื่อเคมี	ประสิทธิภาพสูง เยื่อขาวและ สะอาด	ราคาแพง
Hypochlorite (NaOCl)	H	Oxidize lignin Brighten pulp	เยื่อเคมี	ใช้งานง่าย	ความแข็งแรง ของเยื่อลดลง
Hydrogen peroxide (H ₂ O ₂)	P	Oxidize lignin Decolorize lignin	เยื่อเคมี เยื่อกล	ใช้งานง่าย	ราคาแพง เยื่อไม่ค่อย สะอาด
Hydrosulfite (Na ₂ S ₂ O ₄)	Y	Reduce lignin Brighten pulp	เยื่อกล	ราคาถูก ใช้งานง่าย	ประสิทธิภาพ ในการใช้งาน จำกัด
Chelant (EDTA, DTPA)	Q	Remove metal ions	เยื่อเคมี	ประสิทธิภาพสูง	ราคาแพง
Oxygen (O ₂)	O	Oxidize lignin Solubilize lignin	เยื่อเคมี	ราคาถูก	Reactor ราคาแพง และ ความแข็งแรง เยื่อลดลง
Ozone (O ₃)	Z	Oxidize lignin Brighten pulp	เยื่อเคมี	ประสิทธิภาพ กำจัดลิกนินสูง	ควบคุมยาก
Sodium hydroxide (NaOH)	Y	Solubilize lignin	เยื่อเคมี	ราคาถูก ใช้งานง่าย	ทำให้เยื่อเกิดสี ดำ
Xylanase (enzyme)	X	Catalyze xylan hydrolysis Aid delignification	เยื่อเคมี	ใช้งานง่าย	ราคาแพงมาก

2.1.4.1 การฟอกเยื่อโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสภาวะต่าง สามารถทำได้กับเยื่อทั้งเยื่อเคมีและเยื่อกล โดยจะใช้อุณหภูมิปานกลางประมาณ 60 องศาเซลเซียส ในการฟอกเยื่อแบบการฟอกสีดิกนินในเยื่อกลและเยื่อกึ่งกลกึ่งเคมี (Chemi-mechanical pulp) แต่สำหรับในการฟอกเยื่อเคมี ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นอีกเล็กน้อยประมาณ 70 - 80 องศาเซลเซียสเพื่อให้ได้ความขาวสว่างและความเสถียรของความขาวสว่างในระดับสูง และสามารถใช้อุณหภูมิมากกว่า 90 - 100 องศาเซลเซียส เพื่อการกำจัดดิกนินในขั้นตอนก่อนการฟอก (Primary delignification stage) แต่เยื่อที่ได้จะมีความแข็งแรงต่ำกว่าการฟอกด้วยออกซิเจนหรือคลอรีนไดออกไซด์ โดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เหมาะจะนำไปใช้เป็นการฟอกขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งสามารถดัดแปลงใช้ได้กับถังฟอกแบบดั้งเดิมในอุตสาหกรรม หรือในถังเก็บเยื่อแบบแรงดันสูง (High-density storage chest) ได้เป็นอย่างดี และหากพิจารณาเรื่องสิ่งแวดล้อมควบคู่ไปด้วย โรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษสามารถใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นหนึ่งในกระบวนการฟอกที่ปราศจากคลอรีนและอนุพันธ์ได้ถึงแม้ว่าต้นทุนที่ใช้อาจสูงขึ้น แต่เยื่อฟอกที่ได้มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าการฟอกแบบใช้อุพันธ์ของคลอรีนบางส่วน (Elementally Chlorine Free, ECF)

ค่าความเป็นกรด - ด่าง ค่อนข้างมีผลต่อประสิทธิภาพของการฟอกเยื่อโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาก ซึ่งค่าที่เหมาะสมที่สุดควรจะปรับให้อยู่ที่ 10.5 เมื่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อยู่ในสภาวะต่าง จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซีไอออน (OH^-) ได้เป็นเปอร์ไฮดรอกซีแอนไฮไดรด์ (HOO^-) ซึ่งความเข้มข้นของเปอร์ไฮดรอกซีแอนไฮไดรด์ จะเพิ่มตามค่าความเป็นกรด - ด่างตามสมการดังนี้



เปอร์ไฮดรอกซีแอนไฮไดรด์มีความเป็นนิวคลีโอฟิลิกที่รุนแรง ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารเคมีหลักในการฟอก โดยจะเกิดปรากฏการณ์ 2 อย่างหลักๆ คือ ค่าความขาวสว่างจะเพิ่มมากขึ้น โดยจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันกับปฏิกิริยาการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นออกซิเจนและน้ำ [18] ที่ค่าความเป็นกรด - ด่างที่ระดับสูงกว่า 10.5 จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากขึ้น ซึ่งสามารถป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้ด้วยการเติมโซเดียมซัลไฟต์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยสารเคมีดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวเพิ่มความเสถียรและบัฟเฟอร์ให้กับระบบ [8]

2.1.4.2 การฟอกเยื่อแบบชีวภาพ

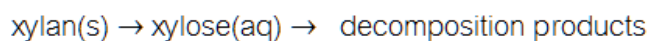
โดยทั่วไปแล้ว การฟอกเยื่อแบบชีวภาพเป็นการใช้เอนไซม์เพื่อช่วยในการฟอกเยื่อ ซึ่งการใช้เอนไซม์ในการช่วยฟอกนี้บางครั้งจะเรียกว่าการเพิ่มขีดความสามารถของการฟอก (Bleach boosting) โดยจะใช้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยาก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการฟอก เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างหรือทางเคมี ทำให้สารเคมีในการฟอกในขั้นตอนต่อไปเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ความขาวสว่างในเยื่อมีค่าเพิ่มสูงขึ้น การฟอกเยื่อมีประสิทธิภาพมากขึ้นในขณะที่ใช้ในปริมาณที่ลดลง ช่วยลดปริมาณของเสียที่เป็นพิษจากกระบวนการฟอกเยื่อลง [19] และเนื่องจากเอนไซม์สามารถย่อยสลายตัวเองตามธรรมชาติจึงเป็นการลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย [1] ไสแลเนสเป็นหนึ่งในเอนไซม์ที่มีประสิทธิภาพและได้รับความนิยมนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษทั่วโลก โดยเฉพาะในอเมริกาเหนือ ซึ่งมีการนำ ไสแลเนสมาใช้ในขั้นตอนก่อนการฟอกเยื่อคราฟต์มากถึง 2.5 ล้านตันต่อปี โดยเชื่อว่า ไสแลเนสจะเข้าทำปฏิกิริยาในส่วนของที่ ไสแลนติดอยู่กับลิกนิน ตามปฏิกิริยาการย่อยสลาย ไสแลนด้วยเอนไซม์ ทำให้ภายในเส้นใยมีโครงสร้างที่เปิดออก สารเคมีในการฟอกในขั้นตอนต่อไปสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับลิกนินได้ง่ายขึ้น

การย่อยสลาย ไสแลน

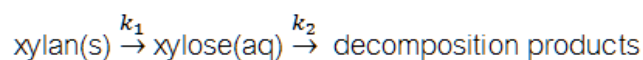
ในการย่อยสลาย ไสแลน ให้ได้เป็นน้ำตาลไซโลส สามารถย่อยได้โดยสารเคมี (Chemical hydrolysis) หรือการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ (Enzymatic hydrolysis) หรือการใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน [20]

การย่อยสลาย ไสแลนด้วยวิธีทางเคมี

การย่อยสลาย ไสแลน ด้วยวิธีทางเคมี สามารถทำได้ทั้งในสภาวะที่เป็นกรดและในสภาวะที่เป็นด่าง ซึ่งวิธีการที่ง่ายและรวดเร็วคือการย่อยสลาย ไสแลน ด้วยกรดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลไซโลส แต่จะเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรงและมีความจำเพาะต่ำ ดังนั้นผลผลิตที่ได้อาจจะไม่มีความสมบูรณ์มากนัก และยังเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารพิษ เช่น เฟอฟูรอล (Furfural) พร้อมทั้งยังต้องใช้อุปกรณ์ที่ทนต่อกรดและความร้อนสูงอีกด้วย ซึ่ง Rahman และคณะ [21] ได้นำเสนอกลไกการเกิดปฏิกิริยาของการเปลี่ยนแปลง ไสแลน ไปเป็นไซโลส โดย ไสแลน ในเฮมิเซลลูโลส จะเปลี่ยนไปเป็นไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ (Xylooligosaccharide) ก่อนแล้วจึงเปลี่ยนมาเป็นไซโลส นอกจากนี้ยังได้เสนอแบบจำลองทางจลน์ (Kinetic model) ตามสมการดังนี้



ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ คือ



เมื่อ k_1 คือ อัตราที่ปล่อยมอนอเมอร์ออกมา (Rate of monomer release) (min^{-1}) และ k_2 คือ อัตราที่มอนอเมอร์สลายตัว (Rate of monomer decomposed) (min^{-1}) โดยอาศัยพื้นฐานของแบบจำลองนี้ เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของมอนอเมอร์ (M) เป็นฟังก์ชันของเวลา (t) ที่เวลาเข้าใกล้ศูนย์ สามารถเขียนได้เป็น

$$M = [k_1 P_0 / (k_2 - k_1)] (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t})$$

การย่อยสลายไซแลนด้วยเอนไซม์

การย่อยสลายไซแลนด้วยเอนไซม์ เป็นปฏิกิริยาที่จำเพาะเจาะจงกับสารตั้งต้นมากกว่าการใช้สารเคมีในการย่อยสลาย ดังนั้นจึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์และสมบูรณ์สูง มีค่าใช้จ่ายโดยรวมน้อยและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยเอนไซม์จะกระตุ้นปฏิกิริยาการย่อยสลายพันธะบีตา-1,4-ไซโลซิดิกของสายหลักให้ได้ไซโลสหรือไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มเอนไซม์ที่ใช้ย่อยสลายไซแลนออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ เอนไซม์ย่อยสลายสายหลักของไซแลน และเอนไซม์ย่อยสลายสายกิ่งของไซแลน ดังนี้

เอนไซม์ย่อยสลายสายหลักของไซแลน ประกอบด้วย

1. เอนโดไซแลเนส (Endoxylanase) หรือบีตา-1,4-ดี-ไซแลน-ไซลานไฮโดรเลส (β -1,4-D-xylan-xylohydrolase, EC 3.2.1.8) โดยเอนไซม์ชนิดนี้จะทำการสลายพันธะบีตา-1,4-ไซโลซิดิกในสายหลักของไซแลนแบบสุ่ม และเรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นว่า กลไกแบบเอนโด (Endo-mechanism) ผลของการย่อยจะได้ไซโลสและโอลิโกแซ็กคาไรด์สายสั้นๆ เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย [22]

2. บีตา-ไซโลซิเดส (β -xylosidase) หรือบีตา-1,4-ดี-ไซแลน-ไซโลไฮโดรเลส (β -1,4-D-xylan-xylohydrolase, EC 3.2.1.37) โดยเอนไซม์ชนิดนี้จะทำการสลายพันธะบีตา-1,4-ดี-ไซโลซิดิกจากปลายสายด้านนอนรีดิวซ์ (Non-reducing end) และปลดปล่อยน้ำตาลไซโลสออก

มาทีละ 1 ไมเลกุล เรียกระบวนการที่เกิดขึ้นเช่นนี้ว่า กลไกแบบเอกไซ (Exo-mechanism) ผลของการย่อยจะได้ไซโลสเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย [23]

เอนไซม์ย่อยสลายสายกิ่งของไซแลน ประกอบด้วย

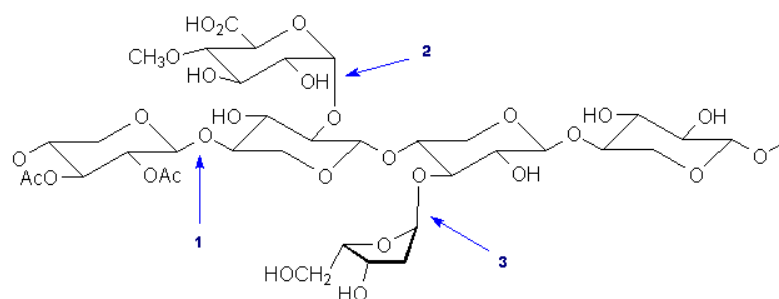
1. แอลฟา-แอล-อะราบินอซิเดส (α -L-arabinosidase, EC 3.2.1.55) เป็นเอนไซม์ที่ย่อยสลายพันธะแอลฟา-1, 2 และแอลฟา-1,3 จากปลายด้านอนันรีติวส์ของสายกิ่งแอลฟา-แอล-อะราบินโน-พิวราโนสในไซแลน อะราบินโนไซแลน และอะราบินโนกาแลกแตนแทน [24] โดยจะได้อะราบินโนสเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย

2. แอลฟา-ดี-กลูคูโรนิเดส (α -D-glucuronidase, EC 3.2.1.139) เป็นเอนไซม์ที่ย่อยสลายพันธะแอลฟา-1,2 ในกรด 4-โอ-เมทิล-แอลฟา-ดี-กลูคูโรนิก [25] ได้กรด 4-โอ-เมทิล-ดี-กลูคูโรนิกเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย

3. อะซีทิล (ไซแลน) เอสเทอเรส (Acetyl (xylan) esterase: EC 3.1.6) เป็นเอนไซม์ที่ย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ ที่เชื่อมระหว่างสายหลักของไซแลนและหมู่อะซีทิล ทำให้เอนไซม์ที่ย่อยสลายสายหลักชนิดอื่นๆ สามารถเข้าย่อยสลายไซแลนได้ดีขึ้น

4. เฟอรูโลอิล เอสเทอเรส (Feruloyl esterase: EC 3.1.1.73) เป็นเอนไซม์ที่ย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ ระหว่างอะราบินโนสในสายกิ่งของไซแลนและกรดเฟอรูลิก (Ferulic acid) ของลิกนิน ซึ่งพันธะนี้จะทำหน้าที่เชื่อมลิกนินเข้ากับเฮมิเซลลูโลส

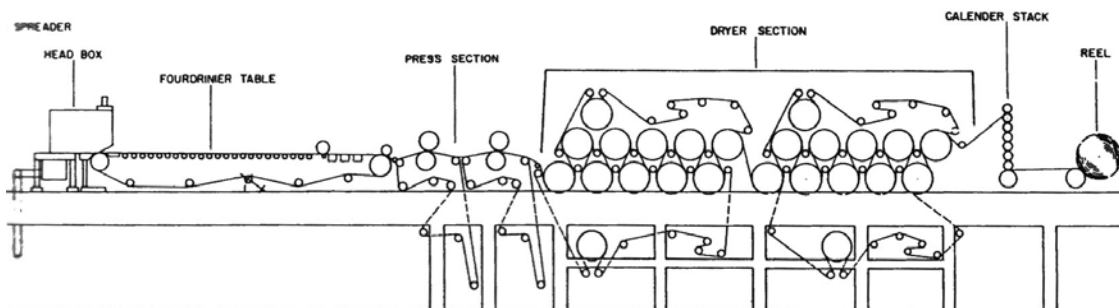
จากลักษณะการทำงานของเอนไซม์กลุ่มย่อยสลายไซแลน ดังที่กล่าวมาแล้ว สามารถแสดงตัวอย่างการทำงานของเอนไซม์ในกลุ่มนี้เพื่อย่อยสลายโครงสร้างของไซแลน ดังรูปที่ 2-11



รูปที่ 2-11 โครงสร้างของไซแลนและการย่อยสลายไซแลนโดยเอนไซม์ 1. เอนโดไซแลเนส 2. แอลฟา-ดี-กลูคูโรนิเดส 3. แอลฟา-แอล-อะราบินโนพิวราโนซิเดส [26]

2.1.5 กระบวนการผลิตกระดาษ

การผลิตกระดาษเริ่มจากการไหลของน้ำเยื่อจากส่วนเตรียมน้ำเยื่อ (Stock preparation) เข้าสู่ Headbox จากนั้น น้ำเยื่อจะไหลลงสู่ตะแกรงในส่วนขึ้นแผ่น (Fourdrinier table) แล้วผ่านไปยังส่วนกดรีดน้ำ (Press section) โดยใช้ผ้าสักหลาด (Felt) แล้วทำให้แห้งในส่วนอบแห้ง (Dryer section) ตามลำดับ โดยความชื้นสุดท้ายของกระดาษควรมีค่าประมาณร้อยละ 5 จากนั้นอาจมีการปรับปรุงสมบัติผิวหน้าของกระดาษที่แห้งแล้ว เช่น การขัดผิว (Calendering) หรือการเคลือบผิว (Coating) แล้วจะถูกรอเข้าม้วน (Reel) ต่อไป โดยแสดงลักษณะโดยรวมของเครื่องผลิตกระดาษแบบ Fourdrinier ไว้ในรูปที่ 2-12



รูปที่ 2-12 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Fourdrinier [8]

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nguyen และคณะ [2] ศึกษาการฟอกเยื่อคราฟต์ด้วยไลเปส (Lipase) เกรดทางการค้า พบว่าเอนไซม์ชนิดนี้สามารถเพิ่มความขาวสว่างสุดท้ายให้กับเยื่อได้ พร้อมทั้งยังเข้าทำปฏิกิริยากำจัดกรดเฮกเซนยูโรนิก และลิกนินที่ติดอยู่กับกรดชนิดนี้ออกได้อีกด้วย โดยมีเฟอรูโลเอสเตอเรส (Feruloyl esterase) และอะราบิโนฟูราโนไซด์ส (Arabinofuranosidase) เป็นเอนไซม์เสริมทำหน้าที่ในการเข้าทำปฏิกิริยาช่วยฟอก และกำจัดกรดเฮกเซนยูโรนิกทำให้ลดค่าคัลปาลงได้

Shatalov และ Pereira [27] ศึกษาผลของไซแลเนสต่อความสามารถในการฟอกเยื่อด้วยเปอร์ออกไซด์ในเยื่อยูคาลิปตัส (*Eucalyptus globulus*) ที่ผลิตจากกระบวนการคราฟต์ พบว่าความสามารถในการฟอกและค่าความขาวสว่างโดยรวมสูงขึ้น แต่ควรจะใช้ไซแลเนสหลังจากมีการฟอกด้วยขั้นตอนที่ใช้เปอร์ออกไซด์ครั้งแรกก่อน จึงจะช่วยเพิ่มค่าความขาวสว่างได้ดีที่สุด พร้อมทั้งทำให้ค่าความขาวสว่างสุดท้ายที่มากที่สุดเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการฟอก

นอกจากนี้ยังพบว่ากรดเฮกเซนยูโรนิกเป็นตัวแปรสำคัญ ที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการใช้ไฮลเนสช่วยฟอกอีกด้วย

Cadena และคณะ [28] ศึกษาผลกระทบของปริมาณกรดเฮกเซนยูโรนิก ต่อการปลดและการเร่งอายุเยื่อคาลิปต์สฟอกปราศจากคลอรีนและอนุพันธ์ (Total Chlorine Free, TCF) พบว่ากรดเฮกเซนยูโรนิกในเยื่อ TCF ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการกลับสีถึง 65% เมื่อทำการเร่งอายุที่สภาวะ 80 องศาเซลเซียส ความชื้น 65% ค่าค้ปหลังจากทำการเร่งอายุที่ 144 ชั่วโมง ด้วยความร้อนและชื้น 33% มีค่าน้อยกว่าในเยื่อที่ไม่ได้เร่งอายุ นอกจากนี้การกำจัดกรดเฮกเซนยูโรนิกออกจากเยื่อ สามารถช่วยเพิ่มค่าความขาวสว่างและมีความเสถียรมากขึ้น พร้อมทั้งช่วยเพิ่มความสามารถในการระบายน้ำออกจากเยื่อได้

Roncero และคณะ [29] ศึกษาผลของไฮลเนสต่อองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลซิก (Lignocellulosic) ในระหว่างการฟอกเยื่อพบว่าการใช้ไฮลเนสสามารถช่วยทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในไฮลเนส โดยหากใช้เอนไซม์ไฮลเนสก่อนขั้นตอนการกำจัดลิกนินด้วยออกซิเจน จะมียุทธภาพมากกว่าใช้ภายหลังขั้นตอนการกำจัดลิกนินด้วยออกซิเจน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเยื่อ TCF และเยื่อฟอกแบบใช้อนุพันธ์คลอรีนบางส่วน (Elementally Chlorine Free, ECF) พบว่าปริมาณของไฮลเนสจะลดลงตามระดับการฟอกเยื่อด้วย นอกจากนี้เอนไซม์ทำให้ผิวหน้าของเส้นใยมีความหยาบเพิ่มมากขึ้นและมีโครงสร้างเปิดมากขึ้นอีกทั้งทำให้สัดส่วนของโครงสร้างที่เรียงตัวเป็นระเบียบ (Crystalline) เพิ่มมากขึ้น

Gellerstedt และ Li [30] ศึกษาผลของกรดเฮกเซนยูโรนิกในเยื่อที่มีต่อค่าค้ปพบว่าการลดเฮกเซนยูโรนิกปริมาณ 10 ไมโครโมลจะเพิ่มค่าค้ปประมาณ 0.84 - 0.86 หน่วย ซึ่งทำให้มีความเป็นไปได้ในการวิเคราะห์ปริมาณกรดเฮกเซน - ยูโรนิก โดยพิจารณาค่าค้ปมาก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วย เมอร์คิวริก อะซิเตต (Mercuric acetate)

Jiang และคณะ [4] ศึกษากรดเฮกเซนยูโรนิกในระหว่างการต้มและฟอกเยื่อพบว่าในระหว่างการต้มเยื่อด้วยกระบวนการคราฟต์ หมูกรด 4-O-methylglucuronic ที่ติดอยู่กับไฮลเนสถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดเฮกเซนยูโรนิก บางส่วนก่อตัวเป็นเฮกเซนยูโรนไฮลเนสซึ่งกรดนี้จะทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่ใช้ฟอกเยื่อบางตัว เช่น ClO_2 และ O_3 ได้ โดยการกำจัดกรดนี้ออกจากเยื่อโดยใช้กรด จะเป็นการลดต้นทุนด้านสารเคมีในการฟอกเยื่อคราฟต์ไม้จากพีชใบเลี้ยงคู่ (Hardwood) มากกว่าเยื่อคราฟต์ไม้จากพีชเมล็ดเปลือย (Softwood) การกำจัดกรด

เฮกเซนยูโรนิกด้วยการทำปฏิกิริยาด้วยกรดนี้ ยังช่วยเพิ่มความเสถียรของค่าความขาวสว่างได้
เนื่องจากการกำจัดไดออกไซด์ออกจากเยื่ออีกทางหนึ่ง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. เยื่อกราฟต์ยูคาลิปตัสไม่ฟอก เกรดอุตสาหกรรม จากกลุ่มธุรกิจเยื่อและกระดาษในเครือเอสซีจี
2. เอนไซม์ไซแลเนส (Xylanase) ที่ผลิตจากเชื้อยีสต์ *Aureobasidium pullulans* สายพันธุ์เขตร้อน NRM2
3. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Poch, Poland
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Merck KGaA, Germany
5. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Merck KGaA, Germany
6. โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Merck KGaA, Germany
7. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Merck KGaA, Germany
8. ออกซินอลมอโนไฮเดรต ($CH_3C_6H_3(OH)_2 \cdot H_2O$) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Sigma-Aldrich, USA
9. เฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Sigma-Aldrich, USA
10. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Merck KGaA, Germany
11. ไซโลส ($C_5H_{10}O_5$) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Sigma-Aldrich, United State
12. เอทานอล (C_2H_5OH) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Merck KGaA, Germany

13. ไชแลน (Birch wood xylan) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Sigma-Aldrich, USA
14. ผงมอลต์สกัด (Malt extract) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Difco, USA
15. ผงยีสต์สกัด (Yeast extract) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Difco, USA
16. โบแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba Reagent, Italy
17. แอล-แอสพาราจิ้นมอนอไฮเดรต ($\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Fluka, Switzerland
18. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba Reagent, Italy
19. โซเดียมโปตัสเซียมทาร์เทรต (NaK Tartrate) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba Reagent, Italy
20. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba Reagent, Italy
21. โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba Reagent, Italy
22. คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba Reagent, Italy
23. แอมโมเนียมโมลิบเดต ($\text{H}_{24}\text{Mo}_7\text{N}_6\text{O}_{24}$) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Mallinckrodt, USA
24. โซเดียมอาซีนเตไดเบสิกเฮปตะไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{HASO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) เกรดสำหรับการวิเคราะห์ จากบริษัท Carlo Erba Reagent, Italy
25. ฝุ่นผงทรานางเงือก เกรดอุตสาหกรรม จากบริษัทพัฒนาสินเอนเตอร์ไพรส์ ประเทศไทย

3.1.2 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. ตู้เขี่ยเชื้อ (Laminar Flow); รุ่น BV-123, ISSOC, Thailand
2. หม้อนึ่งความดันไอน้ำ (Autoclave); Ta Chang Medical Instrument Factory, Taiwan
3. เครื่องเขย่า (Shaker); รุ่น SPL15, Labcon, The Republic of South Africa
4. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge); รุ่น Rotofix32, Hettich, Germany

5. อุปกรณ์นับเม็ดเลือด (Haemocytometer); Brand MMM, Germany
6. เครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง (Microplate reader spectrophotometer), USA
7. เครื่องตีกระจายเยื่อ (Disintegrator); รุ่น T-292, Adirondack Machine Corporation, USA
8. เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษ (Sheet former); รุ่น Rapid Köthen Blattbildner, PTI Laboratory Equipment, Austria
9. เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง (0.1-21 kg); รุ่น GX-20K, Japan
10. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง (0.005-4,000 g); รุ่น TB-4002, Denver Instrument, Germany
11. เครื่องวัดความชื้น (Moisture Determination Balance); รุ่น KettFD-600, Kett Electric Laboratory, USA
12. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter); Denver Instrument, Germany
13. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath); รุ่น WB29, Memmert, Germany
14. ตู้อบ (Hot air oven); รุ่น Venticell, Brand MMM, Germany
15. เครื่องวัดความหนาของกระดาษ (Thickness tester); Frank, Germany
16. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile tester); รุ่น Strograph E-S, Toyoseiki Seisaku-SHO Ltd., Japan
17. เครื่องตัดกระดาษเพื่อทดสอบความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Sheet cutter); รุ่น Saltaranpur, Germany
18. เครื่องวัดความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear resistance tester); รุ่น Pro-Tear, Thwing-Albert Instrument, USA
19. เครื่องวัดสมบัติทางแสงของกระดาษ (Brightness tester); รุ่น Color Touch PC, Technidyne corporation, USA
20. เครื่องเร่งอายุกระดาษ ; รุ่น Xenon Test Chamber, Q-Sun, USA
21. ชุดอุปกรณ์การกลั่นสกัดและถุงชีปส์คโไฟ

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 การทดลองตอนที่ 1: การผลิตไซแลเนสจากเชื้อยีสต์ *Aureobasidium pullulans* และการตรวจสอบแอกติวิตีของเอนไซม์

3.2.1.1 การเลี้ยงเชื้อยีสต์ *Aureobasidium pullulans* และการผลิตไซแลเนส

ทำการเลี้ยงเชื้อยีสต์ *Aureobasidium pullulans* สายพันธุ์ NRM2 บนอาหารสูตร Yeast Malt Xylan Agar (YMXA) [31] (ภาคผนวก ก) บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นเตรียมอาหารสูตร Basal Medium [32] (ภาคผนวก ก) ปริมาตร 10 มิลลิลิตรในพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร เชื้อยีสต์ *Aureobasidium pullulans* ลงไป 1 ลูป (Loop) แล้วบ่มบนเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน ใช้ Haemocytometer ในการนับจำนวนเซลล์ (ภาคผนวก ค) คำนวณปริมาตรให้ได้เซลล์เริ่มต้นที่ 2.5×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร แล้วเติมลงในอาหารสูตร Xylan Production Medium (XPM) [32] (ภาคผนวก ก) ปริมาตร 10 มิลลิลิตรใน พลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร นำไปบ่มบนเครื่องเขย่าที่ 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกเซลล์ของเชื้อยีสต์ *Aureobasidium pullulans* ออก โดยเฉพาะส่วนของเหลวใส่ไปทำการตรวจสอบแอกติวิตีของเอนไซม์

3.2.1.2 การสร้างกราฟน้ำตาลมาตรฐาน

เตรียมสารละลายไซโลสที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 และ 200 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรในหลอดทดลอง 8 หลอด หลอดละ 0.25 มิลลิลิตร เติมสารละลาย Reagent C ลงไปหลอดละ 0.5 มิลลิลิตร ต้มในน้ำเดือดนาน 20 นาที ตั้งไว้ให้เย็นแล้วเติมสารละลาย Reagent D ลงไปหลอดละ 1 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นหลอดละ 5 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร แล้วสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง (ร้อยละ) กับปริมาณน้ำตาลไซโลส (ไมโครโมล)

3.2.1.3 การตรวจสอบแอกติวิตีของไซแลเนส

เตรียมสารเคมีสำหรับการตรวจสอบแอกติวิตีของไซแลเนสตามภาคผนวก ข แล้วนำเอนไซม์ (ส่วนของเหลวที่ได้จากข้อ 3.2.1.1) ปริมาตร 0.25 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง เตรียมสารละลายไซแลนความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ (w/v) และโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์ เติมน้ำลงในหลอดทดลองอย่างละ 0.25 มิลลิลิตร นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 60

องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที เติมสารละลาย Reagent C (ภาคผนวก ข) ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วต้มในน้ำเดือดนาน 20 นาที ตั้งไว้ให้เย็นแล้วเติมสารละลาย Reagent D (ภาคผนวก ข) ปริมาตร 1 มิลลิลิตรแล้วเขย่าให้เข้ากัน เติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร แล้วเปรียบเทียบปริมาณไซโลสจากกราฟน้ำตาลไซโลสมาตรฐาน แล้วคำนวณค่าแอกติวิตีตามสูตรการคำนวณ

$$\text{Units/ml enzyme} = \frac{(O.D./1.212) \times (Df)}{(10) \times (0.25)}$$

โดยที่ 1.212 = ปริมาณน้ำตาลที่เทียบได้จากกราฟมาตรฐาน (ความชันของกราฟ)
 10 = ระยะเวลาในการบ่มที่ 60 องศาเซลเซียส (นาที)
 Df = สัดส่วนจำนวนเท่าของการเจือจาง (Dilution factor)
 0.25 = ปริมาตรของเอนไซม์ที่ใช้
 O.D. = ค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร

กำหนดให้ 1 หน่วยของเอนไซม์คือ ปริมาตรของเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายสารตั้งต้นให้เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย 1 ไมโครกรัม ในเวลา 1 นาที ภายใต้สภาวะที่ใช้ทดสอบ ซึ่ง 1 หน่วยของเอนไซม์ = 1 ไมโครโมลของสารตั้งต้นที่ถูกย่อยใน 1 นาที
 = 1 ไมโครโมลของไซโลสที่ถูกปลดปล่อยออกมาใน 1 นาที หรือ
 = 0.150 มิลลิกรัมของไซโลสที่ถูกปลดปล่อยออกมาใน 1 นาที

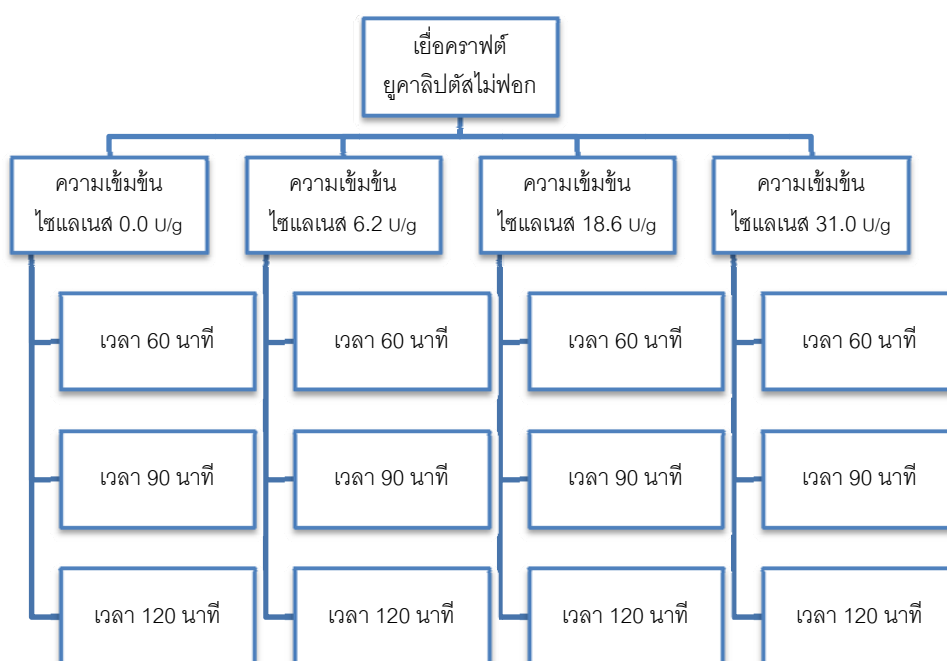
3.2.2 การทดลองตอนที่ 2: การใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อ

3.2.2.1 การเตรียมเยื่อ

นำเยื่อไม่ฟอกยู่คาลิปตัลที่ผลิตโดยวิธีกราฟต์ มาฉีกให้มีขนาดเล็กลง ประมาณ 0.5×0.5 เซนติเมตร เพื่อให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสของเยื่อมากขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาระหว่างเยื่อกับไซแลเนส แล้วทำการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของเยื่อ เก็บในถุงที่ปิดสนิท เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น

3.2.2.2 การเตรียมไซแลเนส

หลังจากทำการตรวจสอบค่าแอกติวิตีของไซแลเนสแล้ว แบ่งความเข้มข้นที่จะใช้ออกเป็น 4 ระดับ ดังแสดงในรูปที่ 3-1 คือ 0.0U/g (ชุดการทดลองควบคุม), 6.2U/g, 18.6U/g และ 31.0U/g [33] โดยคำนวณตามน้ำหนักแห้งของเยื่อ เช่น ต้องการใช้เอนไซม์ช่วยฟอกเยื่อ 150 กรัมแห้ง ที่สภาวะความเข้มข้นของไซแลเนสเท่ากับ 6.2U/g จะใช้ไซแลเนส 6.2×150 เท่ากับ 930 Units ซึ่งถ้าไซแลเนสมีค่าแอกติวิตีเท่ากับ 16.2 U/ml ดังนั้นจะต้องใช้ไซแลเนส $930 \div 16.2$ เท่ากับ 57.4 มิลลิลิตรต่อสภาวะที่ใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสเท่ากับ 6.2U/g เป็นต้น



รูปที่ 3-1 แผนผังแสดงการใช้ไซแลเนสช่วยฟอกที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ

3.2.2.3 การใช้ไซแลเนสช่วยฟอกเยื่อ

นำไซแลเนสที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.3.2 ใส่ลงไปในน้ำที่ต้องใช้ในการปรับความเข้มข้นของเยื่อ (Consistency) ในการฟอกให้ได้ 10 เปอร์เซ็นต์ แล้วเทลงไปในเยื่อที่บรรจุในถุงซิปล็อค นวดให้ผสมกันแล้วปรับค่าความเป็นกรด - ด่างให้อยู่ในช่วง 5.5 ± 0.2 ด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ปิดถุงให้สนิทแล้วนำไปใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที 90 นาที และ 120 นาทีในแต่ละสภาวะการทดลอง โดยทำการนวดทุกๆ 15 นาที เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการหยุดปฏิกิริยาของไซแลเนสด้วยการล้างด้วยน้ำร้อน (>90 องศาเซลเซียส) แล้วล้างเยื่อต่อให้สะอาดด้วยน้ำอีกครั้ง

3.2.3 การทดลองตอนที่ 3: การศึกษาผลการใช้ไซแลเนสต่อปริมาณเพนโทซาน

3.2.3.1 การกลั่นสกัดเพนโทซานจากเยื่อ

เตรียมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น $3.85 \pm 0.05N$ (ภาคผนวก ง) ซึ่งเยื่อที่ได้จากข้อ 3.2.3.3 สภาวะการทดลองละ 0.5 กรัมแห้งลงในพลาสติกกันกลม เติมไซเดียมคลอไรด์ลงไปพลาสติกละ 20 กรัม เติมกรดไฮโดรคลอริกลงไปพลาสติกละ 100 มิลลิลิตร และใส่เศษกระเบื้อง 2-3 ชิ้นลงในพลาสติกเพื่อป้องกันการเดือดที่รุนแรงเกินไป พร้อมทั้งทำเครื่องหมายบอกระดับปริมาตรปัจจุบันของกรดในพลาสติก แล้วต่อเข้ากับชุดอุปกรณ์การกลั่นสกัด ดังแสดงในรูปที่ 3-2 ให้ความร้อนโดยรักษาอัตราการกลั่นสกัดให้ได้ที่ประมาณ 2.5 มิลลิลิตรต่อนาที และแช่พลาสติกเชิงปริมาตรที่ใช้เก็บสารละลายที่สกัดได้ ให้อยู่ในภาวะใส่น้ำแข็งตลอดเวลาการกลั่นสกัด พร้อมทั้งพยายามรักษาให้ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกในพลาสติกกันกลมคงที่ตลอดเวลาที่ 100 มิลลิลิตร โดยทำการหยดกรดจากกรวยแยก (Separatory funnel) ให้คงที่ตลอดเวลา หรือเติมทุกๆ 10 นาที ครั้งละ 25 มิลลิลิตร ทำการกลั่นสกัดเป็นเวลา 85-95 นาที



รูปที่ 3-2 การต่อชุดอุปกรณ์การกลั่นสกัด (TAPPI T223 cm-01)

3.2.3.2 การวัดปริมาณเพนโทซานที่สกัดได้ (TAPPI T223 cm-01)

เตรียมสารละลายออกซินอล (ภาคผนวก ข) แล้วนำสารละลายที่สกัดได้ไปไว้ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เติมกรดไฮโดรคลอริกจนถึงขีดบอกระดับปริมาตรที่ 250 มิลลิลิตรและผสมให้เข้ากัน หลังจากนั้นปิเปตสารละลายดังกล่าว 5.0 มิลลิลิตรลงในพลาสติกขนาด 50 มิลลิลิตร เติมสารละลายออกซินอลลงไป 25.0 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปแช่ไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 1 องศาเซลเซียส แล้วเติมเอทานอลให้ถึงขีดบอกระดับปริมาตรที่ 50 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิอีกครั้ง เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 630 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายที่สกัดได้เป็นสารละลายเปรียบเทียบ (Blank) นำไปเปรียบเทียบปริมาณไซแลนจากกราฟมาตรฐานไซแลน แล้วคำนวณเป็นปริมาณเพนโทซาน

3.2.3.3 การสร้างกราฟไซแลนมาตรฐาน

อบน้ำตาลไซโลสที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 2 - 4 ชั่วโมง แล้วชั่งลงในพลาสติกกันกลม 5 พลาสติก พลาสติกละ 20 40 60 80 และ 100 มิลลิกรัม แล้วทำการกลั่นสกัดด้วยวิธีการเช่นเดียวกับในข้อ 3.2.3.2 วัดค่าดูดกลืนแสงที่ 630 นาโนเมตร โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นสารละลายเปรียบเทียบ คำนวณปริมาณไซแลนโดยใช้สูตร $xylan (mg) = xylose (mg) \times 0.88$ แล้วสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสงกับปริมาณไซแลน

เมื่อทราบปริมาณไซแลนในเยื่อจากการเทียบจากกราฟไซแลนมาตรฐานแล้ว นำไปคำนวณหาปริมาณร้อยละของเพนโทซานได้จากสูตรการคำนวณ

$$Pentosan (\%) = \frac{A}{10W}$$

โดยที่ A = ปริมาณไซแลนในเยื่อ (มิลลิกรัม)
 W = น้ำหนักแห้งของเยื่อที่นำมากลั่นสกัด (กรัม)

3.2.3.4 การวิเคราะห์ผลของไซแลนต่อปริมาณเพนโทซาน

นำผลการคำนวณปริมาณเพนโทซานในเยื่อที่ได้ มาทำการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาสภาวะของการทดลองที่ความเข้มข้นของไซแลน และเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณเพนโทซานมากที่สุด โดยนำผลจากการทดลองทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยการหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งแต่ละตัวอย่างจากแต่ละ

สภาวะการทดลองจะทำการกลั่นสกัดตามขั้นตอนในข้อ 3.2.3.2 ซ้ำ 2 ครั้ง และในแต่ละครั้งจะทำการวัดปริมาณเพนโทซานตามขั้นตอนในข้อ 3.2.3.3 ซ้ำ 2 รอบ

3.2.4 การทดลองตอนที่ 4: การศึกษาผลของไซแลเนสต่อสมบัติของกระดาษ

3.2.4.1 การขึ้นแผ่นกระดาษ

นำเยื่อที่ได้จากข้อ 3.2.2.3 มาทำการขึ้นเป็นแผ่นกระดาษตามมาตรฐาน ISO 5269-2 ด้วยเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid Köthen ดังรูปที่ 3-3 โดยการนำเยื่อไปกระจายด้วยเครื่องกระจายเยื่อ แล้วปรับความชื้นให้ได้ 0.3 เปอร์เซ็นต์ ลงในภาชนะที่มีเครื่องช่วยกวนเยื่อ เพื่อให้เยื่อแขวนลอยในน้ำอย่างสม่ำเสมอ และเนื่องจากขนาดของตะแกรงขึ้นแผ่นของเครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid Köthen มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20 เซนติเมตร นั่นคือมีพื้นที่ 314.16 ตารางเซนติเมตร หรือเท่ากับ 3.1416×10^{-2} ตารางเมตร ถ้าต้องการขึ้นแผ่นกระดาษที่มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 75 กรัมต่อตารางเมตร จะต้องมีเยื่อแห้งเท่ากับ $(3.1416 \times 10^{-2}) \times 75 = 2.356$ กรัม และน้ำเยื่อที่ความเข้มข้น 0.3 เปอร์เซ็นต์ หมายถึงในน้ำเยื่อ 100 มิลลิลิตร จะมีเยื่อแห้งประมาณ 0.3 กรัม ดังนั้น ต้องการเยื่อแห้ง 2.356 กรัม จึงต้องตวงน้ำเยื่อออกมาประมาณ 785 มิลลิลิตรต่อการขึ้นแผ่นกระดาษ 1 แผ่น แล้วแบ่งจำนวนกระดาษที่ได้ออกเป็น 2 ส่วน เพื่อนำไปทดสอบสมบัติกระดาษและนำไปเร่งอายุกระดาษ ตามลำดับ



รูปที่ 3-3 เครื่องขึ้นแผ่นกระดาษแบบ Rapid Köthen

3.2.4.2 การทดสอบสมบัติกระดาษ

นำกระดาษที่ได้หลังจากขึ้นแผ่นจากข้อ 3.2.4.1 ไปปรับสภาพในห้องทดสอบ แล้วทำการทดสอบสมบัติตามมาตรฐาน โดยแบ่งสมบัติของกระดาษออกเป็น 3 ส่วนหลัก ซึ่งจะทำ

การทดสอบสมบัติพื้นฐานทางโครงสร้างและสมบัติทางแสงซึ่งเป็นสมบัติเชิงปรากฏการณ์ก่อนที่จะทำการทดสอบสมบัติทางด้านความแข็งแรงซึ่งเป็นการทดสอบเชิงทำลาย เรียงตามลำดับดังนี้

สมบัติพื้นฐานทางโครงสร้าง (Basic structural properties)

ทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน (Basis weight) โดยการนำกระดาษไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำน้ำหนักที่ได้หารด้วยพื้นที่ของกระดาษ จะได้เป็นค่าน้ำหนักมาตรฐาน (หน่วยกรัมต่อตารางเมตร) และความหนาของกระดาษ (Thickness) ทดสอบโดยใช้เครื่องวัดความหนา (Thickness tester) (หน่วยมิลลิเมตร) ซึ่งเมื่อนำค่าน้ำหนักมาตรฐานมาหารด้วยค่าความหนาจะได้เป็นค่าความหนาแน่นของกระดาษ (Apparent density) (หน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และหากนำ 1 มาหารด้วยค่าความหนาแน่นของกระดาษจะได้เป็นค่าความฟวม (Bulkiness) (หน่วยลูกบาศก์เมตรต่อกรัม)

สมบัติทางแสง (Optical properties)

ทดสอบโดยใช้เครื่องวัดสมบัติทางแสง (Color Touch PC, USA) จะได้ค่าความทึบแสง (Opacity) ตามมาตรฐาน ISO 2471 ค่าความขาวสว่าง (Brightness) ตามมาตรฐาน ISO 2470 โดยเครื่องจะทำการวัดค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร และค่าความขาว (Whiteness) ตามมาตรฐาน ISO 11476 โดยเครื่องจะทำการวัดค่าการสะท้อนแสงจากทุกช่วงความยาวคลื่น

สมบัติกายภาพหรือสมบัติทางด้านความแข็งแรง (Physical properties)

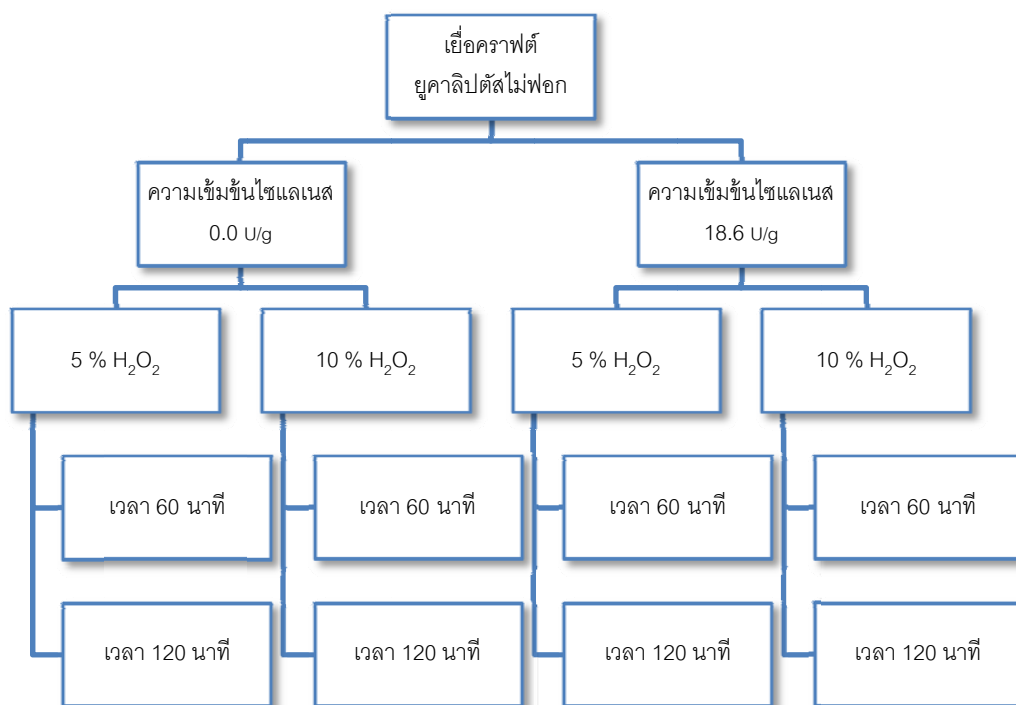
ตัดกระดาษให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน TAPPI T220 sp-01 เพื่อนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้ ความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile strength) ตามมาตรฐาน TAPPI T494 om-01 ด้วยเครื่อง Strogaph E-S (Toyoseiki Seisaku-SHO Ltd., Japan) และความแข็งแรงต่อแรงฉีก (Tear strength) ตามมาตรฐาน TAPPI T414 om-98 ด้วยเครื่อง Pro-Tear (Thwing-Albert Instrument, USA) โดยทุกสมบัติทางด้านความแข็งแรงสามารถรายงานเป็นค่าดัชนี (Index) ได้ โดเนการหารโดยน้ำหนักมาตรฐาน เพื่อเป็นการลดปัจจัยด้านความแปรปรวนของน้ำหนักมาตรฐานกระดาษลง

3.2.4.3 การวิเคราะห์ผลของไฮแลเนสต่อสมบัติของกระดาษ

นำผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.2.4.2 มาทำการวิเคราะห์หาสภาวะที่ส่งผลดีต่อสมบัติเชิงแสงมากที่สุด นั่นคือสภาวะการทดลองที่ให้ค่าความขาวหรือความขาวสว่างมากที่สุดในขณะที่ส่งผลเสียต่อสมบัติด้านความแข็งแรงน้อยที่สุด โดยนำผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยการหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งในแต่ละการทดสอบสมบัติของกระดาษ จะทำการทดสอบโดยใช้กระดาษมาทดสอบจำนวน 7 แผ่น หรือ 5 แผ่นต่อ 1 สภาวะการทดลอง พร้อมทั้งวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพนโทซานต่อค่าความขาวสว่างในเยื่อด้วย

3.2.5 การทดลองตอนที่ 5: การฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

พิจารณาเลือกเยื่อ จากสภาวะการทดลองในข้อ 3.2.2.2 ที่ส่งผลต่อปริมาณเพนโทซานมากที่สุด นั่นคือเยื่อจากสภาวะการทดลองที่มีปริมาณเพนโทซานในเยื่อต่ำที่สุดที่สูญเสียสมบัติทางด้านความแข็งแรงน้อยที่สุดที่ใช้ความเข้มข้นไฮแลเนสและเวลาทำปฏิกิริยาน้อยที่สุด (โดยทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลจากข้อ 3.2.3.4 และข้อ 3.2.4.3) และชุดการทดลองควบคุม มาทำการทดลองในข้อ 3.2.2.3 ซ้ำที่สภาวะเดิมแล้วฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 ระดับ เป็นเวลา 60 และ 120 นาที ตามแผนผังในรูป 3-4



รูปที่ 3-4 แผนผังแสดงการใช้ไฮแลเนสร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อ

3.2.5.1 การเตรียมสารเคมี

เตรียมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 ระดับ คือร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เตรียมโซเดียมซัลไฟด์ปริมาตรเท่ากับร้อยละ 2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.2.5.2 การฟอกเยื่อ

ผสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ที่เตรียมไว้จากข้อ 3.2.5.1 ในแต่ละสภาวะการทดลองให้เข้ากันกับน้ำที่คำนวณไว้เพื่อใช้ปรับความเข้มข้นของเยื่อให้ได้ร้อยละ 10 จากนั้นเทลงในเยื่อที่บรรจุในถุงซิปล็อค นวดให้เข้ากันแล้วปรับความเป็นกรด - ด่างให้อยู่ในช่วง 10.0 ± 0.2 ปิดถุงให้สนิทแล้วนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 และ 120 นาที โดยทำการนวดทุกๆ 15 นาทีเพื่อให้ประสิทธิภาพของการฟอกเยื่อดีขึ้น เมื่อครบเวลาที่กำหนดแล้ว ล้างเยื่อด้วยน้ำร้อนจัดแล้วล้างต่อให้สะอาดด้วยน้ำอีกครั้ง

3.2.5.3 การทดสอบสมบัติของกระดาษ

แบ่งเยื่อที่ได้หลังจากการฟอกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกทำการขึ้นเป็นแผ่นกระดาษตามขั้นตอนในข้อ 3.2.4.1 แล้วทดสอบสมบัติต่างๆ ตามขั้นตอนในข้อ 3.2.4.2 และกระดาษส่วนที่ 2 ทำการขึ้นเป็นแผ่นกระดาษตามขั้นตอนในข้อ 3.2.4.1 เช่นเดียวกับกระดาษส่วนแรกเพื่อนำไปทำการเร่งอายุกระดาษต่อไป

3.2.5.4 การวิเคราะห์ผลของโซลเลนส์ในขั้นตอนก่อนการฟอกต่อสมบัติของกระดาษ

นำผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.2.5.3 มาทำการวิเคราะห์หาสภาวะการทดลองที่ส่งผลดีต่อค่าความขาวหรือความขาวสว่างสุดท้ายมากที่สุด นั่นคือสภาวะการทดลองที่ให้ค่าความขาวสว่างที่เพิ่มขึ้นจากการวัดสมบัติทางแสงในข้อ 3.2.4.2 มากที่สุดโดยส่งผลเสียต่อสมบัติด้านความแข็งแรงน้อยที่สุด โดยนำผลการทดลองทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยการหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งในแต่ละการทดสอบสมบัติของกระดาษ จะทำการทดสอบโดยใช้กระดาษทดสอบจำนวน 7 แผ่น หรือ 5 แผ่น ต่อ 1 สภาวะการทดลอง

3.2.6 การทดลองตอนที่ 6: การศึกษาผลของไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอกต่อความคงทนของกระดาษ

3.2.6.1 การเร่งอายุกระดาษ

นำกระดาษส่วนที่ 2 ในข้อ 3.2.4.1 และข้อ 3.2.5.3 มาแบ่งเป็นสภาวะการทดลองละ 2 ชุด สำหรับนำไปเร่งอายุด้วยความร้อนที่ 105 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน TAPPI T453 sp-97 และสำหรับนำไปเร่งอายุด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 340 นาโนเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D3424-09 ตามลำดับ

3.2.6.2 การทดสอบสมบัติกระดาษ

นำกระดาษที่ผ่านการเร่งอายุแล้ว ไปทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ตามขั้นตอนในข้อ 3.2.4.2

3.2.6.3 การวิเคราะห์ผลของไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอกต่อความคงทนของกระดาษ

นำผลการทดลองที่ได้จากข้อ 3.2.6.2 มาทำการวิเคราะห์ค่าความขาวหรือความขาวสว่างตลอดจนสมบัติด้านความแข็งแรงที่เปลี่ยนแปลงไป ที่ก่อนและหลังการเร่งอายุเปรียบเทียบกับผลจากชุดการทดลองควบคุม โดยนำผลการทดลองทั้งหมดจากข้อ 3.2.6.2 มาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยการหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งในแต่ละการทดสอบสมบัติของกระดาษ จะทำการทดสอบโดยใช้กระดาษทดสอบจำนวน 7 แผ่น หรือ 5 แผ่น หรือ 1 แผ่นต่อ 1 สภาวะการทดลอง

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำผลการทดลองที่ได้จากทุกขั้นตอนการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้การวิเคราะห์แบบ Two-factor analysis of variance (ANOVA: Two-factor With Replication) เพื่อวิเคราะห์หาค่า P-value และคำนวณค่า F ทางสถิติ ซึ่งจะยอมรับว่าตัวแปรในการศึกษานั้นๆ มีผลต่อปริมาณเพนโทซานและสมบัติกระดาษก็ต่อเมื่อค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) และค่า F จากการคำนวณมีค่ามากกว่าค่า F จากตาราง เมื่อพิจารณาที่ค่า α เท่ากับ 0.05

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการตรวจวัดแอกติวิตีของไซแลเนสจากเชื้อยีสต์ *Aureobasidium pullulans*

ผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.1 นี้ เป็นส่วนหนึ่งของผลการทดลองในตอนที่ 1 ซึ่งทำการผลิตไซแลเนสจากเชื้อยีสต์ *Aureobasidium pullulans*

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าดูดกลืนแสงของสารละลายน้ำตาลไซโลสที่ความเข้มข้นต่างๆ จากการเตรียมขึ้นมาเพื่อเป็นค่ามาตรฐาน และค่าดูดกลืนแสงของสารละลายน้ำตาลไซโลสที่ได้จากการย่อยสลายไซแลนโดยไซแลเนส แล้วทำการสร้างกราฟสารละลายน้ำตาลไซโลสมาตรฐานเพื่อใช้ในการคำนวณแอกติวิตีของไซแลเนสตามการคำนวณในข้อ 3.2.1.3 พบว่าไซแลเนสมีค่าแอกติวิตีเท่ากับ 17.92 ยูนิตต่อมิลลิลิตร

4.2 ผลของไซแลเนสต่อปริมาณเพนโทซานในเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสไม่ฟอก

ผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.2 นี้ เป็นส่วนหนึ่งของผลการทดลองในตอนที่ 2 และตอนที่ 3 ซึ่งเป็นการนำไซแลเนสที่ผลิตได้มาทำปฏิกิริยากับเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสไม่ฟอกแล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณเพนโทซาน

4.2.1 ปริมาณเพนโทซานในเยื่อหลังจากใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยา

จากการวิเคราะห์ปริมาณเพนโทซานในเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ ได้ผลดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

จากผลการทดลองที่ได้ พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสที่เพิ่มขึ้น เข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสไม่ฟอก ปริมาณเพนโทซานในเยื่อมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ใช้ไซแลเนสทำปฏิกิริยากับเยื่อจากฟางข้าวสาลี [34] โดยเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น 31.0 U/g O.D. เป็นเวลานาน 120 นาทีจะมีปริมาณเพนโทซานต่ำที่สุด คือเท่ากับร้อยละ 14.19 ของปริมาณเยื่อที่ใช้วิเคราะห์ แต่หากเปรียบเทียบที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเท่ากัน พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณเพนโทซานในเยื่อมีแนวโน้มลดลงจนถึงที่ความเข้มข้นเท่ากับ 18.6 U/g O.D. แล้วจะเริ่มมีปริมาณค่อนข้างคงที่ โดยเยื่อที่ผ่านการทำปฏิกิริยาด้วยไซแลเนสเป็นเวลานาน 120 นาที มีการลดลงของปริมาณเพนโทซานอย่างต่อเนื่อง และลดลงมากที่สุดเมื่อใช้ความเข้มข้นของไซแลเนส

เท่ากับ 31.0 U/g O.D. ดังแสดงในรูปที่ 4-1 ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากไซแลเนสมีความจำเพาะสูงเมื่อเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายพันธะบีตา-1,4-ไซโลซิดิกในสายหลักของไซแลนด้วยกลไกแบบเอนโด (Endo-mechanism) แล้วเกิดเป็นโพลิโกแซคาไรด์สายสั้นๆ [22] ที่อาจมีน้ำตาลมอนอเมอร์ชนิดอื่นของไซแลน เช่น อะราบิโนส ที่ยังเกาะติดอยู่กับเซลลูโลสหรือลิกนินทำให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเหล่านั้นต่อไปได้ ปริมาณของเพนโทซานจึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนักหลังจากใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสที่สูงกว่า 18.6 U/g O.D.

ตารางที่ 4.1 ปริมาณเพนโทซานในเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ

ความเข้มข้นของไซแลเนส (U/g O.D.)	เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา (นาที)	ปริมาณเพนโทซาน (%)
0.0 (ชุดการทดลองควบคุม)	60	17.00±0.66
	90	16.64±1.37
	120	17.57±1.20
6.2	60	15.71±0.26
	90	14.53±0.03
	120	14.92±0.00
18.6	60	14.60±0.26
	90	14.68±0.15
	120	14.69±0.39
31.0	60	14.80±0.73
	90	14.77±0.02
	120	14.19±0.48

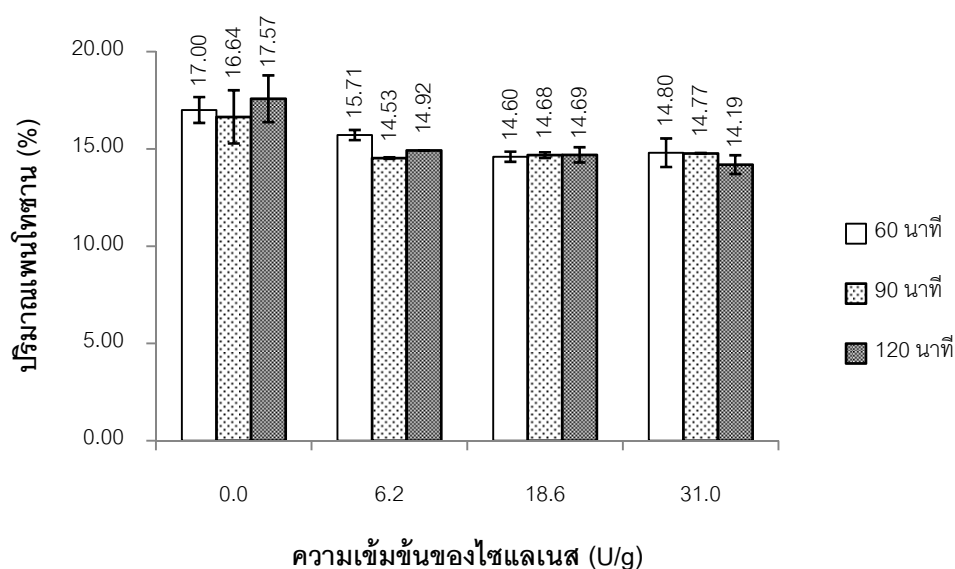
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของไซแลเนส ในแต่ละความเข้มข้นที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ต่อปริมาณเพนโทซาน

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
A ¹	0.553665	2	0.276833	0.687024	0.521807	3.885294
B ^{2*}	24.6975	3	8.232501	20.43086	5.24E-05	3.490295
Interaction	2.263711	6	0.377285	0.936321	0.504112	2.99612
Within	4.835333	12	0.402944			
Total	32.35021	23				

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อต่อปริมาณเพนโทซาน

² B คือ ผลของความเข้มข้นของไซแลเนสที่ใช้ทำปฏิกิริยากับเยื่อต่อปริมาณเพนโทซาน

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณเพนโทซาน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



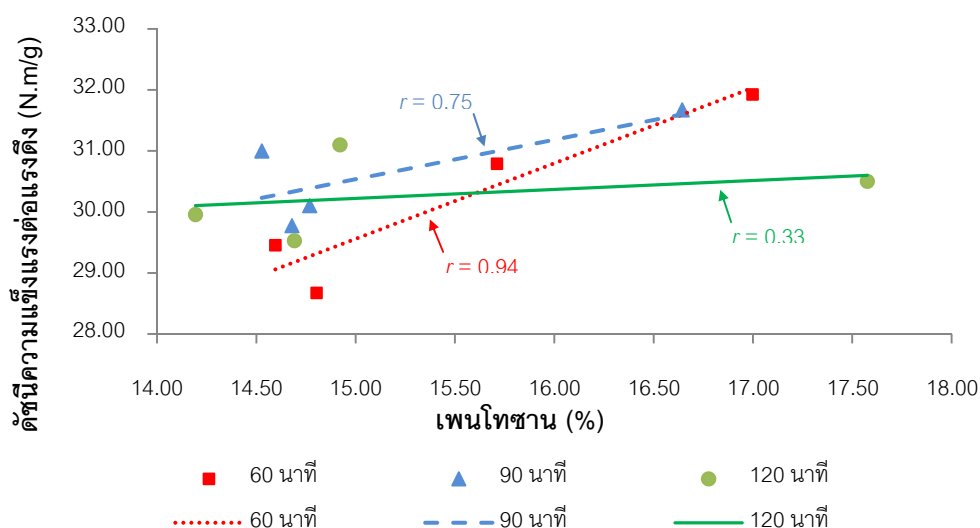
รูปที่ 4-1 ผลของไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้นต่อปริมาณเพนโทซานที่เวลาการทำปฏิกิริยาต่างๆ

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตามตารางที่ 4.2 พบว่า เวลาที่ใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการลดลงของปริมาณเพนโทซานแต่อย่างใด โดยในการวิเคราะห์ทางสถิตินั้นจะพิจารณาจากค่า P-value และจากค่า F ที่ได้จากการคำนวณทางสถิติเป็นสำคัญ ซึ่งในการพิจารณาว่าตัวแปรใดมีผลปริมาณเพนโทซานนั้น จะดูค่า P-value เป็นหลัก คือ หากค่า P-value ของตัวแปรใดมีค่าน้อย

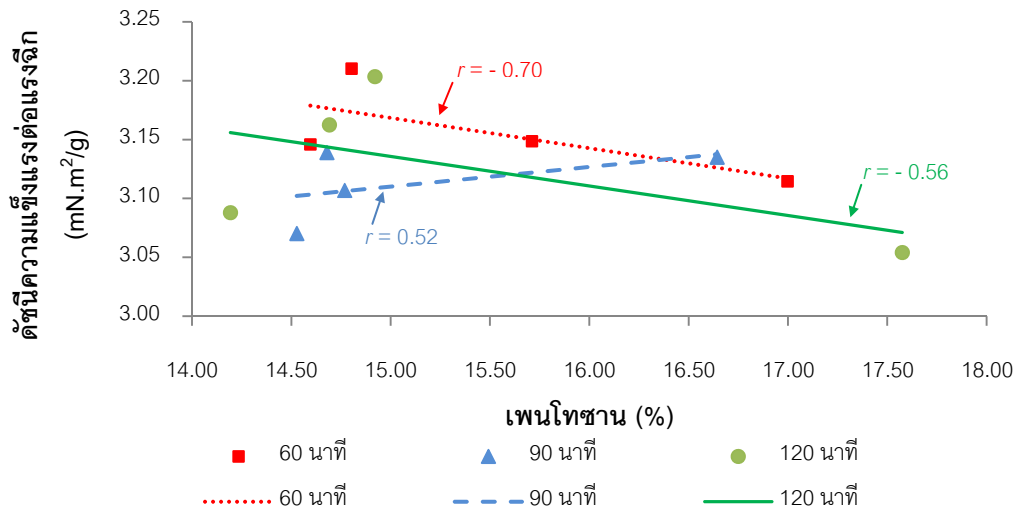
กว่า 0.05 นั่นคือตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อปริมาณเพนโทซานในเยื่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากค่า F ที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับค่า F ที่ได้ในตาราง โดยใช้ค่า α เท่ากับ 0.05

4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเพนโทซานในเยื่อ ต่อสมบัติด้านความแข็งแรงและสมบัติทางแสงของกระดาษ

เพนโทซานเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ของคาร์โบไฮเดรตของเส้นใยเยื่อ ดังนั้นจึงส่งผลโดยตรงกับค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับการเชื่อมต่อกันของพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใย [8] จากรูปที่ 4.2 เมื่อมีปริมาณเพนโทซานในเยื่อต่ำ ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจึงมีค่าน้อยเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันในทุกช่วงเวลาที่ใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อ โดยกระดาษจากเยื่อที่ใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 60 นาที มีอัตราการลดของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษมากที่สุดเมื่อมีปริมาณเพนโทซานในเยื่อต่ำลง และกระดาษจากเยื่อที่ใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 120 นาที มีอัตราการลดของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงน้อยที่สุดเมื่อมีปริมาณเพนโทซานในเยื่อต่ำลง แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาความสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson's correlation) ร่วมด้วยจะพบว่ากระดาษจากเยื่อที่ใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 120 นาทีมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson's correlation coefficient) น้อยที่สุด จึงมีความเป็นไปได้ว่า ลักษณะอัตราการลดของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษในแต่ละชุดการทดลองจะมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงและใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างเพนโทซานและความแข็งแรงต่อแรงดึง

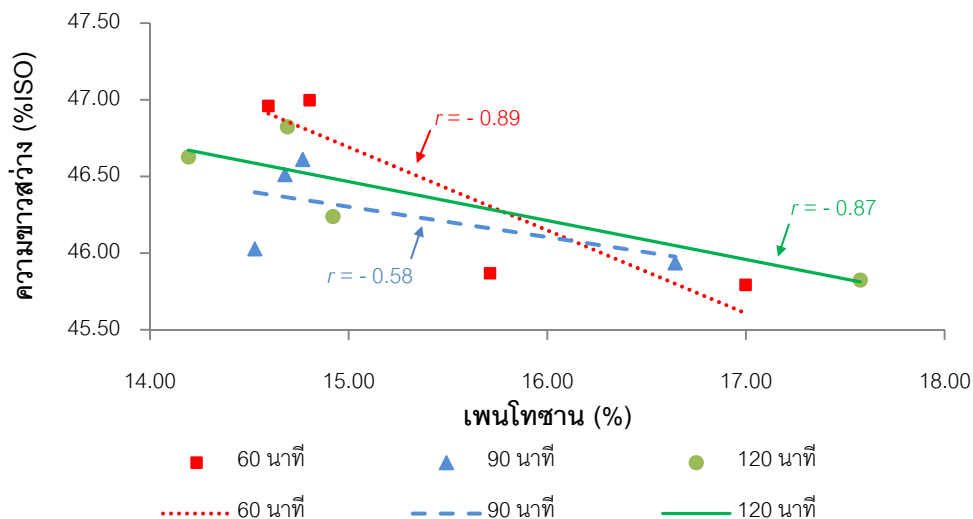


รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างเพนโทซานและความแข็งแรงตอแรงฉีก

ในทางตรงกันข้าม หากวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเพนโทซานและค่าดัชนีความแข็งแรงตอแรงฉีก พบว่าเมื่อปริมาณเพนโทซานในเยื่อมีค่าน้อย ค่าดัชนีความแข็งแรงตอแรงฉีกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น มีเพียงกระดาษจากเยื่อที่ใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 90 นาทีเท่านั้น ที่มีค่าดัชนีความแข็งแรงตอแรงฉีกลดลงเมื่อมีปริมาณเพนโทซานในเยื่อต่ำ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันที่แสดงเป็นค่าบวกเพียงค่าเดียว ซึ่งกระดาษจากเยื่อที่ใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 60 นาที มีความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4-3 การเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความแข็งแรงตอแรงฉีกเมื่อมีเพนโทซานในเยื่อน้อย ในลักษณะเช่นนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจาก เมื่อมีปริมาณเพนโทซานในเยื่อต่ำหมายถึงการใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น จึงเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายพันธะระหว่างลิกนินและไซแลนมากขึ้น ทำให้เส้นใยแยกตัวเดี่ยวๆ ออกได้สมบูรณ์ ซึ่งค่าดัชนีความแข็งแรงตอแรงฉีกเป็นดัชนีที่สามารถชี้วัดความแข็งแรงของเส้นใยเดี่ยวๆ ในเยื่อ ดังนั้นจึงทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงตอแรงฉีกมากขึ้น แต่เนื่องจากอาจมีอิทธิพลเสริมด้านความแข็งแรงจากพันธะระหว่างเส้นใยร่วมด้วย จึงทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงตอแรงฉีกไม่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเท่าใดนัก

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพนโทซานในเยื่อมีปริมาณต่ำ ค่าความขาวสว่างของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเป็นผลมาจากเมื่อมีปริมาณเพนโทซานในเยื่อน้อย หมายถึงมีปริมาณของไซแลนในเยื่อที่น้อยเช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อปริมาณไซแลนน้อยลง ทำให้มีโอกาสน้อยที่จะเกิดกรดเฮกเซนยูโรนิกที่มีสมบัติคล้ายกับหมู่โครโมฟอร์ที่ทำให้เกิดสีในลิกนิน ซึ่ง

กรดดังกล่าวยังสามารถเปลี่ยนไปเป็นหมู่โครโมฟอร์ได้ [35] เมื่อมีกรดดังกล่าวน้อยลงจึงทำให้ความขาวสว่างของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างเพนโทซานและความขาวสว่าง

4.3 ผลของไซแลเนสต่อสมบัติกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสไม่ฟอก

ผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.3 นี้ เป็นส่วนหนึ่งของผลการทดลองในตอนี่ 4 ซึ่งเป็นการศึกษาทั้งสมบัติด้านความแข็งแรงต่างๆ และสมบัติทางแสงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสไม่ฟอกที่ผ่านการใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ

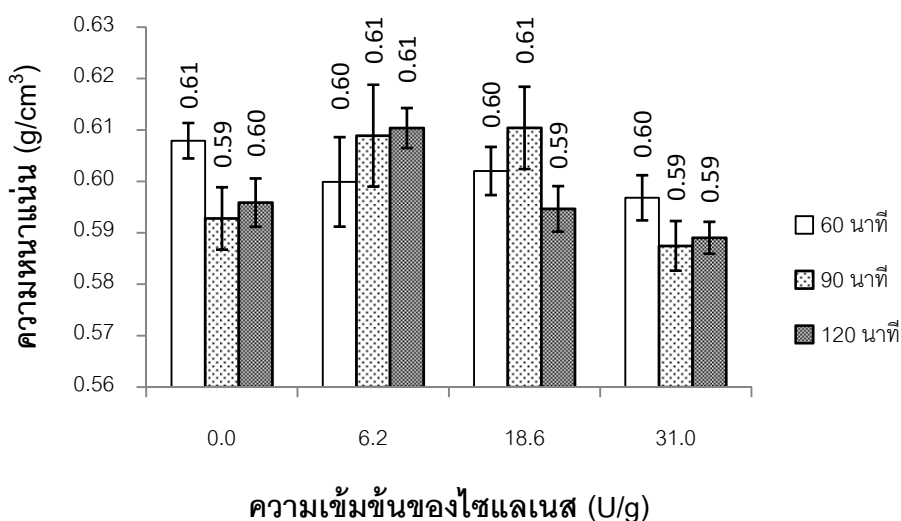
4.3.1 ความหนาแน่นและความฟาม

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่อใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อที่ความเข้มข้นสูงขึ้น กระดาษมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจนถึงที่ความเข้มข้นของไซแลเนสเท่ากับ 6.2 U/g ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แล้วความหนาแน่นมีแนวโน้มที่จะคงที่ เนื่องจากไซแลเนสอาจเข้าทำปฏิกิริยากับส่วนคาร์โบไฮเดรตที่ติดอยู่กับลิกนิน (Lignin-Carbohydrate Complex) โดยเฉพาะในส่วนของไซแลนในเฮมิเซลลูโลส มีผลทำให้ลิกนิน เกิดการแยกตัวออกจากเส้นใยแล้วถูกกำจัดออกบางส่วนในขั้นตอนการล้างเยื่อ เมื่อนำเยื่อไปขึ้นเป็นกระดาษ จึงทำให้เส้นใยเกิดการยุบตัวและแนบตัวได้ดีขึ้น ความหนาแน่นของกระดาษจึงเพิ่มมากขึ้น จนถึงที่ความเข้มข้นไซแลเนสมากกว่า 18.6 U/g ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ความหนาแน่นของกระดาษมีแนวโน้มลดลงสอดคล้องกับผลการทดลองของ Robert และคณะ [36] อาจมีสาเหตุมาจากไซแลนถูกย่อยสลายด้วยไซแลเนสมากขึ้น ทำให้มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสโดยรวมน้อยลง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำของเส้นใย

โดยลักษณะทางโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสที่มีลักษณะการเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (Amorphous region) มีผลโดยตรงต่อการรับน้ำ [37] ดังนั้นเมื่อปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลง จึงทำให้เส้นใยรับน้ำได้น้อยลง การยุบตัวและการแนบตัวของเส้นใยจึงไม่เกิดขึ้นมากนัก โดยความหนาแน่นคือปริมาณของน้ำหนักของเส้นใยเยื่อที่สานตัวอยู่ในกระดาษต่อหน่วยปริมาตรกระดาษ และความฟวมเป็น ส่วนกลับของความหนาแน่น

ตารางที่ 4.3 ความหนาแน่นและความฟวมของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสใน แต่ละความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ

ความเข้มข้นของ ไซแลเนส (U/g O.D.)	เวลาที่ใช้ทำ ปฏิกิริยา (นาที)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความฟวม (cm ³ /g)
0.0 (ชุดการทดลอง ควบคุม)	60	0.61 ± 0.003	1.65 ± 0.009
	90	0.59 ± 0.006	1.69 ± 0.017
	120	0.60 ± 0.005	1.68 ± 0.013
6.2	60	0.60 ± 0.009	1.67 ± 0.024
	90	0.61 ± 0.010	1.64 ± 0.027
	120	0.61 ± 0.004	1.64 ± 0.010
18.6	60	0.60 ± 0.005	1.66 ± 0.013
	90	0.61 ± 0.008	1.64 ± 0.021
	120	0.59 ± 0.004	1.68 ± 0.013
31.0	60	0.60 ± 0.004	1.68 ± 0.012
	90	0.59 ± 0.005	1.70 ± 0.014
	120	0.59 ± 0.003	1.70 ± 0.009



รูปที่ 4-5 ผลของไซแลนเนสในแต่ละความเข้มข้น ทำปฏิกิริยากับเยื่อที่เวลาต่างๆ ต่อความหนาแน่นของกระดาษ

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของไซแลนเนส ในแต่ละความเข้มข้นที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ต่อความหนาแน่นของกระดาษ

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
A ¹	0.000176	2	8.78E-05	2.521272	0.090951	3.190727
B ^{2*}	0.001899	3	0.000633	18.18393	5.09E-08	2.798061
Interaction*	0.001656	6	0.000276	7.930049	5.78E-06	2.294601
Within	0.001671	48	3.48E-05			
Total	0.005401	59				

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ไซแลนเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อต่อความหนาแน่นของกระดาษ

² B คือ ผลของความเข้มข้นของไซแลนเนสที่ใช้ทำปฏิกิริยากับเยื่อต่อความหนาแน่นของกระดาษ

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อความหนาแน่นของกระดาษ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติตามตารางที่ 4.4 พบว่าเวลาที่ใช้ไซแลนเนสเข้าทำปฏิกิริยา และปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซแลนเนสและเวลาที่ใช้ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อความหนาแน่นของกระดาษ ในขณะที่เดียวกันความเข้มข้นของ

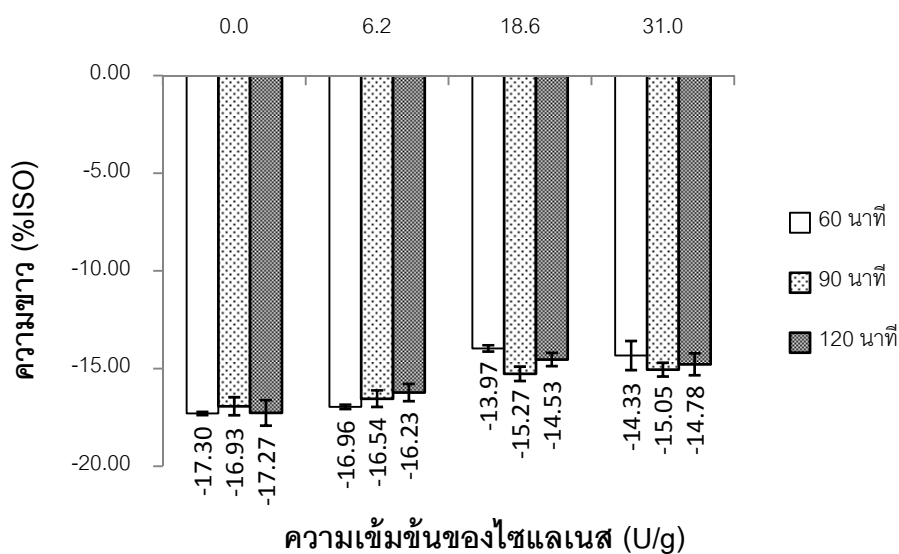
ไซแลเนสไม่ได้ส่งผลต่อความหนาแน่นของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แต่อย่างไรก็ตาม

4.3.2 ความขาวและความขาวสว่าง

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า ความขาวของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชุดการทดลองควบคุม และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นจนถึงที่ความเข้มข้นของไซแลเนสเท่ากับ 18.6 U/g ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จากนั้นค่าความขาวของกระดาษมีแนวโน้มที่จะคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (รูปที่ 4-6) ทั้งนี้เนื่องจากกระดาษที่ได้ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสแต่ยังไม่ผ่านกระบวนการฟอกเยื่อ ค่าความขาวที่ได้จากการทดลองจึงแสดงเป็นค่าที่น้อยกว่าศูนย์

ตารางที่ 4.5 ความขาวและความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ

ความเข้มข้นของ ไซแลเนส (U/g O.D.)	เวลาที่ใช้ทำ ปฏิกิริยา (นาที)	ความขาว (%ISO)	ความขาวสว่าง (%ISO)
0.0 (ชุดการทดลองควบคุม)	60	-17.30 ± 0.08	45.79 ± 0.03
	90	-16.93 ± 0.46	45.94 ± 0.16
	120	-17.27 ± 0.65	45.82 ± 0.39
6.2	60	-16.96 ± 0.11	45.87 ± 0.04
	90	-16.54 ± 0.42	46.03 ± 0.18
	120	-16.23 ± 0.44	46.24 ± 0.25
18.6	60	-13.97 ± 0.16	46.96 ± 0.57
	90	-15.27 ± 0.37	46.51 ± 0.09
	120	-14.53 ± 0.34	46.82 ± 0.12
31.0	60	-14.33 ± 0.75	47.00 ± 0.26
	90	-15.05 ± 0.35	46.64 ± 0.10
	120	-14.78 ± 0.56	46.63 ± 0.14



รูปที่ 4-6 ผลของไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้น ทำปฏิกิริยากับเยื่อที่เวลาต่างๆ ต่อความขาวของกระดาษ

เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาที่ใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยาที่เท่ากัน พบว่าที่ความเข้มข้นของไซแลเนสเท่ากับ 18.6 U/g ของน้ำหนักระดาษเยื่อแห้ง มีค่าความขาวมากที่สุดในทุกๆ ชุดการทดลอง และนอกจากนี้ ยังพบว่าเมื่อใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อนาน 60 นาที ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 18.6 U/g ของน้ำหนักระดาษเยื่อแห้ง จะให้ค่าความขาวของกระดาษมากที่สุด ซึ่งถ้าใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสเท่ากับ 6.2 U/g ของน้ำหนักระดาษเยื่อแห้ง จะให้ค่าความขาวน้อยที่สุดหรือแทบจะไม่มีแตกต่างกับชุดการทดลองควบคุม (ไม่มีการใช้ไซแลเนส) เมื่อใช้เวลาทำปฏิกิริยาเท่ากัน

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของไซแลเนส ในแต่ละความเข้มข้นที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ต่อค่าความขาวของกระดาษ

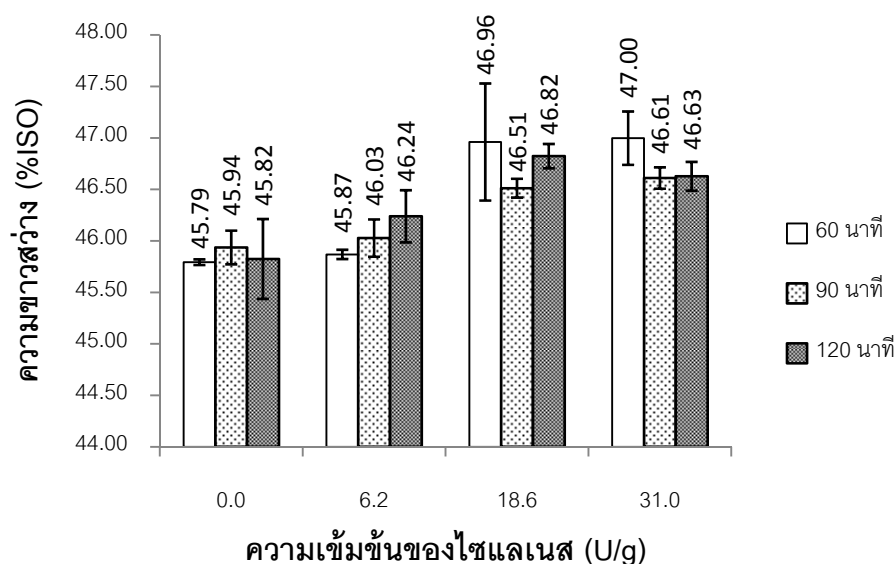
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
A ^{1*}	1.47897	2	0.739485	3.833411	0.026181	3.123907
B ^{2*}	106.8186	3	35.60619	184.5786	1.01E-33	2.731807
Interaction*	8.822308	6	1.470385	7.622316	2.37E-06	2.227404
Within	13.88918	72	0.192905			
Total	131.009	83				

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อต่อค่าความขาว

² B คือ ผลของความเข้มข้นของไซแลเนสที่ใช้ทำปฏิกิริยากับเยื่อต่อค่าความขาว

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อค่าความขาว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ทางสถิติ ด้วยการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 4.6) พบว่าทั้งเวลาในการใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อ ความเข้มข้นของไซแลเนส และปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความเข้มข้นที่ใช้ ต่างส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าความขาวของกระดาษที่ได้ ทั้งสามปัจจัย



รูปที่ 4-7 ผลของไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้น ทำปฏิกิริยากับเยื่อที่เวลาต่างๆ ต่อความขาวสว่างของกระดาษ

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้น ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษ

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
A ¹	0.280181	2	0.14009	2.335212	0.10408	3.123907
B ^{2*}	14.0716	3	4.690535	78.18799	1.34E-22	2.731807
Interaction*	1.690657	6	0.281776	4.697015	0.000437	2.227404
Within	4.319314	72	0.05999			
Total	20.36176	83				

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อต่อค่าความขาวสว่าง

² B คือ ผลของความเข้มข้นของไซแลเนสที่ใช้ทำปฏิกิริยากับเยื่อต่อค่าความขาวสว่าง

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อค่าความขาวสว่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เช่นเดียวกันกับค่าความขาวของกระดาษ เมื่อใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อที่ความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น ค่าความขาวสว่างของกระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (สอดคล้องกับผลการใช้ไซแลเนสทำปฏิกิริยากับเยื่อไซตาจากฟางข้าวสาลี [38, 34] และเยื่อคราฟต์จากไม้ใบเลี้ยงคู่ [39] แต่ให้ผลตรงข้ามกับการใช้ไซแลเนสทำปฏิกิริยากับเยื่อคราฟต์จากพืชเมล็ดเปลือย [40]) จนถึงที่ความเข้มข้นเท่ากับ 18.6 U/g ของน้ำหนักระดาษเยื่อแห้ง ถึงแม้ว่าค่าความขาวสว่างที่มากที่สุดที่แสดงในรูปที่ 4-7 คือกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น 31.0 U/g ของน้ำหนักระดาษเยื่อแห้ง แต่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงให้เห็นว่าค่าความขาวสว่างในกระดาษจากทั้งสองความเข้มข้นดังกล่าวมีค่าที่อยู่ในระดับเดียวกัน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า ค่าความขาวสว่างที่เพิ่มขึ้นของกระดาษจะเริ่มมีแนวโน้มคงที่ ที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 18.6 U/g ของน้ำหนักระดาษเยื่อแห้งเมื่อพิจารณาที่เวลาในการใช้ไซแลเนสเท่ากัน ในขณะที่เมื่อใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสเท่ากับ 6.2 U/g ของน้ำหนักระดาษเยื่อแห้ง จะให้ค่าความขาวสว่างของกระดาษในระดับเดียวกันกับชุดการทดลองควบคุมซึ่งไม่ได้มีการใช้ไซแลเนสแต่อย่างใด

จากแนวโน้มของความขาวและความขาวสว่างของกระดาษดังที่กล่าวมา อาจมีสาเหตุมาจาก ไซแลเนสทำการย่อยสลายไซแลนในเฮมิเซลลูโลสส่วนที่ติดอยู่กับลิกนิน ทำให้ลิกนินบางส่วนถูกกำจัดแยกออกจากเส้นใย ค่าความขาวสว่างจึงเพิ่มมากขึ้น แต่เป็นการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งเป็นไปได้ว่าลิกนินที่ถูกแยกออกจากเส้นใยได้ถูกกำจัดออกจากเยื่อไปแค่บางส่วนเท่านั้น โดยไซแลเนสทำหน้าที่เพียงช่วยทำให้โครงสร้างของสารเชิงซ้อนระหว่างคาร์โบไฮเดรตและลิกนินเปลี่ยนไป เสมือนเป็นการเปิดโครงสร้างเส้นใยเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าทำปฏิกิริยาโดยสารเคมีในการฟอกเยื่อในขั้นตอนต่อไป ไม่ได้เป็นการกำจัดลิกนินโดยตรง ซึ่งผลของการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ฟอกเยื่อในขั้นตอนต่อจากนั้นได้รายงานไว้ในหัวข้อที่ 4.4 ทั้งนี้หากวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ได้ ด้วยวิธีการทางสถิติตามตารางที่ 4.7 พบว่าเวลาในการใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญกับความขาวสว่างของกระดาษ หากแต่ความเข้มข้นของไซแลเนสที่ใช้ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความเข้มข้น เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญจากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

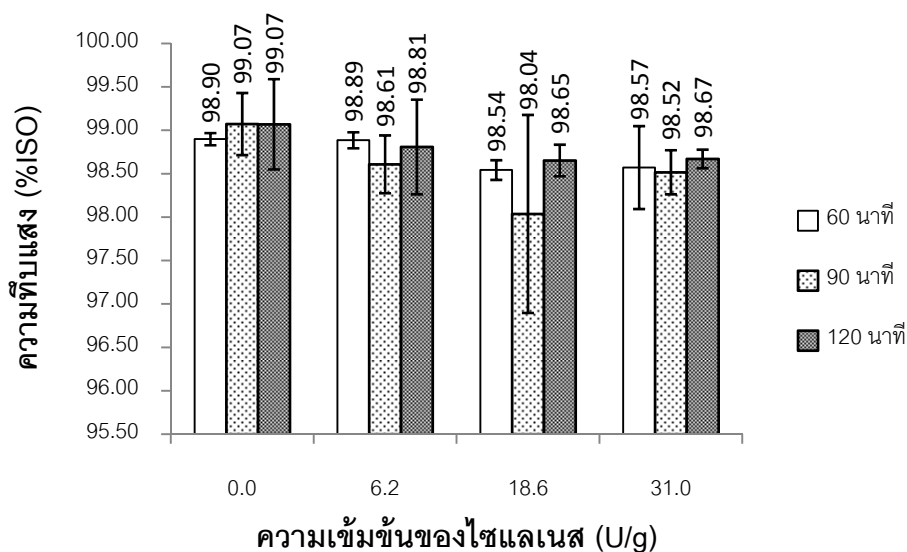
4.3.3 ความทึบแสงของกระดาษ

ตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4-8 แสดงผลของไซแลเนสที่มีต่อความทึบแสงของกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยา จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่าเมื่อมีการใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อ ทำให้กระดาษมีค่าความทึบแสงที่ลดลงเมื่อเทียบกับชุดการ

ทดลองควบคุม ซึ่งมีสาเหตุมาจากที่กระดาษมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น ดังได้แสดงไว้แล้วในตารางที่ 4.3 โดยเมื่อกระดาษมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่ช่องว่าง (Voids) ภายในกระดาษลดลง เกิดการกระเจิงแสงในโครงสร้างของกระดาษลดลง ส่งผลให้ความทึบแสงโดยรวมของกระดาษลดลงในที่สุด [8] ทั้งนี้ความทึบแสงไม่ได้มีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงมากนักในแต่ละความเข้มข้นของไซแลเนสและเวลาที่ใช้ โดยสังเกตจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในรูปที่ 4-8 แต่อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาผลการทดลองทางสถิติโดยวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนที่ได้จากการทดลอง (ตารางที่ 4.10) แสดงให้เห็นว่ามีเพียงความเข้มข้นของไซแลเนสที่ใช้เท่านั้น ที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความทึบแสงของกระดาษ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.8 ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้นที่เวลาต่างๆ

ความเข้มข้นของไซแลเนส (U/g O.D.)	เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา (นาที)	ความทึบแสง (%)
0.0 (ชุดการทดลองควบคุม)	60	98.90 ± 0.07
	90	99.07 ± 0.36
	120	99.07 ± 0.52
6.2	60	98.89 ± 0.09
	90	98.61 ± 0.33
	120	98.81 ± 0.55
18.6	60	98.54 ± 0.11
	90	98.04 ± 1.14
	120	98.65 ± 0.18
31.0	60	98.57 ± 0.48
	90	98.52 ± 0.25
	120	98.67 ± 0.11



รูปที่ 4-8 ผลของไชลเลนเนสในแต่ละความเข้มข้น ทำปฏิกิริยากับเยื่อที่เวลาต่างๆ ต่อความทึบแสงของกระดาษ

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของไชลเลนเนส ในแต่ละความเข้มข้นที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ต่อค่าความทึบแสงของกระดาษ

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
A ¹	0.735543	2	0.367771	1.779102	0.176129	3.123907
B ^{2*}	3.810023	3	1.270008	6.143688	0.000886	2.731807
Interaction	1.252552	6	0.208759	1.009875	0.425793	2.227404
Within	14.88366	72	0.206717			
Total	20.68178	83				

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใส่ไชลเลนเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อต่อค่าความทึบแสง

² B คือ ผลของความเข้มข้นของไชลเลนเนสที่ใช้ทำปฏิกิริยากับเยื่อต่อค่าความทึบแสง

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อค่าความทึบแสง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

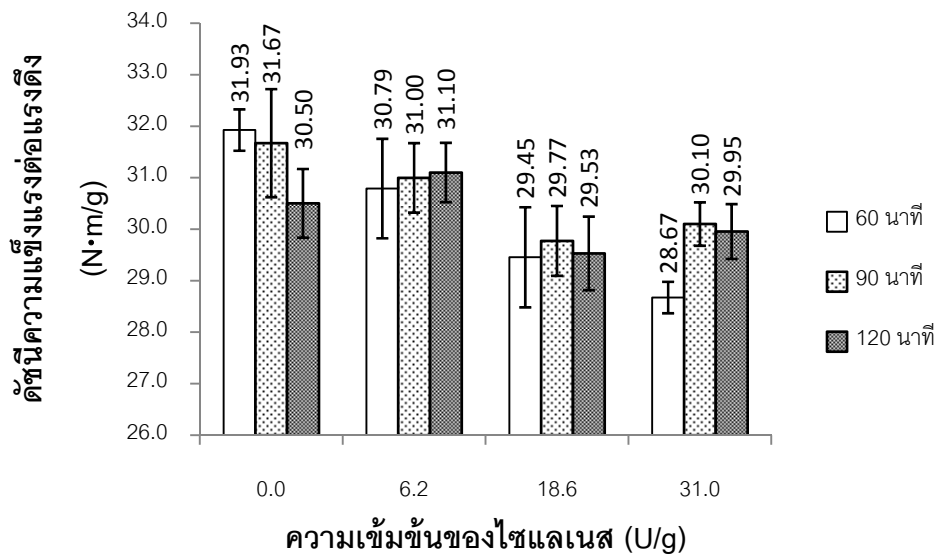
4.3.4 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

จากตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4-9 ซึ่งแสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใส่ไชลเลนเนสเข้าทำปฏิกิริยา จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษมีแนวโน้มลดลง เมื่อความเข้มข้นของไชลเลนเนสที่ใช้เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะนอกจากไชลเลนเนสจะย่อยสลายไชลเลนในส่วนของสารประกอบเชิงซ้อน

ระหว่างลิกนินและคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไซแลนและลิกนินในส่วนนั้น ทำให้เส้นใยมีโครงสร้างเปิดมากขึ้นและง่ายต่อการถูกเข้าทำปฏิกิริยาแล้ว ไซแลนสยังเกิดปฏิกิริยาย่อยสลายสายหลักของไซแลนตามกลไกแบบเอนโด (Endo-mechanism) โดยทำการสลายพันธะบีตา-1,4-ไซโลซิดิกในสายหลักของไซแลนแบบสุ่ม [22] ด้วย ทำให้เฮมิเซลลูโลสในเส้นใยถูกทำลายเช่นเดียวกัน ซึ่งเฮมิเซลลูโลสทำหน้าที่เหมือนเป็นกาวเชื่อมระหว่างเส้นใย [37] เมื่อเฮมิเซลลูโลสถูกทำลาย จึงทำให้การสร้างพันธะระหว่างเส้นใยได้น้อยลง จึงส่งผลทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงเช่นกัน [8] โดยผลการทดลองที่ได้ขัดแย้งกับผลการทดลองที่ใช้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับเยื่อ ซึ่งค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเซลลูโลสสูงขึ้น [41] แต่สอดคล้องกับผลการทดลองที่ใช้ไซแลนสจากเชื้อ *Saccharomonospora viridis* [36] และเชื้อ *Streptomyces thermoviolaceus* [42] เข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อของไม้เบิร์ช (Birchwood) และผลการทดลองที่ใช้ไซแลนสจากเชื้อ *Aspergillus niger* ทำปฏิกิริยากับเยื่อฟางข้าวสาลี (Wheat straw) [34] ซึ่งความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการทดลองควบคุม (ไม่มีการใช้ไซแลนส)

ตารางที่ 4.10 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลนสในแต่ละความเข้มข้น ที่เวลาต่างๆ

ความเข้มข้นของไซแลนส (U/g O.D.)	เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา (นาที)	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (N·m/g)
0.0 (ชุดการทดลองควบคุม)	60	31.93 ± 0.40
	90	31.67 ± 1.05
	120	30.50 ± 0.67
6.2	60	30.79 ± 0.97
	90	31.00 ± 0.67
	120	31.10 ± 0.58
18.6	60	29.45 ± 0.97
	90	29.77 ± 0.68
	120	29.53 ± 0.71
31.0	60	28.67 ± 0.31
	90	30.10 ± 0.42
	120	29.95 ± 0.53



รูปที่ 4-9 ผลของไชลเลนส์ในแต่ละความเข้มข้น ทำปฏิกิริยากับเยื่อที่เวลาต่างๆ ต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่เวลาที่ใช้ไชลเลนส์เข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อที่เท่ากัน พบว่า เมื่อใช้ไชลเลนส์ทำปฏิกิริยากับเยื่อนาน 60 นาที มีอัตราการลดลงของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าเวลาของการใช้ไชลเลนส์เข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อ ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ โดยมีเพียงความเข้มข้นของไชลเลนส์และปฏิสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัย ที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของไซแลเนส ในแต่ละความเข้มข้นที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ

Source of						
Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
A ¹	2.107803	2	1.053901	2.144142	0.128258	3.190727
B ^{2*}	38.83498	3	12.94499	26.33634	3.23E-10	2.798061
Interaction*	10.35681	6	1.726136	3.511789	0.005833	2.294601
Within	23.59325	48	0.491526			
Total	74.89284	59				

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

² B คือ ผลของความเข้มข้นของไซแลเนสที่ใช้ทำปฏิกิริยากับเยื่อต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

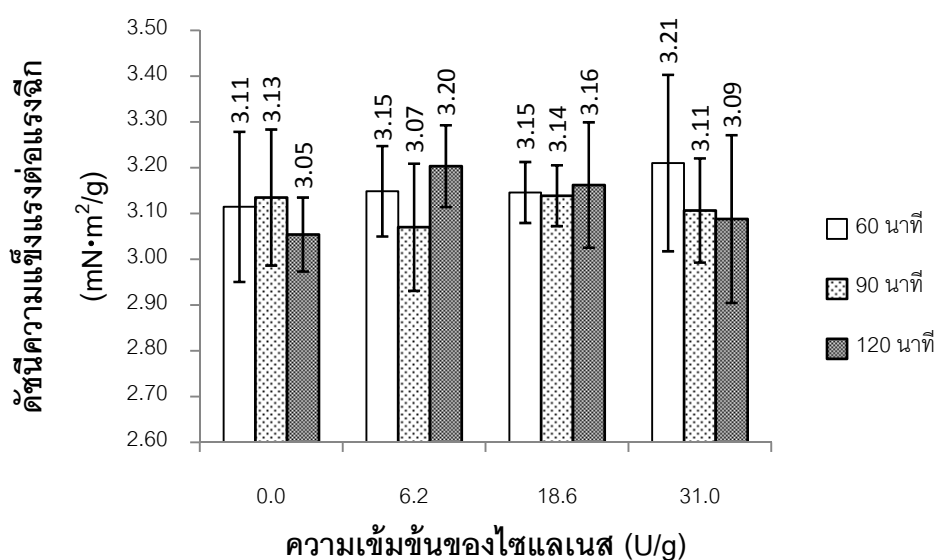
* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.3.5 ความแข็งแรงต่อแรงฉีก

จากตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4-10 แสดงค่าดัชนีความต้านทานแรงฉีกของกระดาษจากที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนส จากผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจากแนวโน้มของค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง โดยลักษณะเช่นนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากไซแลเนสย่อยสลายไซแลนในเฮมิเซลลูโลสที่ทำหน้าที่เสมือนตัวเชื่อมระหว่างเส้นใย ทำให้สัดส่วนของเส้นใยที่แยกตัวออกสมบูรณ์เพิ่มขึ้น โดยสามารถพิจารณาจากค่าแอลฟาเซลลูโลส (α -cellulose) ที่เพิ่มมากขึ้นภายหลังการใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อ [33] ได้อีกทางหนึ่ง ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยเดี่ยวๆ เป็นสำคัญ จึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Zhao และคณะ [34] แต่ขัดแย้งกับผลการทดลองของ Roberts และคณะ [36, 42] ซึ่งได้รายงานเกี่ยวกับค่า Zero span breaking length ของกระดาษจากเยื่อเบิร์ชที่ผ่านการใช้ไซแลเนสไว้ว่ามีค่าลดลงเมื่อเทียบกับชุดการทดลองควบคุม โดยค่าดังกล่าวสามารถบ่งชี้ถึงความแข็งแรงของเส้นใยเดี่ยว เป็นการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกอีกวิธีหนึ่งนั่นเอง

ตารางที่ 4.12 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้น ที่เวลาต่างๆ

ความเข้มข้นของไซแลเนส (U/g O.D.)	เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา (นาที)	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (mN·m ² /g)
0.0 (ชุดการทดลองควบคุม)	60	3.11 ± 0.16
	90	3.13 ± 0.15
	120	3.05 ± 0.08
6.2	60	3.15 ± 0.10
	90	3.07 ± 0.14
	120	3.20 ± 0.09
18.6	60	3.15 ± 0.07
	90	3.14 ± 0.07
	120	3.16 ± 0.14
31.0	60	3.21 ± 0.19
	90	3.11 ± 0.11
	120	3.09 ± 0.18



รูปที่ 4-10 ผลของไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้น ทำปฏิกิริยากับเยื่อที่เวลาต่างๆ ต่อความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ

เมื่อเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นของไซแลเนสต่างๆ เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากันพบว่า ที่เวลาการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 นาที มีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกชัดเจนที่สุด แต่ถ้าใช้เวลานานถึง 120 นาที พบว่าค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อความเข้มข้นของไซแลเนสเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4-10 แสดงถึงว่ายิ่งใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสน้อย ที่เวลา 120 นาที กระดาษยังมีค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกมากเมื่อเทียบกับชุดการทดลองควบคุม (ไม่ใช่ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยา)

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของไซแลเนส ในแต่ละความเข้มข้น ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
A ¹	0.018403	2	0.009202	0.541558	0.585354	3.190727
B ²	0.019842	3	0.006614	0.389269	0.761237	2.798061
Interaction	0.089083	6	0.014847	0.873814	0.521119	2.294601
Within	0.815579	48	0.016991			
Total	0.942908	59				

¹A คือ ผลของเวลาที่ใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก

²B คือ ผลของความเข้มข้นของไซแลเนสที่ใช้ทำปฏิกิริยากับเยื่อต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก

อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย อีกทั้งยังเป็นการเปลี่ยนแปลงที่อยู่ในระดับเดียวกันหากพิจารณาจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตามตารางที่ 4.13 พบว่า ความเข้มข้นของไซแลเนส เวลาที่ใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยา และปฏิสัมพันธ์ของทั้งสองตัวแปร ไม่ได้ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษแต่อย่างใด

4.4 ผลของไซแลเนสต่อสมบัติกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสที่ผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.4 นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการทดลองในตอนที่ 5 โดยทำการเลือกเยื่อของสภาวะที่ผ่านการใช้ไซแลเนสแล้วให้ปริมาณเพนโทซานในเยื่อน้อยที่สุด มาเข้าสู่กระบวนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ นำไปขึ้นเป็นกระดาษเพื่อนำไปทดสอบแล้ว

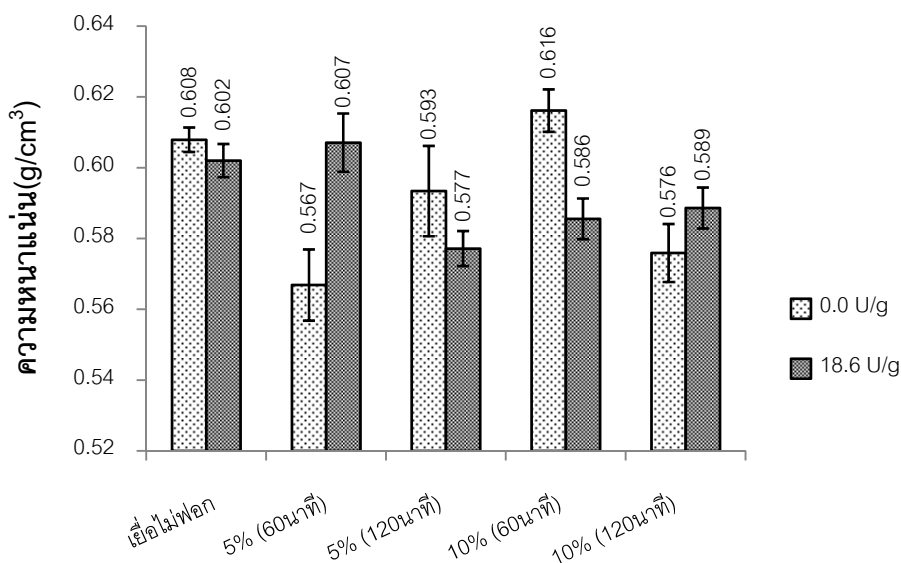
พิจารณาเปรียบเทียบสมบัติสุดท้ายของกระดาษ ระหว่างก่อนกับหลังการฟอกและเปรียบเทียบกับชุดการทดลองควบคุม

4.4.1 ความหนาแน่นของกระดาษ

ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ และไม่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในขั้นตอนก่อนการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.14 ซึ่งพบว่า การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อในขั้นตอนก่อนการฟอก มีผลทำให้ความหนาแน่นของกระดาษโดยรวมลดลง (รูปที่ 4-11) ซึ่งได้ผลตรงข้ามกับผลการทดลองของ Atik และคณะ [43] ลักษณะเช่นนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้โครงสร้างเส้นใยเปิดออกไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงมีโอกาสเข้าทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสมากยิ่งขึ้น ส่งผลให้ผนังเซลล์บางลงจึงเกิดการยุบตัวของเส้นใยได้มากขึ้น ทำให้กระดาษแน่นขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ฟอก อย่างไรก็ตามอิทธิพลของการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เวลาต่างๆ ส่งผลต่อความหนาแน่นของกระดาษในทิศทางที่ไม่แน่นอน โดยมีเพียงกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วนำไปฟอกที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง เป็นเวลา 60 นาทีเท่านั้นที่มีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจนตามรูปที่ 4-11 และยังพบว่ามีค่าสูงกว่าค่าความหนาแน่นของกระดาษก่อนทำการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อีกด้วย

ตารางที่ 4.14 ความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ภายหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H ₂ O ₂ (%)	เวลาฟอก (นาที)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	
		0.0 U/g O.D.	18.6 U/g O.D.
5	60	0.60 ± 0.01	0.61 ± 0.01
	120	0.50 ± 0.01	0.58 ± 0.00
10	60	0.62 ± 0.01	0.59 ± 0.01
	120	0.58 ± 0.01	0.59 ± 0.01



ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

รูปที่ 4-11 ผลของการฟอกเชื้อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 % และ 10 % เป็นเวลา 60 และ 120 นาที ต่อความหนาแน่นของกระดาษ เปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ใช้ไซแลเนสและการทดลองควบคุม (ไม่ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก)

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาที่ใช้ฟอก ร่วมกับการใช้ไซแลเนสต่อความหนาแน่นของกระดาษ โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ ตามตารางที่ 4.15 พบว่ามีเพียงปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่านั้นที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของกระดาษที่ผลิตจากเชื้อที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอกอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อมีการใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก พบว่าทั้งปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาที่ใช้ในการฟอก ต่างไม่ได้ส่งผลต่อความหนาแน่นของกระดาษแต่อย่างใด ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาฟอก ต่อค่าความหนาแน่นของกระดาษ

	0.0 U/g O.D.			18.6 U/g O.D.		
	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	4.207952	0.056979	4.493998	0.640096	0.431524	4.259677
B ²	31.35388	3.99E-05*	4.493998	3.219538	0.085372	4.259677
A×B ³	0.196093	0.663822	4.493998	4.038819	0.055893	4.259677

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ฟอกเยื่อต่อค่าความหนาแน่นของกระดาษ

² B คือ ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าความหนาแน่นของกระดาษ

³ A×B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาฟอกและปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อค่าดัชนีความหนาแน่นของกระดาษ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

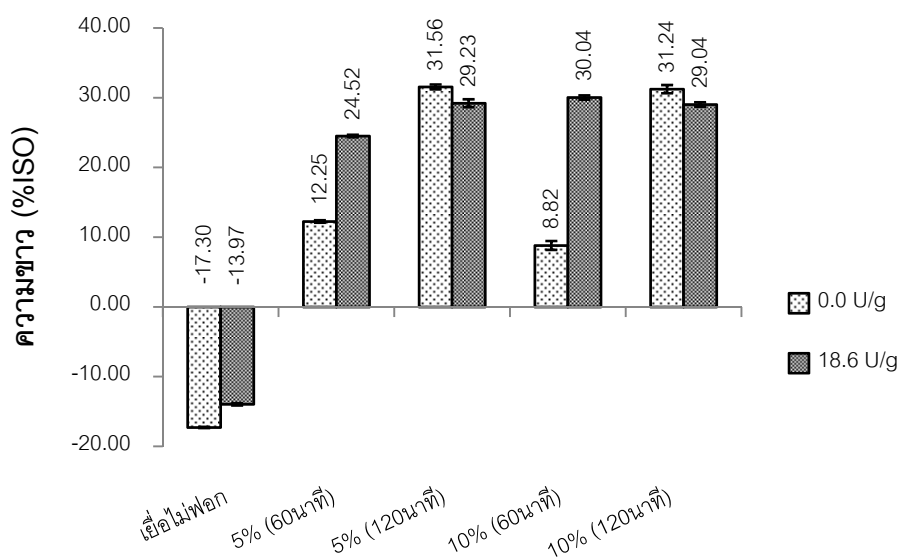
4.4.2 ความขาวและความขาวสว่าง

จากตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4-12 ซึ่งแสดงค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในขั้นตอนก่อนการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้ความขาวและความสว่างของกระดาษเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับชุดการทดลองควบคุม (ไม่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในขั้นตอนก่อนการฟอก) ซึ่งสอดคล้องกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับเยื่อในขั้นตอนก่อนการฟอกทั้งเยื่อจากพีชเมลดเป็ล้อย [44] เยื่อจากไม้ใบเลี้ยงคู่ [45, 43] และเยื่อจากฟางข้าวสาลี [34] จากการทดลองครั้งนี้พบว่า เมื่อใช้เวลาในการฟอกเยื่อนาน 60 นาที และใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จะได้ความขาวสุดท้ายของกระดาษมากกว่าเยื่อที่ไม่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถึงร้อยละ 30 ถ้าใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้งที่เวลาเท่ากัน จะได้ความขาวสุดท้ายของกระดาษมากกว่าเยื่อที่ไม่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถึงร้อยละ 69 แต่หากทำการฟอกเยื่อเป็นเวลา 120 นาที ความขาวสุดท้ายของกระดาษจะน้อยกว่าเยื่อที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถึงร้อยละ 12 และร้อยละ 11 เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ตามลำดับ

ตารางที่ 4.16 ความขาวและความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ภายหลังจากการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

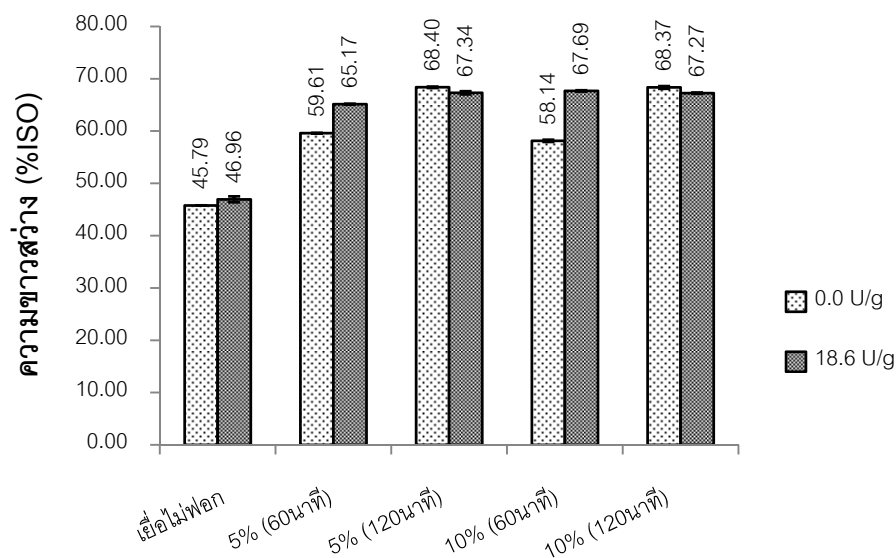
ปริมาณ H ₂ O ₂ (%)	เวลาฟอก (นาที)	ความขาว (%ISO)		ความขาวสว่าง (%ISO)	
		0.0 U/g	18.6 U/g	0.0 U/g	18.6 U/g
5	60	12.25 ± 0.17	24.52 ± 0.18	59.61 ± 0.07	65.17 ± 0.09
	120	31.56 ± 0.35	29.23 ± 0.56	68.40 ± 0.14	67.34 ± 0.31
10	60	8.82 ± 0.64	30.04 ± 0.30	58.14 ± 0.22	67.69 ± 0.12
	120	31.24 ± 0.59	29.04 ± 0.31	68.37 ± 0.26	67.27 ± .012

นอกจากนี้ยังพบว่ากระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะให้ค่าความขาวที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ เช่นเดียวกับกับค่าความขาวสว่างของกระดาษที่ได้หลังฟอก ดังแสดงในรูปที่ 4-12 และรูปที่ 4-13



ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

รูปที่ 4-12 ผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 % และ 10 % เป็นเวลา 60 และ 120 นาที ต่อความขาวของกระดาษ เปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และการทดลองควบคุม



ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

รูปที่ 4-13 ผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 % และ 10 % เป็นเวลา 60 และ 120 นาที ต่อความขาวสว่างของกระดาษ เปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ใช้โซลเลนส์และการทดลองควบคุม

ความขาวสว่างของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้โซลเลนส์แล้วนำไปฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันกับความขาวของกระดาษเยื่อที่ผ่านการใช้โซลเลนส์แล้วฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นเวลา 60 นาที จะให้กระดาษที่มีความขาวสว่างสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเยื่อที่ไม่ได้ใช้โซลเลนส์ก่อนการฟอก ซึ่งเมื่อใช้เวลาในการฟอกเยื่อนาน 60 นาที และใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จะได้ความขาวสว่างสุดท้ายของกระดาษมากกว่าเยื่อที่ไม่ใช้โซลเลนส์ ถึงร้อยละ 9 ถ้าใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง ฟอกที่เวลาเท่ากัน จะได้ความขาวสว่างสุดท้ายของกระดาษมากกว่าเยื่อที่ไม่ใช้โซลเลนส์ ถึงร้อยละ 16 ทั้งนี้เนื่องจากโซลเลนส์เข้าย่อยสลายโซลเลนในส่วนที่เป็นสารเชิงซ้อนระหว่างคาร์โบไฮเดรตและลิกนิน ทำให้ลิกนินเกิดการแยกตัวบางส่วนออกจากโครงสร้างของเส้นใย แต่ยังไม่สามารถกำจัดลิกนินออกโดยตรง ดังนั้น จึงยังไม่เห็นความเปลี่ยนแปลงของค่าความขาวสว่างก่อนฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างชัดเจน และการย่อยสลายโซลเลนส์ยังเสมือนเป็นการช่วยเปิดโครงสร้างของเส้นใยทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับลิกนินได้ง่ายยิ่งขึ้น จึงทำให้ความขาวสว่างสุดท้ายเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดซึ่งสอดคล้องกับเหตุผลในหัวข้อ 4.3.2

แต่เป็นที่น่าสังเกตว่า หากทำการฟอกเยื่อเป็นเวลา 120 นาที ความขาวสว่างสุดท้ายของกระดาษจะน้อยกว่าเยื่อที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ร้อยละ 10 เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทั้งที่ปริมาณร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง และหากพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติตามตารางที่ 4.17 และตารางที่ 4.18 แล้ว พบว่าเวลาที่ใช้ในการฟอกและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ล้วนแล้วแต่มีผลต่อความขาวและความขาวสว่างของกระดาษ ทั้งจากเยื่อที่ใช้ไฮโดรเจนในขั้นตอนก่อนการฟอกและไม่ใช้ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาฟอก ต่อค่าความขาวของกระดาษ

	0.0 U/g O.D.			18.6 U/g O.D.		
	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	9580.244	1.17E-23*	4.493998	40.05493	1.53E-06*	4.259677
B ²	77.68016	1.54E-07*	4.493998	126941.5	3.35E-46*	4.259677
A×B ³	53.33764	1.77E-06*	4.493998	35.52816	3.75E-06*	4.259677

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ฟอกเยื่อต่อค่าความขาวของกระดาษ

² B คือ ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าความขาวของกระดาษ

³ A×B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาฟอกและปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อค่าดัชนีความขาวของกระดาษ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาฟอก ต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษ

	0.0 U/g O.D.			18.6 U/g O.D.		
	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	12883.34	1.1E-24*	4.493998	156.1095	5.39E-12*	4.259677
B ²	80.82232	1.18E-07*	4.493998	308.1281	3.38E-15*	4.259677
A×B ³	73.27903	2.28E-07*	4.493998	347.4181	8.81E-16*	4.259677

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ฟอกเยื่อต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษ

² B คือ ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษ

³ A×B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาฟอกและปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อค่าดัชนีความขาวสว่างของกระดาษ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

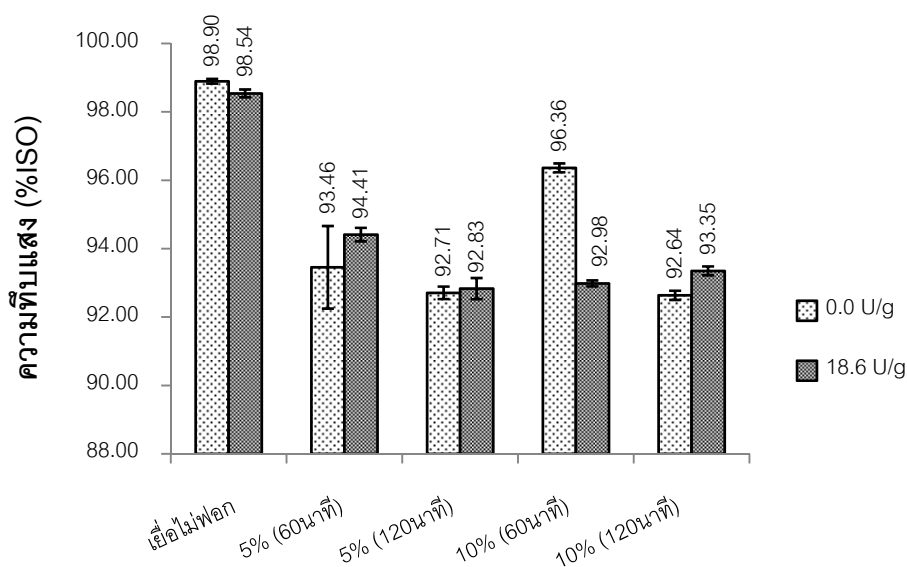
4.4.3 ความทึบแสงของกระดาษ

จากตารางที่ 4.19 และภาพที่ 4-14 แสดงค่าความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสก่อนฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เทียบกับเยื่อที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนสก่อนฟอก โดยในเชิงทฤษฎีแล้วเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสจะมีค่าความทึบแสงที่ลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการฟอก และมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกขึ้น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากปริมาณไฟน์ (Fines) หรือเส้นใยขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวมาก ซึ่งส่วนใหญ่มักจะเป็นกลุ่มของเฮมิเซลลูโลสหรือโอลิโกแซกคาไรด์สายสั้นๆ ถูกย่อยสลายบางส่วนโดยไซแลเนส แล้วถูกทำปฏิกิริยาโดยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อีกครั้ง ทำให้ปริมาณไฟน์ในโครงสร้างกระดาษน้อยลง มีพื้นที่ผิวในการกระเจิงแสงน้อยลง ส่งผลให้ความทึบแสงน้อยลงในที่สุด แต่ผลที่ได้จากการทดลองนี้ให้ผลที่ไม่ชัดเจน

ตารางที่ 4.19 ความทึบแสงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไซแลเนส ภายหลังจากการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H ₂ O ₂ (%)	เวลาฟอก (นาที)	ความทึบแสง (%ISO)	
		0.0 U/g O.D.	18.6 U/g O.D.
5	60	93.46 ± 1.21	94.41 ± 0.20
	120	92.71 ± 1.18	92.83 ± 0.31
10	60	96.36 ± 0.13	92.98 ± 0.09
	120	92.64 ± 0.13	93.35 ± 0.13

เมื่อทำการพิจารณาอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ โดยการวิเคราะห์ผลทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตามตารางที่ 4.20 พบว่า ทั้งปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอก ล้วนมีผลต่อความทึบแสงทั้งจากกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสและไม่ได้ใช้ไซแลเนสก่อนการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

รูปที่ 4-14 ผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 % และ 10 % เป็นเวลา 60 และ 120 นาที ต่อความทึบแสงของกระดาษ เปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ใช้โซเดเนสและการทดลองควบคุม

ตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาฟอก ต่อค่าความทึบแสงของกระดาษ

	0.0 U/g O.D.			18.6 U/g O.D.		
	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	65.53863	4.75E-07*	4.493998	64.45507	2.96E-08*	4.259677
B ²	26.29693	0.000101*	4.493998	36.28445	3.21E-06*	4.259677
A×B ³	29.11526	5.94E-05*	4.493998	166.1244	2.81E-12*	4.259677

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ฟอกเยื่อต่อค่าความทึบแสงของกระดาษ

² B คือ ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าความทึบแสงของกระดาษ

³ A×B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาฟอกและปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

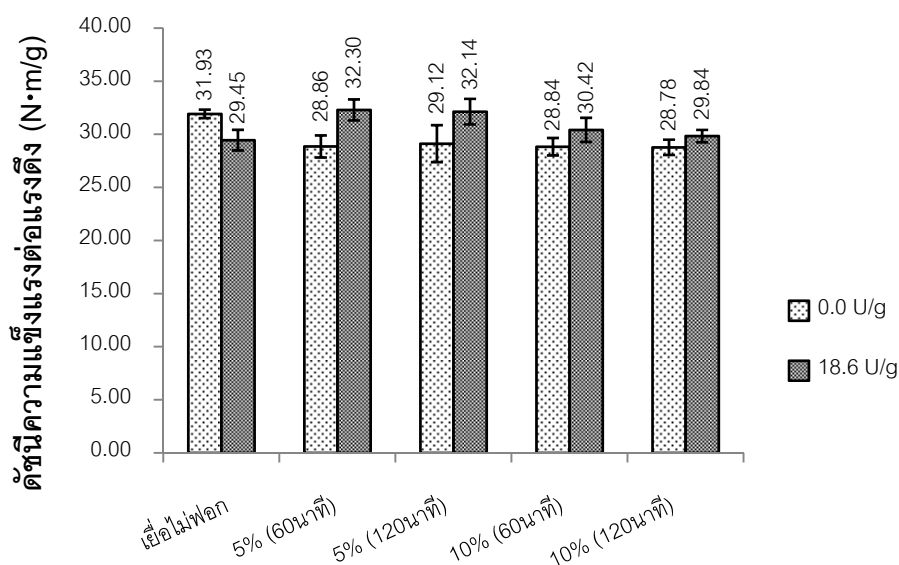
* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อค่าดัชนีความทึบแสงของกระดาษ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.4.4 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

จากตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4-15 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไซแลเนส ภายหลังจากการพอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณและเวลาต่างๆ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า กระดาษที่ผลิตจากเยื่อพอกที่ผ่านการใช้ไซแลเนส มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นในทุกสภาวะการทดลอง เมื่อเทียบกับกระดาษจากเยื่อพอกที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนส (ขัดแย้งกับผลจากการใช้ไซแลเนสทำปฏิกิริยากับเยื่อจากฟางข้าวสาลี [34] และเยื่อจากไม้เบิร์ช [42]) ผลการทดลองดังกล่าวตรงข้ามกับกระดาษจากเยื่อที่ไม่ได้ผ่านการพอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงเมื่อมีการใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจาก เมื่อไซแลเนสเข้าย่อยสลายไซแลนในเยื่อไม่พอก ทำให้ปริมาณของเฮมิเซลลูโลสโดยรวมของเยื่อลดลง เส้นใยจึงรับน้ำหนักน้อยลง ส่งผลให้มีการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยน้อยลง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงในเยื่อไม่พอกจึงมีค่าน้อยลง แต่จากปฏิกิริยาระหว่างไซแลเนสกับไซแลนที่เกิดขึ้นดังกล่าว จะทำให้โครงสร้างของผนังเซลล์เปิดออก เมื่อทำการพอกเยื่อต่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ง่ายต่อการเข้าทำปฏิกิริยากับลิกนิน ทำให้ปริมาณลิกนินโดยรวมในเยื่อลดน้อยลง สัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตในเยื่อเพิ่มมากขึ้น โอกาสในการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยเพิ่มมากขึ้น ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจึงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการพอกนั่นเอง

ตารางที่ 4.21 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไซแลเนส ภายหลังจากการพอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H ₂ O ₂ (%)	เวลาพอก (นาที)	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (N·m/g)	
		0.0 U/g O.D.	18.6 U/g O.D.
5	60	28.86 ± 1.04	32.30 ± 0.99
	120	29.12 ± 1.74	32.14 ± 1.20
10	60	28.84 ± 0.82	30.42 ± 1.13
	120	28.78 ± 0.72	29.84 ± 0.58



ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

รูปที่ 4-15 ผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 % และ 10 % เป็นเวลา 60 และ 120 นาที ต่อความแข็งแรงตึงของกระดาษ เปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ใช้โซเดเนสและการทดลองควบคุม

ตารางที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาฟอก ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงตึงของกระดาษ

	0.0 U/g O.D.			18.6 U/g O.D.		
	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	0.038527	0.846859	4.493998	0.964373	0.335884	4.259677
B ²	0.131249	0.721881	4.493998	30.12091	1.21E-05*	4.259677
A×B ³	0.096601	0.75996	4.493998	0.300876	0.588401	4.259677

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ฟอกเยื่อต่อค่าดัชนีความแข็งแรงตึง

² B คือ ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงตึง

³ A×B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาฟอกและปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงตึงของกระดาษ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

นอกจากนี้ เมื่อทำการวิเคราะห์ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาที่ใช้ในการฟอก ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.22 พบว่าทั้งปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าดัชนีความแข็งแรงตึงในกระดาษจากเยื่อที่ไม่ได้ผ่าน

การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในขั้นตอนก่อนการฟอก ทว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะส่งผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงของกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.4.5 ความแข็งแรงต่อแรงฉีก

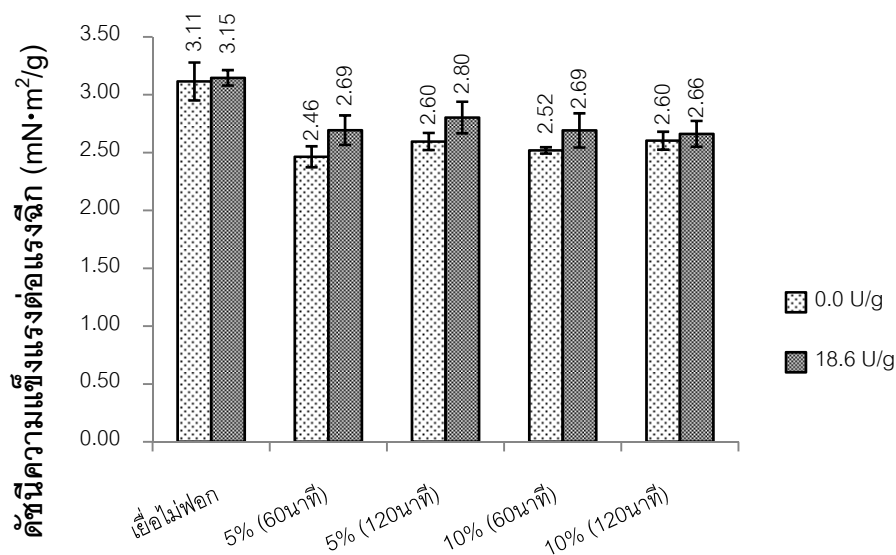
จากตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4-16 ซึ่งแสดงดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ภายหลังจากการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่า กระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกเพิ่มสูงขึ้นเมื่อใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเยื่อแห้งทั้งในเวลาที่ใช้ทำการฟอกนาน 60 นาทีและ 120 นาที แต่หากทำการฟอกเยื่อที่ผ่านการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 10 พบว่า กระดาษที่ได้มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกเพิ่มขึ้นเมื่อทำการฟอกเป็นเวลา 60 นาที แต่ถ้าทำการฟอกนาน 120 นาที กระดาษที่ได้จะมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกในระดับเดียวกันกับเยื่อที่ไม่ได้ผ่านการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ตารางที่ 4.23 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ภายหลังจากการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ปริมาณ H ₂ O ₂ (%)	เวลาฟอก (นาที)	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (mN·m ² /g)	
		0.0 U/g O.D.	18.6 U/g O.D.
5	60	2.46 ± 0.09	2.69 ± 0.13
	120	2.60 ± 0.07	2.80 ± 0.14
10	60	2.52 ± 0.03	2.69 ± 0.15
	120	2.60 ± 0.08	2.66 ± 0.11

ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก อาจมีสาเหตุเนื่องมาจาก ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและความสมบูรณ์ของเส้นใยเดี่ยวๆ เป็นหลัก เมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับเยื่อไม่ฟอก เกิดการย่อยสลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์บางส่วนที่ติดอยู่กับสารเชิงซ้อนระหว่างลิกนินกับคาร์โบไฮเดรต ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของสารเชิงซ้อนดังกล่าวแต่ยังไม่มีการกำจัดลิกนินออกจากเยื่อแต่อย่างใด เส้นใยจึงยังไม่มีอาการแยกตัวออกอย่างสมบูรณ์ ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกในเยื่อไม่ฟอกจึงอยู่ในระดับเดียวกันระหว่างเยื่อที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเมื่อมีการนำเยื่อที่ผ่านการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วไปเข้าสู่กระบวนการฟอกด้วย

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับลิกนิน เส้นใยจึงแยกตัวได้ อย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น สัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่ถูกทำลายด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นี้ลดลง เส้นใยมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น ทำให้กระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นี้มีความ แข็งแรงต่อแรงฉีกมากกว่ากระดาษจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรเจน



ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

รูปที่ 4-16 ผลของการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5 % และ 10 % เป็นเวลา 60 และ 120 นาที ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ เปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ใช้ไฮโดรเจนและการทดลองควบคุม

ตารางที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาฟอก ต่อค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ

	0.0 U/g O.D.			18.6 U/g O.D.		
	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	11.44337	0.003795*	4.493998	0.639911	0.43159	4.259677
B ²	0.940222	0.346652	4.493998	2.075643	0.162587	4.259677
A×B ³	0.549846	0.469126	4.493998	1.94699	0.17569	4.259677

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ฟอกเยื่อต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก

² B คือ ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก

³ A×B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาฟอกและปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

นอกจากนี้ ยังพบว่าผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อจากฟางข้าวสาลี [34] แต่ให้ผลตรงข้ามกับเยื่อจากไม้เบิร์ช [42] และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาที่ใช้ในการฟอก ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.24 พบว่าปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอกไม่ได้ส่งผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้ไซแลเนสอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีเพียงเวลาที่ใช้ในการฟอกเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้นที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนส ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.5 ผลของไซแลเนสต่อความคงทนของกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสไม่ฟอก

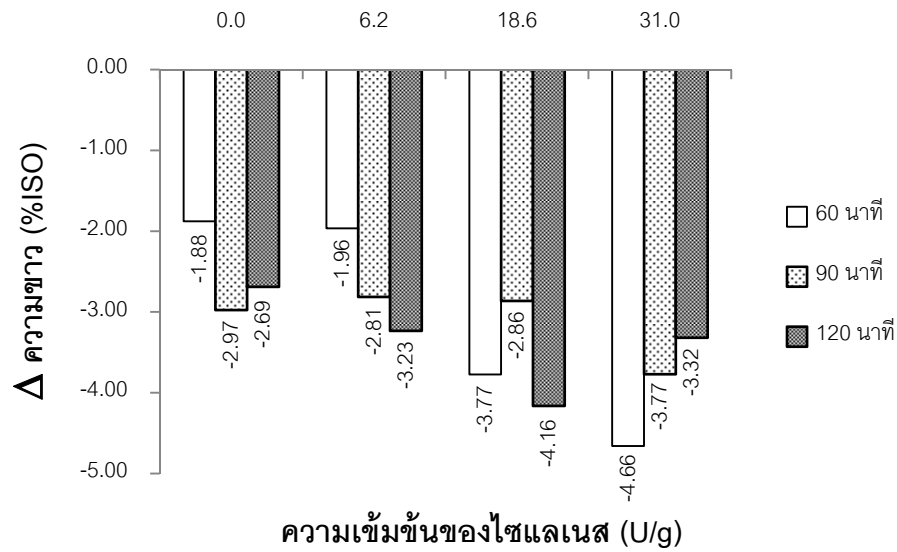
ผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.5 นี้ เป็นส่วนหนึ่งของผลการทดลองในตอนที่ 6 โดยจะทำการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกที่ผ่านการใช้ไซแลเนสที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากผ่านการเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสงเปรียบเทียบกับสมบัติต่างๆ ก่อนทำการเร่งอายุ โดยพิจารณาแยกตามลักษณะของการเร่งอายุ

4.5.1 ความขาวและความขาวสว่าง

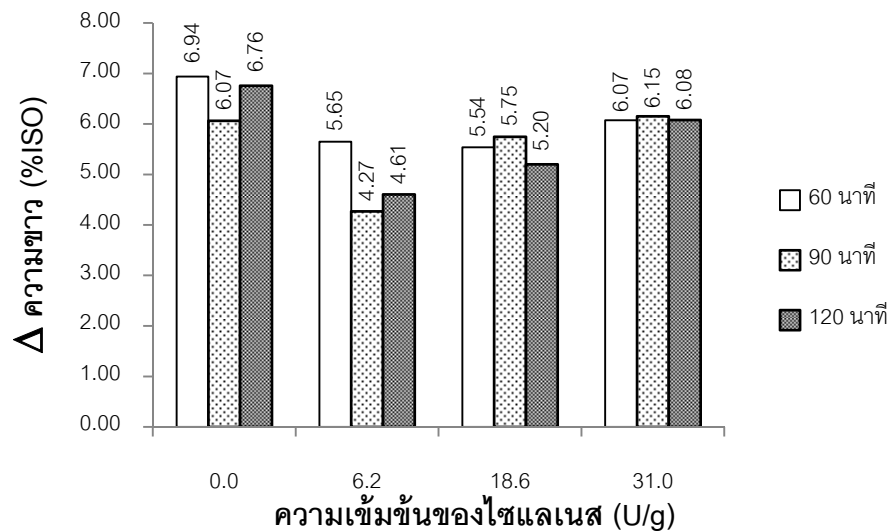
การวัดความขาวเป็นการวัดค่าการสะท้อนแสงของกระดาษที่ทุกช่วงความยาวคลื่น ส่วนการวัดความขาวสว่างเป็นการวัดค่าการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นช่วงสีน้ำเงิน (457 นาโนเมตร) โดยตารางที่ 4.25 แสดงข้อมูลของความขาวและความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกที่ผ่านการใช้ไซแลเนสภายหลังการเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง และจากรูปที่ 4-17 แสดงข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความขาวของกระดาษหลังจากการเร่งอายุด้วยความร้อนเทียบกับก่อนทำการเร่งอายุ (ตารางที่ 4.5) จากผลการทดลองพบว่าความขาวของกระดาษโดยรวมมีค่าลดลงหลังจากทำการเร่งอายุด้วยความร้อน และมีแนวโน้มในการลดลงมากยิ่งขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากเมื่อใช้ไซแลเนสเพิ่มสูงขึ้น เกิดการย่อยสลายไซแลเนสมากขึ้น ทำให้หมู่กรดเฮกเซนยูโรนิกที่มีผลต่อความขาวของกระดาษ ถูกทำปฏิกิริยามากขึ้นแยกตัวเป็นอิสระจากโครงสร้างเส้นใยมากขึ้นแต่ยังไม่ได้ถูกกำจัดออกจากเยื่อ จึงมีโอกาสที่จะมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและถูกออกซิไดซ์ด้วยอากาศมากยิ่งขึ้นหลังทำการเร่งอายุด้วยความร้อน ค่าความขาวหลังทำการเร่งอายุด้วยความร้อนจึงมีอัตราการลดลงที่มากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไซแลเนส เปรียบเทียบกับค่าความขาวของกระดาษก่อนทำการเร่งอายุด้วยความร้อน

ตารางที่ 4.25 ความขาวและความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อไม้ฟอกหลังเร่งอายุ

ไซแลเนต (U/g O.D.)	เวลาที่ใช้ (นาที)	ความขาว (%ISO)	ความขาวสว่าง (%ISO)
ผ่านการเร่งอายุด้วยความร้อนที่ 105°C เป็นเวลา 5 วัน			
0.0 (ชุดการทดลองควบคุม)	60	-19.18 ± 0.25	46.26 ± 0.04
	90	-19.90 ± 0.50	45.99 ± 0.28
	120	-19.96 ± 0.38	46.09 ± 0.13
6.2	60	-18.92 ± 0.32	46.30 ± 0.09
	90	-19.95 ± 0.29	46.32 ± 0.07
	120	-19.46 ± 0.40	46.29 ± 0.09
18.6	60	-17.74 ± 0.17	47.01 ± 0.07
	90	-18.13 ± 0.18	46.73 ± 0.05
	120	-18.69 ± 0.22	46.88 ± 0.06
31.0	60	-18.99 ± 0.35	46.92 ± 0.10
	90	-18.22 ± 0.28	46.78 ± 0.06
	120	-18.10 ± 1.25	46.85 ± 0.27
ผ่านการเร่งอายุด้วยแสงที่ความยาวคลื่น 340 นาโนเมตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง			
0.0 (ชุดการทดลองควบคุม)	60	-10.36	48.21
	90	-10.86	47.96
	120	-10.51	48.27
6.2	60	-11.31	47.92
	90	-12.27	47.55
	120	-11.62	47.86
18.6	60	-8.43	48.94
	90	-9.52	48.54
	120	-9.33	48.67
31.0	60	-8.26	49.14
	90	-8.90	48.77
	120	-8.70	48.73



รูปที่ 4-17 การเปลี่ยนแปลงของค่าความขาวของกระดาศจากเยื่อไม่ฟอกที่ใช้ไซแลเนสที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยความร้อนเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยความร้อน

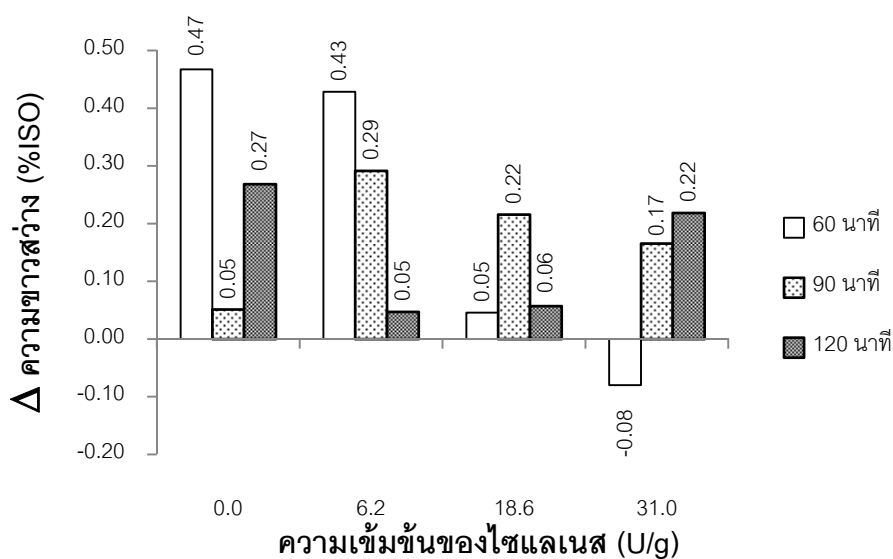


รูปที่ 4-18 การเปลี่ยนแปลงของค่าความขาวของกระดาศจากเยื่อไม่ฟอกที่ใช้ไซแลเนสที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยแสงเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยแสง

แต่เมื่อพิจารณาค่าความขาวหลังจากทำการเร่งอายุกระดาศด้วยแสง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4-18 พบว่ากระดาศมีความขาวเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับค่าความขาวของกระดาศก่อนทำการเร่งอายุด้วยแสง และมีแนวโน้มของอัตราการเพิ่มที่มากขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสเพิ่มสูงขึ้น ทั้งจากที่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน 60 นาที 90 นาที และ 120 นาที แต่อย่างไรก็

ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองควบคุม (ไม่มีการใช้ไซแลเนส) พบว่ากระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนส มีค่าความขาวเพิ่มขึ้นหลังจากเร่งอายุด้วยแสง ที่น้อยกว่า โดยลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าความขาวของกระดาษหลังทำการเร่งอายุด้วยแสงนั้น อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากลักษณะของการฟอกด้วยแสง (Photo bleaching) จึงทำให้ค่าความขาวเพิ่มสูงขึ้น และอัตราการเพิ่มจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อใช้ไซแลเนสที่ความเข้มข้นมากขึ้น อาจเป็นเพราะการฟอกด้วยแสงเป็นการทำลายหมู่ฟลูออโรฟออร์ (Fluorophore) ในเชิงโฟโตเคมี [46] ซึ่งเป็นส่วนประกอบของโมเลกุลที่จะทำให้เกิดการเรืองแสงในหมู่โครโมฟออร์ [47] ของลิกนิน มากขึ้น ดังนั้นเมื่อใช้ไซแลเนสที่ความเข้มข้นสูงขึ้น ไซแลเนสถูกทำลายมากขึ้นจึงมีจำนวนน้อยลงทำให้สัดส่วนของลิกนินเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เกิดการฟอกด้วยแสงมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไซแลเนส แต่อย่างไรก็ตามปริมาณลิกนินโดยรวมยังน้อยกว่าในเยื่อที่ไม่ผ่านการใช้ไซแลเนส การฟอกด้วยแสงในกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสจึงเกิดขึ้นน้อยกว่า

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของไซแลเนส และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาต่อความขาวของกระดาษหลังทำการเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง ด้วยวิธีการทางสถิติตามตารางที่ 4.26 และตารางที่ 4.27 พบว่าทั้งความเข้มข้นของไซแลเนสและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ต่างส่งผลต่อค่าความขาวของกระดาษหลังเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง โดยที่การเร่งอายุด้วยความร้อน เป็นการทดลองที่มีจำนวนซ้ำจึงมีการพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองปัจจัยร่วมด้วย โดยเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าความขาวของกระดาษหลังทำการเร่งอายุด้วยความร้อน

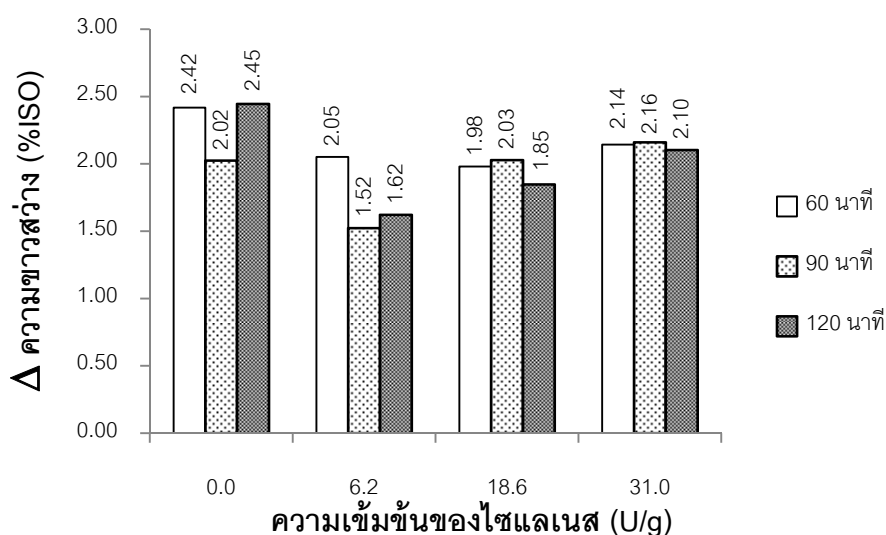


รูปที่ 4-19 การเปลี่ยนแปลงของค่าความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกที่ใช้คลอโรฟิลล์ ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยความร้อนเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยความร้อน

สำหรับค่าความขาวสว่างของกระดาษที่เปลี่ยนไปหลังทำการเร่งอายุด้วยความร้อนเปรียบเทียบกับก่อนทำการเร่งอายุ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4-19 ซึ่งจากรูปพบว่าความขาวสว่างของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้นในเกือบทุกสภาวะการทดลอง เมื่อเทียบกับก่อนการเร่งอายุด้วยความร้อน มีเพียงกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้คลอโรฟิลล์ความเข้มข้น 31.0 U/g เป็นเวลา 60 นาที เท่านั้นที่มีค่าลดลง โดยกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้คลอโรฟิลล์เป็นเวลา 60 นาทีและ 90 นาทีจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของความขาวสว่างในแนวโน้มที่น้อยลง แต่ถ้าใช้เวลาทำปฏิกิริยานาน 120 นาที ค่าความขาวสว่างจะมีอัตราการเพิ่มในแนวโน้มที่มากขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับกระดาษจากเยื่อที่ไม่ได้ใช้คลอโรฟิลล์ พบว่าถ้าใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 60 นาทีและ 120 นาที ความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้คลอโรฟิลล์จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นน้อยกว่า แต่ถ้าใช้เวลาทำปฏิกิริยานาน 90 นาทีพบว่าความขาวสว่างมีอัตราเพิ่มขึ้นมากกว่ากระดาษจากเยื่อที่ไม่ได้ผ่านการใช้คลอโรฟิลล์เมื่อเทียบกับความขาวสว่างของกระดาษก่อนทำการเร่งอายุด้วยความร้อน

โดยทั่วไปแล้วกระดาษจากเยื่อที่ยังไม่ผ่านการฟอก จะยังคงมีปริมาณลิกนินค่อนข้างสูง เมื่อโดนความร้อนเป็นเวลานานควรจะมีค่าความขาวสว่างที่ลดลงเล็กน้อยหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อนำกระดาษดังกล่าวไปทำการเร่งอายุด้วยแสง ลิกนินในเยื่อจะทำปฏิกิริยากับแสงและความร้อน จึงควรจะทำให้ค่าความขาวสว่างมีค่าลดต่ำลง และน่าจะลดลง

มากกว่ากระดาษที่ผ่านการเร่งอายุด้วยความร้อน ซึ่งการทดลองนี้ได้ผลตรงกันข้ามกับทฤษฎีที่ว่าไว้ดังกล่าว ส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าความขาวสว่างของกระดาษหลังจากการเร่งอายุด้วยแสงแสดงไว้ในรูปที่ 4-20 อย่างไรก็ตามความขาวสว่างที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อยมาก คือไม่ถึง 0.5 %ISO ซึ่งคิดเป็นเพียงร้อยละ 0.25 ของความขาวสว่างเริ่มต้นเท่านั้น



รูปที่ 4-20 การเปลี่ยนแปลงของค่าความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยแสงเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยแสง

จากรูปที่ 4-20 พบว่าค่าความขาวสว่างของกระดาษจะเพิ่มสูงขึ้นหลังจากทำการเร่งอายุด้วยแสงเมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้ผ่านการเร่งอายุ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากเกิดการฟอกสีด้วยแสงเช่นเดียวกับค่าความขาวของกระดาษ และอัตราการเพิ่มของความขาวสว่างจะมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นมากขึ้น โดยมีเพียงกระดาษจากเยื่อที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำปฏิกิริยานาน 60 นาทีเท่านั้นที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่เมื่อพิจารณาเทียบกับกระดาษจากเยื่อที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่ากระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความขาวสว่างน้อยกว่าที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความขาวที่วัดได้ จึงแสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีส่วนช่วยในการลดการเกิดการฟอกด้วยแสง

ตารางที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของไซแลเนส และเวลาที่ใช้ ต่อค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อไม้ฟอกหลังเร่งอายุด้วยความร้อน

	ความขาวของกระดาษ			ความขาวสว่างของกระดาษ		
	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	5.905906	0.004217*	3.123907	11.19152	5.86E-05*	3.123907
B ²	48.67133	2.69E-17*	2.731807	174.9283	5.53E-33*	2.731807
A×B ³	7.1267	5.5E-06*	2.227404	2.023913	0.073403	2.227404

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ต่อค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษ

² B คือ ผลของความเข้มข้นของไซแลเนสต่อค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษ

³ A×B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้และความเข้มข้นของไซแลเนส

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของไซแลเนส และเวลาที่ใช้ ต่อค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อไม้ฟอกหลังเร่งอายุด้วยแสง

	ความขาวของกระดาษ			ความขาวสว่างของกระดาษ		
	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	5.905906	0.004217*	3.123907	11.19152	5.86E-05*	3.123907
B ²	48.67133	2.69E-17*	2.731807	174.9283	5.53E-33*	2.731807

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ต่อค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษ

² B คือ ผลของความเข้มข้นของไซแลเนสต่อค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษ

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

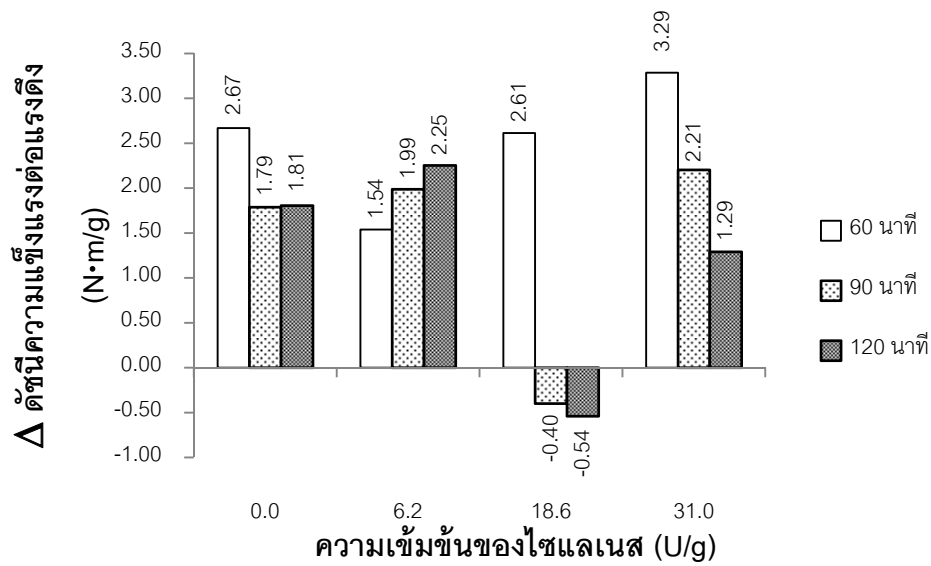
อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติถึงอิทธิพลของความเข้มข้นไซแลเนส และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา พบว่าทั้งความเข้มข้นของไซแลเนสและเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา ต่างมีผลต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษหลังการเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งสองปัจจัย อีกทั้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของไซแลเนสและเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาก็เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างของกระดาษหลังเร่งอายุด้วยความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนการเร่งอายุด้วยแสงเป็นการทดลองที่ไม่มีจำนวนซ้ำ จึงไม่มีการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ของทั้งสองปัจจัยร่วมกัน

4.5.2 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

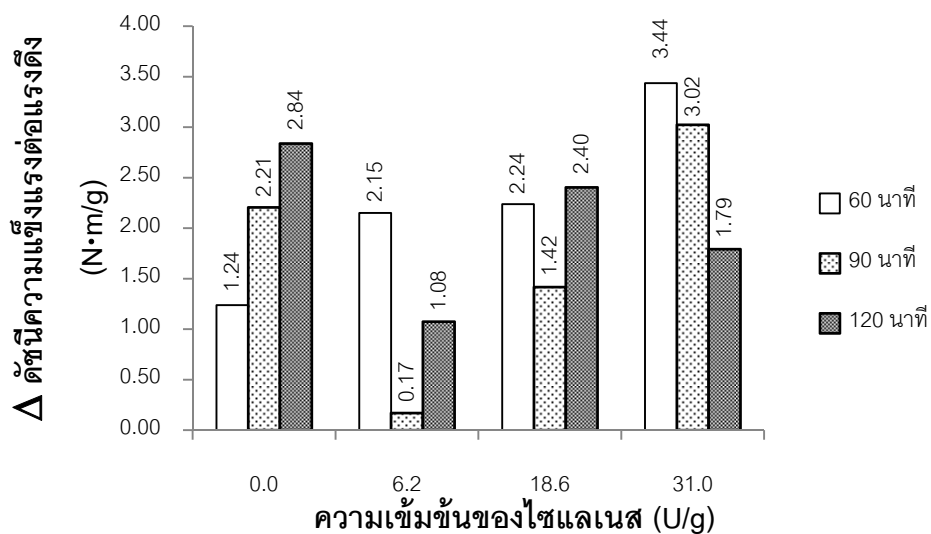
จากตารางที่ 4.28 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสในแต่ละความเข้มข้นเป็นเวลาต่างๆ ภายหลังจากการเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง และจากรูปที่ 4-21 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้ผ่านการเร่งอายุด้วยความร้อน จากผลการทดลองพบว่าหลังทำการเร่งอายุกระดาษด้วยความร้อนแล้ว ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นในเกือบทุกสภาวะการทดลองเมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้เร่งอายุ โดยมีเพียงกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกที่ผ่านการใช้ไซแลเนสที่ความเข้มข้น 18.6 U/g เป็นเวลา 90 และ 120 นาทีเท่านั้นที่มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง ซึ่งค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่เพิ่มขึ้น อาจมีสาเหตุมาจากเมื่อกระดาษอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้น้ำในโครงสร้างของกระดาษระเหยตัวออกไปจึงเสมือนเป็นตัวกลางในการดึงเส้นใยเข้ามาใกล้ชิดกันมากขึ้น จึงทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามผลของไซแลเนสต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษหลังจากเร่งอายุด้วยความร้อนไม่ได้มีแนวโน้มในทิศทางที่แน่นอนดังรูปที่ 4-21

ตารางที่ 4.28 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากเยื่อไม้ฟอกหลังเร่งอายุ

ความเข้มข้นของไซแลนเนส (U/g O.D.)	เวลาที่ใช้ (นาที)	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (N·m/g)
ผ่านการเร่งอายุด้วยความร้อนที่ 105°C เป็นเวลา 5 วัน		
0.0 (ชุดการทดลองควบคุม)	60	34.60 ± 1.36
	90	33.46 ± 1.59
	120	32.31 ± 0.81
6.2	60	32.33 ± 1.27
	90	32.99 ± 1.12
	120	33.36 ± 0.85
18.6	60	32.07 ± 0.67
	90	29.37 ± 0.42
	120	28.99 ± 0.81
31.0	60	31.96 ± 1.05
	90	32.31 ± 0.66
	120	31.25 ± 0.65
ผ่านการเร่งอายุด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 340 นาโนเมตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง		
0.0 (ชุดการทดลองควบคุม)	60	33.16
	90	33.88
	120	33.34
6.2	60	32.94
	90	31.17
	120	32.18
18.6	60	31.69
	90	31.19
	120	31.93
31.0	60	32.11
	90	33.12
	120	31.75



รูปที่ 4-21 การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกที่ใช้ไซแลเนสที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยความร้อนเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยความร้อน



รูปที่ 4-22 การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกที่ใช้ไซแลเนสที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยแสงเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยแสง

เมื่อทำการเร่งอายุกระดาษด้วยแสง พบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้ผ่านการเร่งอายุดังรูปที่ 4-22 เช่นเดียวกับหลังการเร่งอายุ

ด้วยความร้อน แต่ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจะมีแนวโน้มของอัตราการเพิ่มที่มากขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสที่สูงขึ้น โดยมีเพียงกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสเป็นเวลา 120 นาทีเท่านั้นที่มีอัตราการเพิ่มของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่น้อยลงเมื่อใช้ความเข้มข้นมากกว่า 18.6 U/g อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้ว การเร่งอายุกระดาษด้วยแสงไม่ได้มีผลต่อพันธะระหว่างเส้นใย จึงไม่น่าจะส่งผลทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีการเปลี่ยนแปลงไปภายหลังจากเร่งอายุ

ตารางที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของไซแลเนส และเวลาที่ใช้ ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกหลังเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง

	เร่งอายุด้วยความร้อน			เร่งอายุด้วยแสง		
	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	11.72062	3.92E-05*	3.123907	0.066352	0.936478	5.143253
B ²	46.45564	8.13E-17*	2.731807	3.587721	0.085701	4.757063
A×B ³	7.512026	2.85E-06*	2.227404	-	-	-

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ

² B คือ ผลของความเข้มข้นของไซแลเนสต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ

³ A×B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้และความเข้มข้นของไซแลเนส

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลของไซแลเนสต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษหลังจากการเร่งอายุตามตารางที่ 4.29 พบว่าความเข้มข้นของไซแลเนสและเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา อีกทั้งปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัย ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษหลังจากการเร่งอายุด้วยความร้อน แต่ความเข้มข้นของไซแลเนสและเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาไม่ได้ส่งผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษหลังจากการเร่งอายุด้วยแสงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

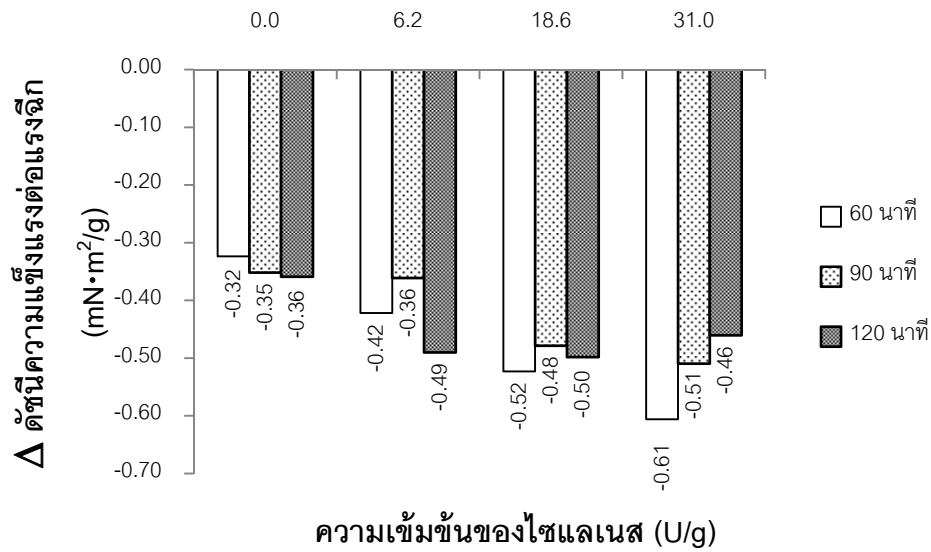
4.5.3 ความแข็งแรงต่อแรงฉีก

ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อไม้ฟอกภายหลังการเร่งอายุ ด้วยแสงหรือด้วยความร้อนแสดงไว้ในตารางที่ 4.30 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษหลังเร่งอายุด้วยความร้อน กับกระดาษที่ไม่ได้ผ่านการเร่งอายุ พบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษมีค่าลดน้อยลงดังแสดงในรูปที่ 4-23 และมีอัตราการลดที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ไซแลเนสในความเข้มข้นที่สูงขึ้นที่เวลาการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 นาทีและ 90 นาที ในขณะที่เมื่อใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสที่สูงขึ้นเป็นเวลานาน 120 นาทีพบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีอัตราการลดลงที่ไม่ต่างกันมากนัก แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณา เปรียบเทียบอัตราการลดลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ ไซแลเนส กับกระดาษจากเยื่อที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนสแล้ว พบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีอัตราการลดลงที่สูงขึ้นในทุกกรณี ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกขึ้นอยู่กับความแข็งแรงและความสมบูรณ์ของเส้นใยเดี่ยวๆ เป็นหลัก ดังนั้นภายหลังการเร่งอายุกระดาษด้วยความร้อนทำให้คาร์โบไฮเดรตในเส้นใยเปราะมากขึ้นจากเหตุผลที่ว่า พันธะ 1-4 ไกลโคซิดิกถูกย่อยสลายด้วยความร้อน [48] ทำให้พอลิเมอร์ในเส้นใยน่าจะสั้นลง เมื่อใช้ไซแลเนสเข้าย่อยสลาย ไซแลนในความเข้มข้นที่สูงขึ้นทำให้โครงสร้างของเส้นใยเปิดออก อาจทำให้เกิดการย่อยสลาย พันธะดังกล่าวว่างยิ่งขึ้น อัตราการลดลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกจึงเพิ่มขึ้นตาม

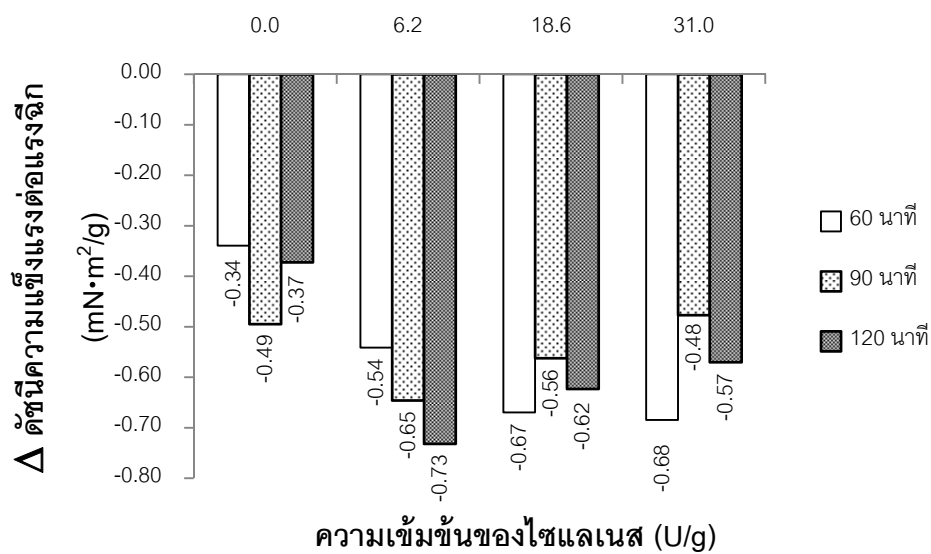
เมื่อทำการเร่งอายุกระดาษด้วยแสง แล้วเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกระหว่างก่อนและหลังเร่งอายุ พบว่าเมื่อใช้ไซแลเนสในความเข้มข้นที่สูงขึ้น ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีอัตราการลดในแนวโน้มที่น้อยลงเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 90 นาทีและ 120 นาที มีเพียงที่เวลาที่ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยานาน 60 นาทีเท่านั้น ที่อัตราการลดลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม กระดาษที่ผ่านการใช้ไซแลเนสแล้วนำไปเร่งอายุด้วยแสง มีอัตราการลดลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมากกว่ากระดาษจากเยื่อที่ไม่ได้ผ่านการใช้ไซแลเนส ดังรูปที่ 4-24 ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจาก เมื่อความยาวคลื่นตั้งแต่ 340 นาโนเมตรขึ้นไปจะทำให้เกิดการย่อยสลาย เซลลูโลส [49] ซึ่งอาจส่งผลทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกลดลงได้

ตารางที่ 4.30 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อไม้ฟอกหลังเร่งอายุ

ความเข้มข้นของไซแลนเนส (U/g O.D.)	เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา (นาที)	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (mN·m ² /g)
ผ่านการเร่งอายุด้วยความร้อนที่ 105°C เป็นเวลา 5 วัน		
0.0 (ชุดการทดลองควบคุม)	60	2.79 ± .011
	90	2.78 ± 0.14
	120	2.70 ± 0.13
6.2	60	2.73 ± 0.09
	90	2.71 ± 0.11
	120	2.71 ± 0.09
18.6	60	2.62 ± 0.05
	90	2.66 ± 0.08
	120	2.66 ± 0.12
31.0	60	2.60 ± 0.11
	90	2.60 ± 0.11
	120	2.63 ± 0.14
ผ่านการเร่งอายุด้วยแสงที่ความยาวคลื่น 340 นาโนเมตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง		
0.0 (ชุดการทดลองควบคุม)	60	2.78
	90	2.64
	120	2.68
6.2	60	2.61
	90	2.42
	120	2.47
18.6	60	2.48
	90	2.58
	120	2.54
31.0	60	2.53
	90	2.63
	120	2.52



รูปที่ 4-23 การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อไม้ฟอกที่ใช้ไซลเลนส์ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยความร้อนเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยความร้อน



รูปที่ 4-24 การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อไม้ฟอกที่ใช้ไซลเลนส์ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยแสงเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยแสง

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติเพื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของไซลเลนส์และเวลาที่ใช้ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกหลังการเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง

แสดงตามตารางที่ 4.31 พบว่ามีเพียงความเข้มข้นของไซแลเนสเท่านั้นที่ส่งผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก ส่วนเวลาที่ใช้และปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความเข้มข้นของไซแลเนสไม่ได้ส่งผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษหลังเร่งอายุด้วยความร้อน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ยังพบว่า ทั้งความเข้มข้นของไซแลเนส เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา และปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความเข้มข้นของไซแลเนสไม่ได้ส่งผลต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษหลังเร่งอายุด้วยแสงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แต่อย่างใด

ตารางที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของไซแลเนส และเวลาที่ใช้ ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกหลังเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง

	เร่งอายุด้วยความร้อน			เร่งอายุด้วยแสง		
	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	0.108934	0.896937	3.123907	0.320092	0.737757	5.143253
B ²	7.758268	0.000147*	2.731807	3.776987	0.078023	4.757063
A×B ³	0.695735	0.653811	2.227404	-	-	-

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ

² B คือ ผลของความเข้มข้นของไซแลเนสต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ

³ A×B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้และความเข้มข้นของไซแลเนส

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.6 ผลของไซแลเนสต่อความคงทนของกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสที่ผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อ 4.5 นี้ เป็นส่วนหนึ่งของผลการทดลองในตอนที่ 6 โดยจะทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติต่างๆ ของกระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก ภายหลังจากเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสงเปรียบเทียบกับสมบัติต่างๆ ก่อนทำการเร่งอายุ โดยพิจารณาแยกตามลักษณะของการเร่งอายุ

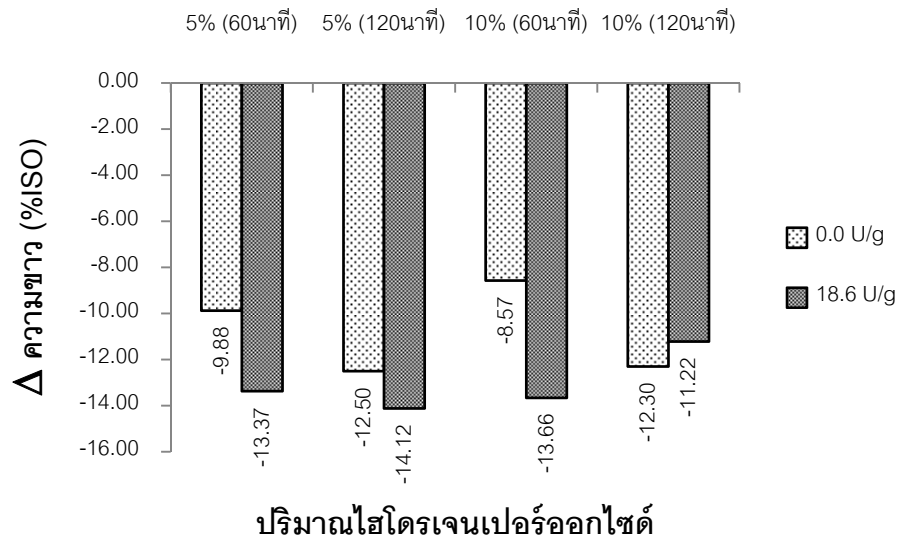
4.6.1 ความขาวและความขาวสว่าง

ผลของความขาวและความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อฟอกภายหลังจากเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสงแสดงไว้ในตารางที่ 4.32 ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึง เมื่อ

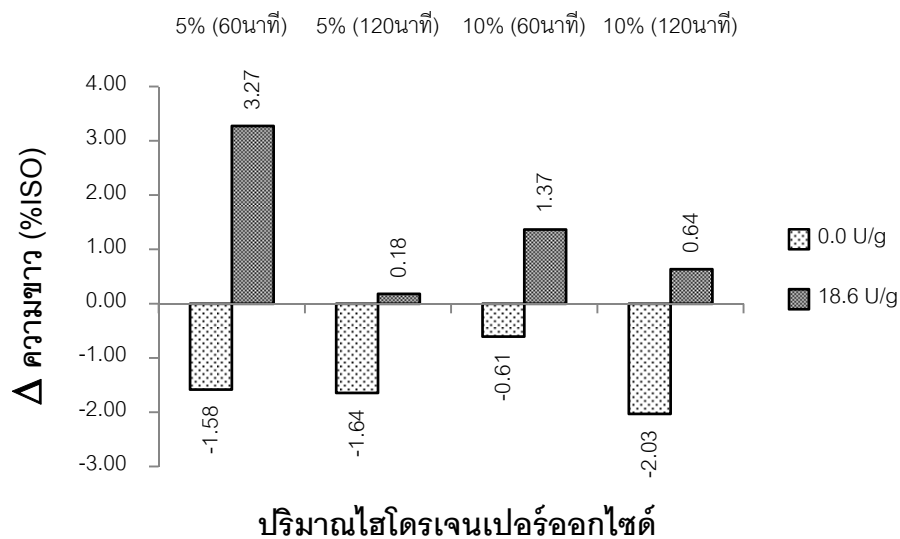
ทำการเร่งอายุกระดาษจากเยื่อฟอกด้วยความร้อนจะพบว่า ค่าความขาวของกระดาษจะค่าลดลงเมื่อเทียบกับกระดาษจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้เร่งอายุ ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ฟอกเท่ากัน พบว่าถ้าใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง กระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไฮลเนสจะมีอัตราการลดลงของความขาวที่มากกว่ากระดาษจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ใช้ไฮลเนส และมีอัตราการลดที่มากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการฟอกนานขึ้น แต่ถ้าใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง กระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไฮลเนสกลับมีอัตราการลดลงของความขาวที่น้อยลงเมื่อใช้เวลาในการฟอกนานขึ้น แต่อัตราการลดลงของความขาวของกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไฮลเนสแล้วทำการฟอกเป็นเวลา 120 นาที จะมีอัตราการลดลงน้อยกว่ากระดาษจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ผ่านการใช้ไฮลเนสหลังจากการเร่งอายุด้วยความร้อน ดังรูปที่ 4-25 ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับค่าความขาวสว่างของกระดาษที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำไปเร่งอายุด้วยความร้อน ในทุกสภาวะการทดลอง ดังรูปที่ 4-27

ตารางที่ 4.32 ความขาวและความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไฮลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก ภายหลังจากฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วนำไปเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง

ปริมาณ H ₂ O ₂	เวลาฟอก (นาที)	ความขาว (%ISO)		ความขาวสว่าง (%ISO)	
		0.0 U/g O.D.	18.6 U/g O.D.	0.0 U/g O.D.	18.6 U/g O.D.
เร่งอายุกระดาษด้วยความร้อนที่ 105°C เป็นเวลา 5 วัน					
5%	60	2.37 ± 0.18	11.15 ± 0.07	57.16 ± 0.03	61.50 ± 0.15
	120	19.06 ± 0.91	15.11 ± 0.70	64.80 ± 0.30	63.30 ± 0.35
10%	60	0.25 ± 0.14	16.38 ± 0.81	56.12 ± 0.05	63.81 ± 0.21
	120	18.94 ± 0.37	17.83 ± 0.67	64.79 ± 0.08	64.26 ± 0.16
เร่งอายุกระดาษด้วยแสงที่ความยาวคลื่น 340 นาโนเมตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง					
5%	60	10.67	27.97	58.96	65.67
	120	29.92	29.41	66.28	66.67
10%	60	8.21	31.41	57.83	67.55
	120	29.21	29.68	62.62	66.60



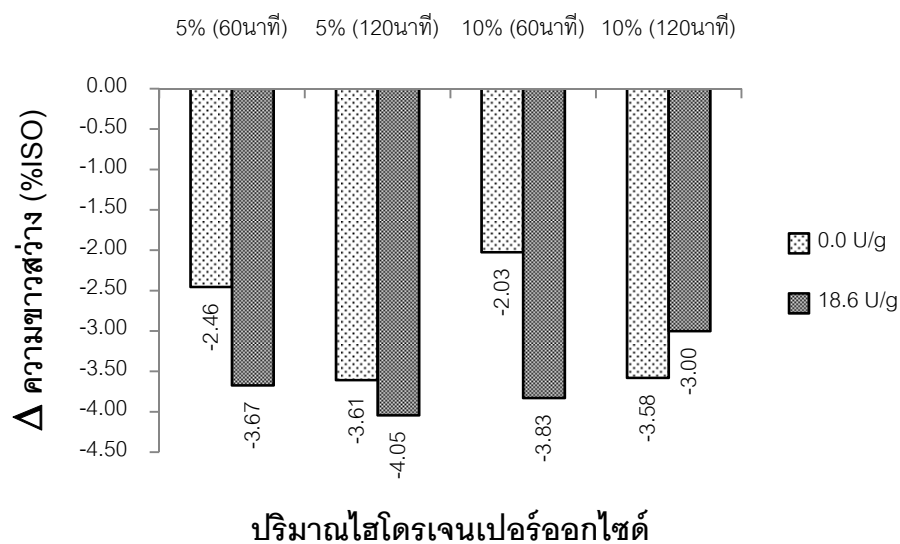
รูปที่ 4-25 การเปลี่ยนแปลงของค่าความขาวของกระดาษจากเยื่อฟอก ที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยความร้อนเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยความร้อน



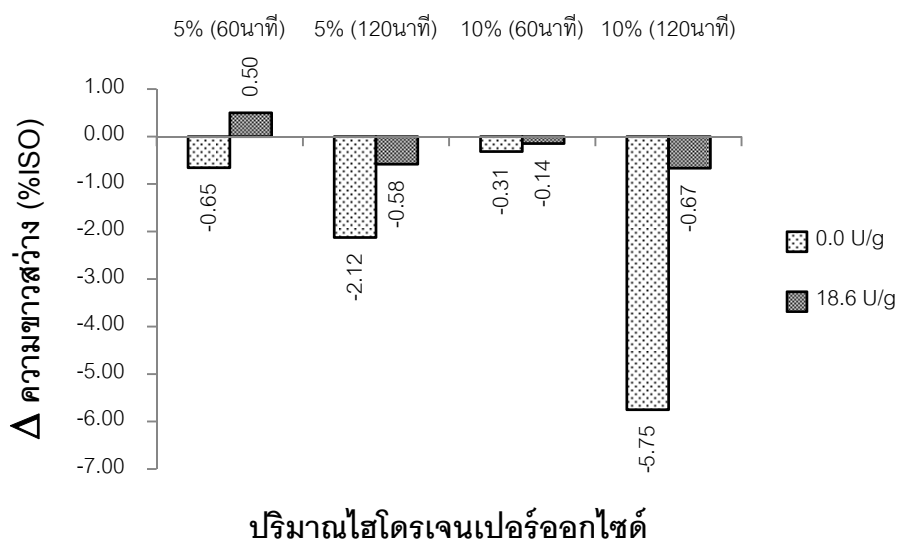
รูปที่ 4-26 การเปลี่ยนแปลงของค่าความขาวของกระดาษจากเยื่อฟอก ที่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยแสงเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยแสง

แต่เมื่อนำกระดาษไปเร่งอายุด้วยแสงกลับพบว่า กระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้ไฮโดรเจนในขั้นตอนก่อนการฟอก มีค่าความขาวเพิ่มสูงขึ้นในทุกสภาวะการฟอก โดยที่กระดาษจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ผ่านการใช้ไฮโดรเจนในขั้นตอนก่อนการฟอก จะมีความขาวที่ลดลงในทุกสภาวะการฟอก เมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้เร่งอายุ ดังรูปที่ 4-26 ส่วนค่าความขาวสว่างของ

กระดาษหลังเร่งอายุด้วยแสงพบว่า กระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอกจะมีค่าความขาวสว่างที่ลดลงในอัตราที่น้อยกว่ากระดาษจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนส ดังรูปที่ 4-28 ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากเพนโทซานในไซแลนที่มีแนวโน้มจะเกิดเป็นหมู่เฮกเซนยูโรนิกถูกย่อยสลายบางส่วนโดยไซแลเนสแต่ยังไม่ได้ถูกกำจัดออกจากเยื่อ แต่เมื่อนำเยื่อดังกล่าวไปฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หมู่เฮกเซนยูโรนิกดังกล่าวจึงถูกทำปฏิกิริยาด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และถูกกำจัดออกไปจากเยื่อในกระบวนการล้าง จึงทำให้กระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอกมีอัตราการลดลงของค่าความขาวสว่างน้อยกว่ากระดาษจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับทฤษฎีของ Jiang และคณะ [4] อีกทั้งยังพบว่าที่สภาวะการฟอกที่ใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเป็นเวลา 60 นาที ยังมีค่าความขาวสว่างหลังเร่งอายุด้วยแสงเพิ่มขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 4-27 การเปลี่ยนแปลงของค่าความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อฟอก ที่ใช้ไซแลเนสที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยความร้อนเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยความร้อน



รูปที่ 4-28 การเปลี่ยนแปลงของค่าความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อฟอก ที่ใช้โซลเนสที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยแสงเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยแสง

ตารางที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ฟอก ต่อค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อฟอกหลังเร่งอายุด้วยความร้อน

0.0 U/g	ความขาวของกระดาษ			ความขาวสว่างของกระดาษ		
	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	112.7762	1.5E-10*	4.259677	13593.34	7.17E-25*	4.493998
B ²	243.9654	4.48E-14*	4.259677	56.36503	1.25E-06*	4.493998
A×B ³	24.41206	4.83E-05*	4.259677	54.23824	1.59E-06*	4.493998
18.6 U/g	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	12.70681	0.00157*	4.259677	157.7547	4.83E-12*	4.259677
B ²	6912.484	4.75E-31*	4.259677	362.2019	5.51E-16*	4.259677
A×B ³	13.80401	0.001078*	4.259677	63.6711	3.3E-08*	4.259677

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ฟอกต่อค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษ

² B คือ ผลของปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษ

³ A×B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้และปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

และเมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติตามตารางที่ 4.33 พบว่า ทุกปัจจัยทั้ง ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการฟอก รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ฟอกล้วนส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าความขาวและความสว่างหลังทำการเร่งอายุกระดาษด้วยความร้อนของทั้งกระดาษจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ใช้ไฮลแลเนสและกระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้ไฮลแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

แต่จากตารางที่ 4.34 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อพิจารณาผลของ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ฟอกต่อความขาวและความขาวสว่างของกระดาษ หลังเร่งอายุด้วยแสง พบว่ามีเพียงเวลาที่ใช้ในการฟอกเท่านั้นที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อ ค่าความขาวของกระดาษจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ใช้ไฮลแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก ส่วนเวลาที่ใช้ในการฟอกและปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองปัจจัยดังกล่าว ไม่ได้ส่งผลอย่างต่อความขาวของกระดาษจากเยื่อฟอกที่ใช้ไฮลแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก ความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ใช้ไฮลแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก และความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อฟอกที่ใช้ไฮลแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก หลังทำการเร่งอายุด้วยแสง อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.34 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาที่ใช้ฟอก ต่อค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อฟอกหลังเร่งอายุด้วยแสง

0.0 U/g	ความขาวของกระดาษ			ความขาวสว่างของกระดาษ		
	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	529	0.027662*	161.4476	22.91117	0.131116	161.4476
B ²	3.281273	0.321121	161.4476	3.584512	0.309359	161.4476
18.6 U/g	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	0.001078	0.979104	161.4476	0.00471	0.956379	161.4476
B ²	1.348372	0.452605	161.4476	0.71088	0.55405	161.4476

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ฟอกต่อค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษ

² B คือ ผลของปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าความขาวและความขาวสว่างของกระดาษ

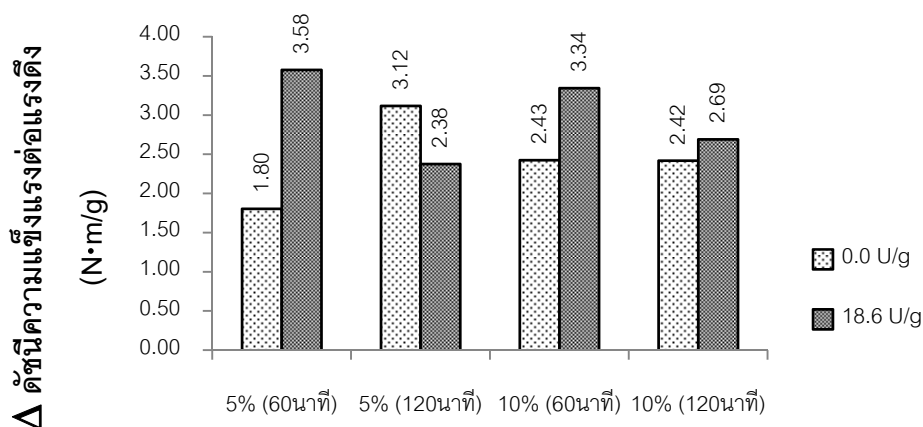
* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.6.2 ความแข็งแรงต่อแรงดึง

เมื่อนำกระดูกจากเยื่อฟอกที่มีการใช้และไม่ใช้ไซแลเนสไปเร่งอายุด้วยความร้อน แล้วนำมาวัดค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.35 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเทียบกับก่อนเร่งอายุ กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น และกระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้ไซแลเนสมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่ากระดาษจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก ในเกือบทุกสภาวะการทดลอง มีเพียงกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสแล้วนำไปฟอกที่ปริมาตรไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเป็นเวลา 120 นาที เท่านั้น ที่มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นน้อยกว่ากระดาษจากเยื่อที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก ดังรูปที่ 4-29 ทั้งนี้ อาจมีสาเหตุเนื่องมาจาก ความร้อนทำให้น้ำในโครงสร้างของกระดาษระเหยตัวออกไป เส้นใยมีแนวโน้มที่เข้าใกล้ชิดกันมากยิ่งขึ้น และเมื่อผ่านไปเป็นเวลานานความร้อนจะทำให้คาร์โบไฮเดรตมีการแข็งตัวมากขึ้น ความแกร่งหรือความคงรูป (Stiffness) ของเส้นใยจึงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษภายหลังการเร่งอายุด้วยความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้ผ่านการเร่งอายุ และเมื่อมีการฟอกเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนส ทำให้สัดส่วนของเฮมิเซลลูโลสลดลงมากกว่าเยื่อที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนส ดังนั้นกระดาษจากเยื่อฟอกที่มีการใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอกจึงเกิดปฏิกิริยาการต้านการรับน้ำ (Hornification) น้อยกว่า โดยเป็นไปตามทฤษฎีของ Kocurek และคณะ [37] จึงทำให้กระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสมีอัตราการรับความชื้นจากบรรยากาศหลังผ่านการอบแห้งในขั้นตอนของการขึ้นแผ่นกระดาษและหลังจากการเร่งอายุด้วยความร้อนได้มากขึ้น ซึ่งความชื้นมีส่วนทำให้ระยะยืดของกระดาษเพิ่ม สามารถรับแรงดึงได้มากขึ้น ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจึงมากกว่ากระดาษจากเยื่อที่ไม่ได้ผ่านการใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอกภายหลังการเร่งอายุกระดาษด้วยความร้อน

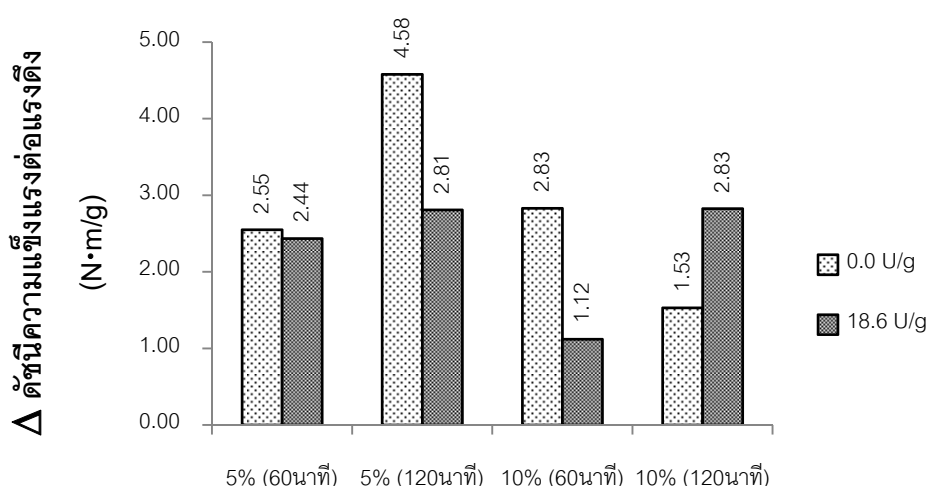
ตารางที่ 4.35 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไฮลเนสในขั้นต้นก่อนการฟอก ภายหลังจากการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วนำไปเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง

ปริมาณ H ₂ O ₂	เวลาฟอก (นาที)	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (N·m/g)	
		0.0 U/g O.D.	18.6 U/g O.D.
เร่งอายุกระดาษด้วยความร้อนที่ 105°C เป็นเวลา 5 วัน			
5%	60	30.67 ± 1.64	35.88 ± 0.69
	120	32.24 ± 1.11	34.51 ± 0.76
10%	60	31.26 ± 0.37	33.76 ± 0.83
	120	31.20 ± 0.81	32.53 ± 1.32
เร่งอายุกระดาษด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 340 นาโนเมตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง			
5%	60	31.41	34.74
	120	33.70	34.95
10%	60	31.67	31.51
	120	30.31	32.66



ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

รูปที่ 4-29 การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากเยื่อฟอก ที่ใช้ไฮลเนสที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยความร้อนเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยความร้อน



ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

รูปที่ 4-30 การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดูกจากเยื่อฟอก ที่ใช้ไฮแลเนสที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยแสงเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยแสง

เป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อนำกระดูกจากเยื่อฟอกไปทำการเร่งอายุด้วยแสง กระดูกมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนทำการเร่งอายุ และกระดูกจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้ไฮแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอกมีอัตราการเพิ่มของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่น้อยกว่ากระดูกจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ผ่านการใช้ไฮแลเนส โดยมีเพียงกระดูกจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไฮแลเนสแล้วทำการฟอกที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเป็นเวลา 120 นาทีเท่านั้นที่มีอัตราการเพิ่มของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่ากระดูกจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ใช้ไฮแลเนส ดังรูปที่ 4-30 ทั้งนี้โดยทั่วๆไปแล้ว แสงไม่น่าจะมีผลต่อความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดูก ดังนั้นค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดูกหลังทำการเร่งอายุด้วยแสงจึงไม่น่าจะเปลี่ยนแปลงหรือมีค่าคงที่

และเมื่อทำการพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติตามตารางที่ 4.36 พบว่า ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาของการฟอก รวมถึงปฏิสัมพันธ์ของทั้งสองปัจจัยร่วมกัน ไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการเร่งอายุด้วยความร้อนในกระดูกจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ผ่านการใช้ไฮแลเนส และไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดูกหลังเร่งอายุด้วยแสงในทุกกรณี โดยปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงหลัง

เร่งอายุด้วยความร้อนในเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในขั้นตอนก่อนการฟอกเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้น

ตารางที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ฟอก ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจากเยื่อฟอกหลังเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง

0.0 U/g	เร่งอายุด้วยความร้อน			เร่งอายุด้วยแสง		
	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	2.409228	0.140176	4.493998	0.06531	0.840716	161.4476
B ²	0.215427	0.648799	4.493998	0.741066	0.547516	161.4476
A×B ³	2.843777	0.111126	4.493998	-	-	-
18.6 U/g	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	13.61659	0.001148	4.259677	2.121432	0.383026	161.4476
B ²	33.8283	5.36E-06*	4.259677	35.92574	0.105244	161.4476
A×B ³	0.033084	0.857196	4.259677	-	-	-

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ฟอกต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ

² B คือ ผลของปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ

³ A×B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้และปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.6.3 ความแข็งแรงต่อแรงฉีก

หลังจากนำเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปทำการเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง ได้ผลของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.37 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้ผ่านการเร่งอายุ ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกในกระดาษมีค่าลดลงเกือบทุกสภาวะการฟอกทั้งจากเยื่อที่ใช้และไม่ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีเพียงเยื่อจากสภาวะการฟอกที่ใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเป็นเวลา 60 นาทีเท่านั้นที่มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกเพิ่มสูงขึ้นหลังทำการเร่งอายุด้วยความร้อน และยังพบว่าเยื่อฟอกที่มีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษลดลงมากกว่าเยื่อที่ไม่ได้ผ่านการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทั้งนี้ลักษณะดังกล่าวอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำให้เกิดการเปิดโครงสร้างของเส้นใยโดยการย่อยสลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อทำการฟอกเยื่อ คาร์โบไฮเดรต

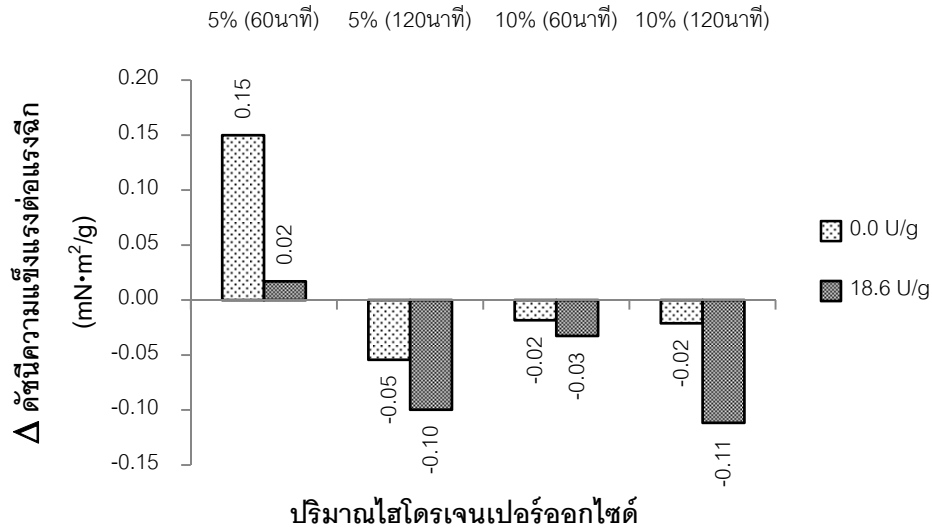
มีโอกาสถูกไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำลายได้มากขึ้น และในการเร่งอายุกระดาษ พันธะ 1,4-ไกลโคซิดิกจะถูกย่อยสลายด้วยความร้อน [48] ทำให้พอลิเมอร์ในเส้นใยน่าจะสั้นลง ความแข็งแรงของเส้นใยเดี่ยวจึงน้อยลง ส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกลดลงเช่นกัน ดังนั้นค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสจึงมีค่าน้อยกว่าที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนสในทุกกรณี ดังรูปที่ 4-31 แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าทำปฏิกิริยานาน 60 นาทีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษกลับมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.37 ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้และไม่ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก ภายหลังการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แล้วนำไปเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง

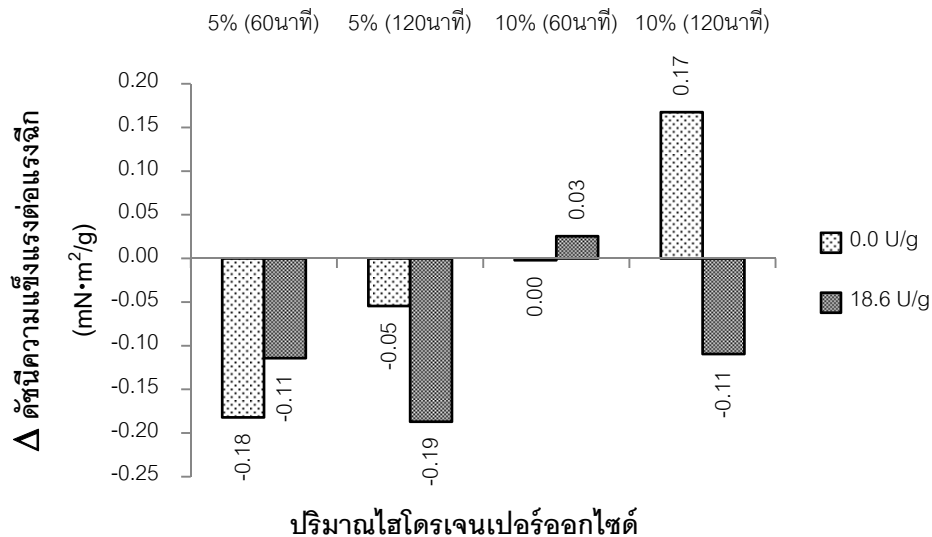
ปริมาณ H ₂ O ₂	เวลาฟอก (นาที)	ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (mN·m ² /g)	
		0.0 U/g O.D.	18.6 U/g O.D.
เร่งอายุกระดาษด้วยความร้อนที่ 105°C เป็นเวลา 5 วัน			
5%	60	2.61 ± 0.09	2.71 ± 0.13
	120	2.54 ± 0.06	2.70 ± 0.11
10%	60	2.50 ± 0.04	2.66 ± 0.06
	120	2.58 ± 0.10	2.55 ± 0.10
เร่งอายุกระดาษด้วยแสงที่ความยาวคลื่น 340 นาโนเมตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง			
5%	60	2.28	2.58
	120	2.54	2.62
10%	60	2.52	2.72
	120	2.77	2.55

อย่างไรก็ตามเมื่อนำกระดาษจากเยื่อฟอกไปทำการเร่งอายุด้วยแสง พบว่ากระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกลดลงเมื่อเทียบกับก่อนเร่งอายุ โดยกระดาษจากเยื่อที่ใช้ไซแลเนสแล้วนำไปฟอกที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเยื่อแห้งจะมีแนวโน้มลดลงในอัตราที่มากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการฟอกเพิ่มมากขึ้น โดยถ้าใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีแนวโน้มในทิศทางที่ไม่แน่นอน โดยหากทำการฟอกเป็นเวลา 60 นาที ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อ

แรงฉีกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าใช้เวลาฟอกนาน 120 นาที กระดาษกลับมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกลดลง ดังรูปที่ 4-32



รูปที่ 4-31 การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อฟอก ที่ใช้ไฮลเลนส์ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยความร้อนเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยความร้อน



รูปที่ 4-32 การเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อฟอก ที่ใช้ไฮลเลนส์ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างๆ หลังจากเร่งอายุด้วยแสงเปรียบเทียบกับก่อนเร่งอายุด้วยแสง

เมื่อทำการพิจารณาผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาฟอกต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษโดยใช้วิธีการทางสถิติตามตารางที่ 4.38 พบว่า มีเพียงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาฟอกเท่านั้นที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกหลังเร่งอายุด้วยความร้อน ในกระดาษจากเยื่อที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนส แต่ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้จะส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกหลังเร่งอายุด้วยความร้อนในกระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาฟอกต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกหลังเร่งอายุด้วยแสงพบว่าทั้งสองปัจจัยส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกในเยื่อฟอกที่ไม่ได้ผ่านการใช้ไซแลเนส แต่ถ้ามีการใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก พบว่าทั้งสองปัจจัยไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษหลังเร่งอายุด้วยแสงแต่อย่างใด

ตารางที่ 4.38 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาที่ใช้ฟอก ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อฟอกหลังเร่งอายุด้วยความร้อนหรือด้วยแสง

0.0 U/g	เร่งอายุด้วยความร้อน			เร่งอายุด้วยแสง		
	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	0.019051	0.891941	4.493998	8776.59	0.006795*	161.4476
B ²	1.136215	0.302275	4.493998	7167.977	0.007519*	161.4476
A×B ³	5.055302	0.038995*	4.493998	-	-	-
18.6 U/g	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>	<i>F</i>	<i>P-Value</i>	<i>F crit</i>
A ¹	2.282203	0.143921	4.259677	0.407494	0.638309	161.4476
B ²	7.097255	0.013578*	4.259677	0.134849	0.775954	161.4476
A×B ³	1.721856	0.201867	4.259677	-	-	-

¹ A คือ ผลของเวลาที่ใช้ฟอกต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ

² B คือ ผลของปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ

³ A×B คือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้และปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

* สำหรับตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติของกระดาษ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลของไซแลเนสต่อปริมาณเพนโทซานในเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสไม่ฟอก

เมื่อมีการใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสมากขึ้นเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสไม่ฟอก พบว่าปริมาณเพนโทซานในเยื่อมีแนวโน้มลดลง โดยเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยาที่ความเข้มข้น 31.0 U/g O.D. เป็นเวลานาน 120 นาทีจะมีปริมาณเพนโทซานต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยาเท่ากัน พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสเพิ่มสูงขึ้น ปริมาณเพนโทซานในเยื่อมีแนวโน้มลดลงจนเริ่มมีปริมาณคงที่ตั้งแต่ที่ระดับความเข้มข้นของไซแลเนสเท่ากับ 18.6 U/g O.D. โดยเยื่อที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับไซแลเนสเป็นเวลานาน 120 นาที มีการลดลงของปริมาณเพนโทซานอย่างต่อเนื่อง และลดลงมากที่สุดเมื่อใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสเท่ากับ 31.0 U/g O.D. แต่อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ทางสถิติบ่งชี้ว่ามีเพียงความเข้มข้นของไซแลเนสเท่านั้นที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณเพนโทซาน แต่เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาและปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสองปัจจัยไม่ได้ส่งผลกระทบต่อทางสถิติต่อปริมาณเพนโทซานในเยื่อ

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพนโทซานต่อค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก และค่าความขาวสว่าง พบว่าเมื่อมีปริมาณเพนโทซานในเยื่อต่ำ ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจะมีค่าน้อย แต่ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกและความขาวสว่างโดยรวมจะมีค่ามาก

5.1.2 ผลของไซแลเนสต่อสมบัติของกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสไม่ฟอก

เมื่อใช้ไซแลเนสในความเข้มข้นที่สูงขึ้นเข้าทำปฏิกิริยาในเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสไม่ฟอก พบว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง แต่เมื่อเทียบกับกระดาษจากเยื่อที่ไม่ได้ผ่านการใช้ไซแลเนสแล้ว กระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสที่ความเข้มข้น 6.2 U/g และความเข้มข้น 18.6 U/g มีค่าความหนาแน่นสูงกว่ากระดาษจากเยื่อที่ไม่ได้ผ่านการใช้ไซแลเนส ซึ่งเวลาที่ใช้ไซแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของกระดาษ

สำหรับค่าความขาวและความขาวสว่าง เมื่อใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสที่สูงขึ้น พบว่ากระดาษมีความขาวและความขาวสว่างเพิ่มมากขึ้นแต่จะเริ่มคงที่ตั้งแต่ที่ความเข้มข้นของ

ไซแลเนสที่ 18.6 U/g และพบว่ามีความเข้มข้นของไซแลเนสเท่านั้นที่ส่งผลต่อค่าความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่ทั้งความเข้มข้นของไซแลเนสและเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยากับเยื่อจะส่งผลต่อค่าความขาวทั้งสองปัจจัย โดยถ้าใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นค่าความขาวโดยรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสเท่ากับ 6.2 U/g แต่ค่าความขาวจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อใช้เวลาทำปฏิกิริยานาน 60 นาทีที่ความเข้มข้นไซแลเนสเท่ากับ 18.6 U/g แต่สำหรับค่าความทึบแสง เมื่อใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสเพิ่มมากขึ้น ค่าความทึบแสงมีแนวโน้มที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไซแลเนส พบว่ากระดาษที่ได้มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง แต่จะมีแนวโน้มที่จะมีค่าคงที่ตั้งแต่ความเข้มข้นของไซแลเนสเท่ากับ 18.6 U/g ส่วนค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก มีแนวโน้มที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสเพิ่มสูงขึ้นและเวลามากขึ้น

5.1.3 ผลของไซแลเนสต่อสมบัติกระดาษจากเยื่อกราฟต์ยูคาลิปตัสที่ผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ความหนาแน่นของกระดาษที่ได้จากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้ไซแลเนส มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการฟอกเยื่อที่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเป็นเวลา 60 นาที หรือเมื่อใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเป็นเวลา 120 นาที แต่ถ้าใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเป็นเวลา 120 นาที หรือปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเป็นเวลา 60 นาที ความหนาแน่นของกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสจะมีความหนาแน่นน้อยกว่ากระดาษจากเยื่อที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก

เมื่อใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก พบว่าความขาวของกระดาษที่ได้มีค่ามากกว่ากระดาษจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนส ถ้าทำการฟอกเยื่อเป็นเวลา 60 นาที ทั้งจากการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 5 และร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง แต่เมื่อใช้เวลาในการฟอกเยื่อนาน 120 นาที ค่าความขาวของกระดาษที่ได้จะลดลงเล็กน้อย ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความขาวสว่าง ทั้งนี้ความทึบแสงของกระดาษที่ได้มีแนวโน้มในทิศทางไม่ชัดเจนระหว่างกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสแล้วนำไปฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่วนค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก

5.1.4 ผลของไซแลเนสต่อความคงทนของกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัส

กระดาษจากเยื่อไม่ฟอกที่ผ่านการเร่งอายุด้วยความร้อน พบว่ากระดาษมีค่าความขาวลดลงเมื่อเทียบกับก่อนเร่งอายุโดยมีแนวโน้มลดลงมากยิ่งขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อนำไปเร่งอายุด้วยแสง กระดาษมีค่าความขาวที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนเร่งอายุ โดยกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสจะมีแนวโน้มที่ค่าความขาวจะเพิ่มในอัตราที่มากขึ้นเมื่อใช้ไซแลเนสความเข้มข้นที่สูงขึ้น และพบว่ากระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสจะมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนส ในเยื่อฟอกที่ผ่านการเร่งอายุด้วยความร้อน พบว่าค่าความขาวของกระดาษมีค่าลดลง โดยกระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอกมีอัตราการลดลงของค่าความขาวมากกว่าที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนส ซึ่งถ้าใช้เวลาในการฟอกมากขึ้นจะลดความแตกต่างระหว่างกระดาษจากเยื่อฟอกที่ใช้และไม่ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก เมื่อทำการเร่งอายุกระดาษจากเยื่อฟอกด้วยแสงพบว่ากระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอกจะให้ค่าความขาวที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนเร่งอายุ แต่กระดาษจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนสจะมีค่าความขาวที่ลดลงเมื่อเทียบกับก่อนเร่งอายุ กล่าวโดยสรุปคือการใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอกทำให้ความเสถียรของค่าความขาวของกระดาษต่อความร้อนน้อยลง แต่ความขาวจะมีความเสถียรต่อแสงเพิ่มมากขึ้น

ค่าความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อไม่ฟอกมีค่าเพิ่มขึ้นหลังมีค่าเพิ่มขึ้นหลังทำการเร่งอายุด้วยความร้อน โดยค่าความขาวสว่างจะลดลงเมื่อมีการใช้ไซแลเนสในความเข้มข้นที่มากขึ้น เมื่อใช้เวลาทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 นาทีและ 90 นาที แต่ถ้าใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 120 นาทีอัตราการเพิ่มจะลดลงแต่เมื่อทำการเร่งอายุกระดาษด้วยแสง ความขาวสว่างมีความเพิ่มขึ้นจากที่ไม่ได้เร่งอายุ และมีแนวโน้มที่มีอัตราการเพิ่มที่มากขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของไซแลเนสที่สูงขึ้น แต่เมื่อเทียบกับกระดาษจากเยื่อที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนส ความขาวสว่างของเยื่อจากกระดาษที่ผ่านการใช้ไซแลเนสจะมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนส เมื่อนำกระดาษจากเยื่อฟอกไปเร่งอายุด้วยความร้อนพบว่ากระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไซแลเนสให้ค่าความขาวสว่างที่ลดลงจากที่ไม่ได้เร่งอายุมากกว่ากระดาษจากเยื่อฟอกที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก เว้นแต่ถ้าใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเป็นเวลา 120 นาที แต่ถ้านำไปเร่งอายุด้วยแสงพบว่าค่าความขาวสว่างของกระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก ลดลงน้อยกว่าที่ไม่ได้ใช้ไซแลเนสในขั้นตอนก่อนการฟอก กล่าว

โดยสรุปคือ การใช้ไฮโดรเจนในขั้นต้นก่อนการฟอกจะช่วยทำให้ความขาวสว่างของกระดาษมีความเสถียรต่อแสงมากยิ่งขึ้นแต่ความเสถียรของความขาวสว่างต่อความร้อนลดลง

กระดาษจากเยื่อไม้ฟอกมีแนวโน้มของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ไม่แน่ชัด หลังการเร่งอายุกระดาษด้วยความร้อน แต่เมื่อเร่งอายุด้วยแสง พบว่ากระดาษมีแนวโน้มของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนเร่งอายุและมีอัตราการเพิ่มที่สูงขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น เว้นแต่ถ้าใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 120 นาที ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนมากกว่า 18.6 U/g สำหรับในเยื่อฟอก เมื่อทำการเร่งอายุด้วยความร้อนพบว่า เมื่อใช้ไฮโดรเจนจะทำให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนเร่งอายุ และมีอัตราการเพิ่มมากกว่ากระดาษจากเยื่อที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรเจน ยกเว้นเมื่อใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเป็นเวลา 120 นาที และเมื่อเร่งอายุด้วยแสงพบว่ากระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยกระดาษจากเยื่อที่ผ่านการใช้ไฮโดรเจนจะมีอัตราการเพิ่มที่น้อยกว่าที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรเจน ยกเว้นเมื่อใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักเยื่อแห้งเป็นเวลา 120 นาที

เมื่อนำกระดาษไม่ฟอกไปเร่งอายุด้วยความร้อนพบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงเมื่อเทียบกับไม่ได้เร่งอายุ โดยมีอัตราของการลดของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่ลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับหลังเร่งอายุด้วยแสง สำหรับกระดาษที่ผ่านการฟอกพบว่า หลังเร่งอายุด้วยความร้อน ดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าลดน้อยลงเมื่อเทียบกับก่อนเร่งอายุ โดยกระดาษจากเยื่อฟอกที่ผ่านการใช้ไฮโดรเจนในขั้นต้นก่อนการฟอกมีแนวโน้มของการลดลงของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่าที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรเจนในขั้นต้นก่อนการฟอก แต่ถ้าใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 5 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จะพบว่ากระดาษจะมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยเยื่อที่ผ่านการใช้ไฮโดรเจนจะมีอัตราการเพิ่มที่น้อยกว่าที่ไม่ได้ใช้ และหากทำการเร่งอายุกระดาษด้วยแสงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ไม่แน่นอน

จากผลการทดลองโดยรวมทั้งหมด สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าการใช้ไฮโดรเจนจะส่งผลต่อสมบัติทางความแข็งแรงของผลผลิตกระดาษที่ได้ ซึ่งหากผลิตภัณฑ์กระดาษที่ต้องการนั้นเน้นวัตถุประสงค์การใช้งานทางด้านความแข็งแรงเป็นหลัก ควรหลีกเลี่ยงการใช้ไฮโดรเจนเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อก่อนนำไปขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์กระดาษ แต่หากต้องมีการฟอกเยื่อก่อนนำไปผลิตเป็นกระดาษ หรือมีการคำนึงถึงสมบัติเชิงแสงและความคงทนของกระดาษร่วมด้วย ควรเลือกใช้ไฮโดรเจนที่มีความเข้มข้นต่ำเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อในขั้นต้นก่อนการฟอก และฟอกเยื่อที่ปริมาณ

ของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่ำ โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาของไฮแลเนสและเวลาในการฟอกน้อย จะให้กระดาษที่มีความแข็งแรงที่เหมาะสมโดยที่มีความคงทนของทั้งสมบัติด้านความแข็งแรงและสมบัติเชิงแสงในระยะยาวที่สูงกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการกลั่นสกัดเยื่อเพื่อวิเคราะห์ปริมาณเพนโทซาน ควรควบคุมความร้อนของอุปกรณ์ที่ให้ความร้อนกับพลาสติกก้นกลมให้คงที่และเหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณของของเหลวที่กลั่นสกัดได้อย่างสม่ำเสมอตามที่มาตรฐานกำหนด และหากมีปริมาณของไฮแลเนสเกินพอ ควรใช้ไฮแลเนสทำปฏิกิริยากับเยื่อให้ครบหมดทุกสภาวะการทดลองที่ทำการคำนวณเยื่อเพื่อไว้ใช้หลังการฟอกด้วยแล้ว เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้จากการใช้ไฮแลเนสเข้าทำปฏิกิริยากับเยื่อใหม่อีกครั้งเพื่อนำเยื่อไปฟอกต่อไป

ควรทำการทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุเพิ่มเติมในส่วนของการทำการทดลอง เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติทางด้านความแข็งแรงของกระดาษในแต่ละสภาวะการทดลองให้ได้ผลที่ชัดเจนมากขึ้น อีกทั้งควรทดสอบค่าความคงรูปหรือความแกร่งของกระดาษหลังจากผ่านการเร่งอายุกระดาษ เพื่อพิจารณาอิทธิพลของการเร่งอายุต่อการเปลี่ยนแปลงของคาร์โบไฮเดรตที่ส่งผลต่อความคงรูปและค่าความแข็งแรงตึงของกระดาษ นอกจากนี้การพิจารณาลักษณะโครงสร้างของกระดาษที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการเร่งอายุ โดยการใช้อุปกรณ์จุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูงแบบ SEM (Scanning Electron Microscope) ร่วมด้วย จะทำให้การวิเคราะห์ผลจากการเร่งอายุต่อสมบัติกระดาษมีความง่ายและชัดเจนมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] Sjöström, E. Wood Chemistry: Fundamentals and Applications. 2nd edition. California, USA : Academic Press Inc., 1992.
- [2] Nguyen, D., et al. Bleaching of Kraft Pulp by a Commercial Lipase: Accessory Enzymes degrade Hexenuronic Acids. Enzyme and Microbial Technology 43 (2008) : 130-136.
- [3] Danialsson, S. Xylan Reactions in Kraft Cooking. Doctoral dissertation, Department of Fibre and Polymer Technology School of Chemical Sciences and Engineering Royal Institute of Technology, Sweden, 2007.
- [4] Jiang, Z., Lierop, B.V., and Berry, R. Hexenuronic Acid Groups in Pulping and Bleaching. Annual Pulp and Paper Congress and Exhibition 35 (2002) : 1-17.
- [5] พลังงาน, กระทรวง. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ภาพรวมของอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: www2.dede.go.th/kmberc/datacenter/factory/paper/chapter1.doc [2544, เมษายน 7]
- [6] อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษในประเทศไทย [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.diw.go.th/EMS%20for%20SMEs%20Website/page%203_files/text/env/pulp-paper/thai/chap2.pdf [2544, เมษายน 7]
- [7] Mimms, A, Kocurek, M.J., Pyatte, J.A., and Wright, E.E. Kraft Pulping: A Compilation of Notes. Atlanta, USA : TAPPI Press, 1989.
- [8] Smook, G.A. Handbook for Pulp & Paper Technologists. 3rd edition. Vancouver, Canada : Angus Wilde Publication Inc., 2002.
- [9] ทองพูน วรธนโพธิ์. ไม้ป่าเศรษฐกิจ - ยุคาลิปัตส์ คามาสดูเลนซิส. กรุงเทพมหานคร : นานาสาส์น, 2543.

- [10] Sjö Dahl, R.G. Some Aspects on the Effects of Dissolved Wood Components in Kraft Pulp. Doctoral dissertation, Department of Fibre and Polymer Technology School of Chemical Sciences and Engineering Royal Institute of Technology, Sweden, 2006.
- [11] หรรษา ปุณณะพยัคฆ์. พฤกษศาสตร์เชิงอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [12] Ebringgerová, A., Hromádková, Z., and Heinze, T. Hemicellulose. Advances in Polymer Science 186 (2005) : 1-67.
- [13] Clayton, D.W. The Alkaline Degradation of some Hardwood 4-O-methyl-D-glucuronoxylan. Svensk Papperstidn 66 (1963) : 115-124.
- [14] Johansson, M. H., and Samuelsson, O. Epimerization and Degradation of 2-O-(4-O-methyl- α -D-glucopyranosyluric acid)-D-xylitol in Alkaline Medium. Carbohydrate Research 54 (1977) : 295-299.
- [15] Teleman, A., et al. Characterization of 4-deoxy- β -L-threo-hex-4-enopyranosyluronic Acid attached to Xylan in Pine Kraft Pulp and Pulping Liquor by ^1H and ^{13}C NMR Spectroscopy. Carbohydrate Research 272 (1995) : 55-71.
- [16] Petit-Breuilh, X., Zaror, C., and Melo, R. Hexenuronic Acid Removal from unbleached Kraft Eucalyptus Pulp by Peroxymonosulfuric Acid. Journal of the Chilean Chemistry Society 49 (2004) : 355-360.
- [17] Casey, J.P. Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology. 3rd edition. New York, USA : Wiley – Interscience, 1980.
- [18] Dence, C.D., and Reeve D.W. Pulp Bleaching: Principles and Practice. Atlanta, USA : TAPPI Press, 1996.
- [19] Viikari, L., Kantelinen, A., Sundquist, J., and Linko, M. Xylanases in Bleaching: From an Idea to the Industry. FEMS Microbiology Reviews 13 (March 1994) : 335-350.

- [20] Tsao, G.T., and Chiang L.C. Cellulosic Material as a Renewable Resource. Cellulose and Hemicellulose Technology 4 (1983) : 296-231.
- [21] Rahman, S.H.A., Choudhury, J.P., and Ahmad, A.L. Production of Xylose from Oil Palm Empty Fruit Brunch Fiber Using Sulfuric Acid. Biochemical Engineering Journal 30 (2006) : 97-103.
- [22] Gilbert, H.J., and Hazlewood, G.P. Bacterial Cellulose and Xylanase. Journal Microbiology 139 (1993) : 187-194.
- [23] Dekker, R.F.H. Bioconversion of Hemicelluloses Production by *T. reesei* QM 9414 and Enzymatic Saccharification of Hemicelluloses. Biotechnology and Bioengineering 25 (1983) : 1127-1146.
- [24] Manin, C.F., Shareek, Morosoli, R., and Kluepfel, D. Purification and Characterization of an α -L-arabinofuranosidase from *Streptomyces lividans* 66 and DNA Sequence of the Gene (abfA). Biochemical Journal. 302 (1994) : 443-449.
- [25] Whistler, R.H.A., and Richards, E.L. Hemicelulase in the Carbohydrates. New York, USA : Academic Press, 1970.
- [26] Department of Chemistry The University of Maine, USA, Xylanases [online]. Available from: <http://chemistry.umeche.maine.edu/CHY431/Wood14.html> [2011, April 10]
- [27] Shatalov., A.A., and Pereira, H. Effect of Xylanases Bleachability of Eucalypt (*E. globulus*) Kraft Pulp. Biochemical Engineering Journal 40 (2008) : 19-26.
- [28] Cadena, E.M., Vidal, T., and Torres, A.L. Influence of the Hexenuronic Acid Content on Refining and Aging in Eucalyptus TCF Pulp. Bioresource Technology 101 (2010) : 3554-3560.

- [29] Roncero, M.B., Torres, A.L., Colom, J.F., and Vidal, T. The Effect of Xylanase on Lignocellulosic Components During the Bleaching of Wood Pulps. Bioresource Technology 96 (2005) : 21-30.
- [30] Gellerstedt, G., and Li, J. The Contribution to Kappa Number from Hexenuronic Acid Groups in Pulp Xylan. Carbohydrate Research 302 (1997) : 213-218.
- [31] Christov, L.P., and Prior B.A. Xylan Removal from Dissolving Pulp Using Enzymes of *Aureobasidium pullulans*. Biotechnology Letters 15 (1993) : 1269-1274.
- [32] Leathers, T.D., Kurtzman, C.P., and Detroy, R.W. Overproduction and Regulation of Xylanase in *Aureobasidium pullulans* and *Cryptococcus albidus*. Biotechnology and Bioengineering 12 (1984) : 225-240.
- [33] สุธิดา มุลาลินน์. การผลิตเยื่อและการฟอกเยื่อด้วยไซแลเนสของหญ้าคา *Imperata cylindrical* (L.) P Beauv. และหญ้าแฝก *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [34] Zhao, J., Li, X., Qu, Y., and Gao, P. Xylanase Pretreatment leads to enhanced Soda Pulping of Wheat Straw. Enzyme and Microbial Technology 30 (2002) : 734-740.
- [35] Department of Chemistry University of Natural Resources and Applied Life Science Vienna (BOKU), Austria, Synthesis and Chromophore Formation Reactions of Hexenuronic Acid model Compounds [online]. Available from: http://www.boku.ac.at/fileadmin/_vibt/Forschung/Poster-Preise_08/Poster_Krainz_IPBC_Quebec_2008.pdf.pdf [2011, April 10]
- [36] Roberts, J.C., McCarthy, A.J., Flynn, N.J., and Broda, P. Modification of Paper Properties by the Pretreatment of Pulp with *Saccharomonospora viridis* xylanase. Enzyme and Microbial Technology 12 (1990) : 210-213.

- [37] Kocurek, M.J., and Stevens, F. Pulp and Paper Manufacture: Properties of Fibrous Raw Materials and Their Preparation for Pulping. 3rd edition. Georgia, USA : McGraw-Hill, 1983.
- [38] Roncero, M.B., Torres, A.L., Colom, J.F., and Vidal, T. TCF Bleaching of Wheat Straw Pulp using Ozone and Xylanase Part A: Paper Quality assessment. Bioresource Technology 87 (2003) : 305-314.
- [39] Shatalov, A.A., and Pereira, H. Impact of Hexenuronic Acids on Xylanase-aided Bio-bleaching of Chemical Pulps. Bioresource Technology 100 (2009) : 3069-3075.
- [40] Ragauskas, A.J., Poll, K.M., and Cesternino, A.J. Effects of Xylanase Pretreatment Procedures on Nonchlorine Bleaching. Enzyme and Microbial Technology 16 (1994) : 492-495.
- [41] Gil, N., Gil, C., Ameral, M.E., Costa, A.P., and Duarte, A.P. Use of Enzymes to improve the Refining of a bleached *Eucalyptus globules* Kraft Pulp. Biochemical Engineering Journal 46 (2009) : 89-95.
- [42] Garg, A.P., McCarthy, A.J., and Roberts, J.C. Biobleaching Effect of *Streptomyces thermoviolaceus* Xylanase Preparation on Birchwood Kraft Pulp. Enzyme and Microbial Technology 18 (1996) : 261-267.
- [43] Atik, C., Imamoglu, S., and Bermek, H. Impact of Xylanase Pre-treatment on Peroxide Bleaching Stage of Biokraft Pulp. International Biodeterioration and Biodegradation 58 (2006) : 22-26.
- [44] Wong, K.K.Y., Nelson, S.L., and Saddler, J.N. Xylanase Treatment for the Peroxide Bleaching of Oxygen delignified Kraft Pulps derived from three Softwood Species. Journal of Biotechnology 48 (1996) : 137-145.
- [45] Roncero, M.B., Torres, A.L., Colom, J.F., and Vidal, T. Effects of Xylanase Treatment on Fibre Morphology in Totally Chlorine Free Bleaching (TCF) of *Eucalyptus* Pulp. Process Biochemistry 36 (2000) : 45-50.

- [46] Wikipedia, Photobleaching [online]. Available from:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Photobleaching> [2011, April 22]
- [47] Wikipedia, Fluorophore [online]. Available from:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Fluorophore> [2011, April 22]
- [48] Ganicheva, S.I., Bystrova, E.S., and Lotsmanova, E.M. Influence of Thermal Aging Conditions on the Molecular Characteristics of Cellulose and Mechanical Properties of Paper Thereof. Russian Journal of Applied Chemistry 77 (2004) : 1172-1177.
- [49] Malêsic, J., Kolar, J., Strlic, M., Kocar, D., Fromageot, D., Lemaire, J., and Haillant, O. Photo-induced Degradation of Cellulose. Polymer Degradation and Stability 89 (2005) : 64-69.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อและวิธีเตรียม

1. Yeast Malt Xylan Agar (YMXA), [31]

Yeast extract	5	กรัม
Malt extract	5	กรัม
Bacto peptone	5	กรัม
Xylan	20	กรัม
Agar	15	กรัม

ละลายส่วนผสมแต่ละชนิดด้วยน้ำกลั่น โดยทำการละลายแยกกัน แล้วนำมาผสมกัน ปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร แล้วนำจึงนำไปนึ่งฆ่าเชื้อ

2. Basal Medium [32]

Xylan	10	กรัม
Yeast-nitrogenous base	6.7	กรัม
Asperagine	2	กรัม
KH_2PO_4	5	กรัม

ละลายส่วนผสมแต่ละชนิดด้วยน้ำกลั่น โดยทำการละลายแยกกัน แล้วนำมาผสมกัน ปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร แล้วนำจึงนำไปนึ่งฆ่าเชื้อ

3. Xylanase Production Medium (XPM), [32]

Xylan	10	กรัม
Yeast-nitrogenous base	6.7	กรัม
Asperagine	2	กรัม
KH_2PO_4	5	กรัม

ละลายส่วนผสมแต่ละชนิดด้วยน้ำกลั่น โดยทำการละลายแยกกัน แล้วนำมาผสมกัน ปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร แล้วนำจึงนำไปนึ่งฆ่าเชื้อ

ภาคผนวก ข

การเตรียมสารเคมี

การเตรียมสารเคมีสำหรับตรวจหาค่าแอกติวิตีของเอนไซม์

1. Reagent A

Na_2CO_3	25	กรัม
NaK Tartrate (Rochelle salt)	25	กรัม
NaHCO_3	20	กรัม
Na_2SO_4	200	กรัม

ละลายสารข้างต้นทั้งหมดให้เข้ากัน ปรับปริมาตรโดยใช้ฟลาสก์เชิงปริมาตร ให้มีปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 100 มิลลิลิตร

2. Reagent B (Copper alkaline reagent)

CuSO_4	15	กรัม
-----------------	----	------

ละลายสารแล้วปรับปริมาตรโดยใช้ฟลาสก์เชิงปริมาตร ให้มีปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 100 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2 หยด

3. Reagent C

ปิเปต Reagent A 25 มิลลิลิตร ผสมกับ Reagent B 1 มิลลิลิตร (เตรียมใหม่ทุกครั้งที่ใช้)

4. Reagent D (arsenomolybdate reagent)

ละลาย ammonium molybdate 25 กรัม ในน้ำ 450 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากันแล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 21 มิลลิลิตร แล้วเติม $\text{Na}_2\text{HASO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ที่ละลายในน้ำ 25 มิลลิลิตรลงไป เก็บสารละลายที่ได้ในขวดสีชา นำไปปมที่ 37 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 วัน

การเตรียมสารเคมีสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณเพนโทซาน

1. กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 3.85 N

เจือจางกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ปริมาตร 315 มิลลิลิตร ในน้ำ 1,000 มิลลิลิตร แล้วไทเทรตตรวจสอบความเข้มข้นให้อยู่ในช่วง 3.85 ± 0.05 N

2. สารละลายออกซินอล

$\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_3(\text{OH})_2$ 0.400 กรัม

$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.500 กรัม

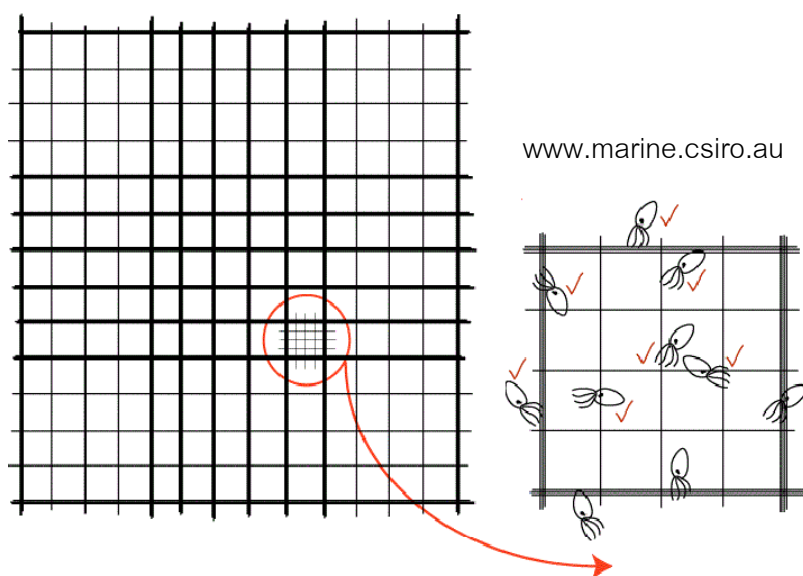
กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 11N 1,000 มิลลิลิตร

เตรียมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 11N โดยการเจือจางไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาตร 915 มิลลิลิตรในน้ำ 1,000 มิลลิลิตร ไทเทรตตรวจสอบความเข้มข้นอีกครั้ง แล้วผสมสารเคมีทุกตัวให้เข้ากัน เก็บในตู้เย็นไม่ให้โดนแสงและเตรียมใหม่เมื่อสารละลายมีอายุเกินสองสัปดาห์

ภาคผนวก ค

การนับเซลล์ด้วยวิธี Direct microscopic count โดยใช้ Haemocytometer

Haemocytometer มีลักษณะเป็นสไลด์มีช่องแบ่งไว้เป็นตาราง โดยปกติเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับนับเม็ดเลือด แต่สามารถนำมาประยุกต์ใช้นับเซลล์ราหรือยีสต์ได้ เมื่อปิดด้วย cover slip แล้ว จะมีความลึกระหว่างตัวสไลด์กับ cover slip ทำให้ของเหลวที่มีตัวอย่างที่ต้องการนับจำนวนสามารถบรรจุไว้ได้ โดยขีดแบ่งจะแบ่งออกเป็นช่องสี่เหลี่ยมจตุรัส จำนวน 25 ช่อง ช่องละ 0.2×0.2 ตารางมิลลิเมตร ตามรูปที่ ค-1 ภายในแต่ละช่องจะแบ่งออกเป็น 16 ช่องขนาดเล็ก แต่ละช่องมีขนาด 0.05×0.05 ตารางมิลลิเมตร ดังนั้นเมื่อปิดทับด้วย cover slip ของเหลวที่บรรจุอยู่ในช่องว่างระหว่างสไลด์กับ cover slip จะมีปริมาตร 0.00025 ลูกบาศก์มิลลิเมตร



รูปที่ ค-1 ลักษณะแนวเส้นของ Haemocytometer

เพื่อให้เป็นการสะดวกและแม่นยำในการนับ ควรทำการเจือจางเซลล์ก่อนไม่ให้เจือจางหรือหนาแน่นจนเกินไป วิธีการนับเซลล์สามารถทำได้โดยหยดตัวอย่างที่ต้องการนับที่ผ่านการเจือจางให้เหมาะสมแล้ว ลงบน Haemocytometer แล้วปิดทับด้วย cover slip แล้วใช้กล้องจุลทรรศน์ในการตรวจนับ โดยหากนับจากช่องขนาดใหญ่ ควรนับอย่างน้อย 5 ช่อง

วิธีการคำนวณ

ปริมาตรใน 25 ช่องขนาดใหญ่ (400 ช่องเล็ก) = 0.1 ลูกบาศก์มิลลิเมตร
 สมมติค่าเฉลี่ยจำนวนเซลล์ใน 1 ช่องขนาดใหญ่ = x เซลล์
 สมมติค่าเฉลี่ยจำนวนเซลล์ใน 1 ช่องขนาดเล็ก = y เซลล์
 จะได้ $x = 16y$ เซลล์
 ใน 0.1 ลบ.มม. มีเซลล์ทั้งหมด $(x)(25)$ หรือ $(y)(16)(25)$ เซลล์
 ใน 1 ลบ.มม. มีเซลล์ทั้งหมด $(x)(25)(10)$ หรือ $(y)(16)(25)(10)$ เซลล์
 หรือเท่ากับ $(x)(25)(10^4)$ หรือ $(4)(y)(10^6)$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร

ภาคผนวก ง

การเตรียมเยื่อ และการคำนวณ

การคำนวณหาน้ำหนักเยื่อยูคาลิปตัส

ตัวอย่าง

ถ้าเยื่อสดมีความชื้นร้อยละ 74.1 แสดงว่ามีปริมาณน้ำยูรีออละ 74.1 และมีปริมาณเยื่อแห้งยูรีออละ 25.9 (จาก 100.0 - 74.1)

ดังนั้น ถ้าต้องการน้ำหนักเยื่อแห้งของยูคาลิปตัสเท่ากับ 200 กรัม สามารถคำนวณได้ตามการเทียบบัญญัติไตรยางศ์จากข้อมูลที่มี ดังนี้

มีเยื่อแห้งปริมาณ 25.9 กรัม ในเยื่อสด 100 กรัม

ถ้าต้องการเยื่อแห้งปริมาณ 200 กรัม จะต้องชั่งเยื่อสดมา $(100 \times 200) \div 25.9$

หรือเท่ากับ 772.20 กรัม

ดังนั้น จะต้องชั่งเยื่อสดมา 772.20 กรัม เพื่อให้ได้เยื่อแห้งปริมาณ 200 กรัมแห้ง

การคำนวณปริมาณไซแลนเนสจากค่าแอกติวิตีเพื่อใช้ทำปฏิกิริยากับเยื่อ

ตัวอย่าง

ถ้าไซแลนเนสมีค่าแอกติวิตีเท่ากับ 17.92 ยูนิตต่อมิลลิลิตร และต้องใช้ไซแลนเนสความเข้มข้น 6.2 U/g ทำปฏิกิริยากับเยื่อแห้งปริมาณ 350 กรัม สามารถคำนวณปริมาณไซแลนเนสที่ต้องใช้ ดังนี้

$$(6.2 \times 350) \div 17.92 = 121.09 \text{ มิลลิลิตร}$$

นั่นคือ จะต้องใช้ไซแลนเนสเท่ากับ 121.09 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับเยื่อแห้งปริมาณ 350 กรัมเพื่อที่จะให้ได้ความเข้มข้นของไซแลนเนสเท่ากับ 6.2 U/g

การคำนวณปริมาณน้ำเยื่อ (Stock) สำหรับการขึ้นแผ่นกระดาษ

ตัวอย่าง

ถ้าต้องการขึ้นแผ่นกระดาษให้มีน้ำหนักมาตรฐานเท่ากับ 75 กรัมต่อตารางเมตร และตะแกรงขึ้นแผ่นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร โดยกำหนดความชื้นของน้ำเยื่อในการขึ้นแผ่นเท่ากับร้อยละ 0.3 และความชื้นของน้ำเยื่อหลังการกระจายเยื่อเท่ากับร้อยละ 30 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

ปริมาณเยื่อแห้งต่อกระดาษ 1 แผ่น สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ของตะแกรงขึ้นแผ่น} &= (3.14) \times (0.2 \div 2) \\ &= 0.0314 \text{ ตารางเมตร} \end{aligned}$$

ในพื้นที่ 1 ตารางเมตร มีน้ำหนักเยื่อแห้งเท่ากับ 75 กรัม

$$\text{ถ้าพื้นที่ } 0.0314 \text{ ตารางเมตร จะมีน้ำหนัก } 0.0314 \times 75 = 2.355 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นในกระดาษ 1 แผ่น จะมีเยื่อแห้งอยู่ 2.355 กรัม

จากความชื้นของน้ำเยื่อหลังการกระจายเยื่อเท่ากับร้อยละ 30 แต่ต้องการขึ้นแผ่นที่ความชื้นของเยื่อร้อยละ 0.3 ต้องทำการปรับความชื้นโดยใช้สูตร

$$\begin{aligned} C_1 V_1 &= C_2 V_2 \\ (30)(500) &= (0.3)V_2 \\ V_2 &= 50,000 \text{ มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นต้องทำการเติมน้ำเพิ่มเท่ากับ $50,000 - 500 = 49,500$ มิลลิลิตร

เมื่อต้องการขึ้นแผ่นกระดาษ 1 แผ่น จะต้องตวงน้ำเยื่อมาตามการคำนวณดังนี้

มีเยื่อแห้ง 0.3 กรัม ในน้ำเยื่อ 100 มิลลิลิตร

$$\text{ถ้าต้องการเยื่อแห้ง } 2.355 \text{ กรัม ต้องตวงน้ำเยื่อมา } (2.355 \times 100) \div 0.3 = 785 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้น ต้องทำการตวงน้ำเยื่อมา 785 มิลลิลิตร ต่อการขึ้นแผ่นกระดาษจำนวน 1 แผ่น

ภาคผนวก จ

ข้อมูลทางสถิติ

ส่วนการวิเคราะห์ผลของไซแลเนสต่อปริมาณเพนโทซานในเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสไม่ฟอก

Anova: Two-Factor With Replication

หมายเหตุ Sample: ความเข้มข้นของไซแลเนส
Column: เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

Pentosan

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Sample	0.553665	2	0.276833	0.687024	0.521807	3.885294
Columns	24.6975	3	8.232501	20.43086	5.24E-05	3.490295
Interaction	2.263711	6	0.377285	0.936321	0.504112	2.99612
Within	4.835333	12	0.402944			
Total	32.35021	23				

ส่วนการวิเคราะห์ผลของไซแลเนสต่อสมบัติกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสไม่ฟอก

Anova: Two-Factor With Replication

หมายเหตุ Sample: ความเข้มข้นของไซแลเนส
Column: เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

Density

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Sample	0.000176	2	8.78E-05	2.521272	0.090951	3.190727
Columns	0.001899	3	0.000633	18.18393	5.09E-08	2.798061
Interaction	0.001656	6	0.000276	7.930049	5.78E-06	2.294601
Within	0.001671	48	3.48E-05			
Total	0.005401	59				

Whiteness

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	1.47897	2	0.739485	3.833411	0.026181	3.123907
Columns	106.8186	3	35.60619	184.5786	1.01E-33	2.731807
Interaction	8.822308	6	1.470385	7.622316	2.37E-06	2.227404
Within	13.88918	72	0.192905			
Total	131.009	83				

Brightness

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	0.280181	2	0.14009	2.335212	0.10408	3.123907
Columns	14.0716	3	4.690535	78.18799	1.34E-22	2.731807
Interaction	1.690657	6	0.281776	4.697015	0.000437	2.227404
Within	4.319314	72	0.05999			
Total	20.36176	83				

Opacity

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	0.735543	2	0.367771	1.779102	0.176129	3.123907
Columns	3.810023	3	1.270008	6.143688	0.000886	2.731807
Interaction	1.252552	6	0.208759	1.009875	0.425793	2.227404
Within	14.88366	72	0.206717			
Total	20.68178	83				

Tensile index

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	2.107803	2	1.053901	2.144142	0.128258	3.190727
Columns	38.83498	3	12.94499	26.33634	3.23E-10	2.798061
Interaction	10.35681	6	1.726136	3.511789	0.005833	2.294601
Within	23.59325	48	0.491526			
Total	74.89284	59				

Tear index

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	0.018403	2	0.009202	0.541558	0.585354	3.190727
Columns	0.019842	3	0.006614	0.389269	0.761237	2.798061
Interaction	0.089083	6	0.014847	0.873814	0.521119	2.294601
Within	0.815579	48	0.016991			
Total	0.942908	59				

ส่วนการวิเคราะห์ผลของไซแลเนสต่อสมบัติกระดาษจากเยื่อคราฟต์ยูคาลิปตัสที่ผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Anova: Two-Factor With Replication

หมายเหตุ Sample: ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
Column: เวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ

ชุดการทดลองควบคุม (ไม่มีการใช้ไซแลเนส)

Density

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Sample	0.000564	1	0.000564	4.207952	0.056979	4.493998
Columns	0.004199	1	0.004199	31.35388	3.99E-05	4.493998
Interaction	2.63E-05	1	2.63E-05	0.196093	0.663822	4.493998
Within	0.002143	16	0.000134			
Total	0.006932	19				

Whiteness

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Sample	24.12429	1	24.12429	179.9233	1.21E-12	4.259677
Columns	49.929	1	49.929	372.3795	4.03E-16	4.259677
Interaction	57.05718	1	57.05718	425.5427	8.86E-17	4.259677
Within	3.217943	24	0.134081			
Total	134.3284	27				

Brightness

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	451.9152	1	451.9152	12883.34	1.1E-24	4.493998
Columns	2.835045	1	2.835045	80.82232	1.18E-07	4.493998
Interaction	2.570445	1	2.570445	73.27903	2.28E-07	4.493998
Within	0.56124	16	0.035078			
Total	457.882	19				

Opacity

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	25.02085	1	25.02085	65.53863	4.75E-07	4.493998
Columns	10.03945	1	10.03945	26.29693	0.000101	4.493998
Interaction	11.11541	1	11.11541	29.11526	5.94E-05	4.493998
Within	6.10836	16	0.381773			
Total	52.28406	19				

Tensile index

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	0.051189	1	0.051189	0.038527	0.846859	4.493998
Columns	0.174382	1	0.174382	0.131249	0.721881	4.493998
Interaction	0.128347	1	0.128347	0.096601	0.75996	4.493998
Within	21.25817	16	1.328636			
Total	21.61209	19				

Tear index

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	0.058458	1	0.058458	11.44337	0.003795	4.493998
Columns	0.004803	1	0.004803	0.940222	0.346652	4.493998
Interaction	0.002809	1	0.002809	0.549846	0.469126	4.493998
Within	0.081735	16	0.005108			
Total	0.147804	19				

ใช้ไซแลนส์ที่ความเข้มข้น 18.6 U/g

Density

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	6.83E-05	1	6.83E-05	0.640096	0.431524	4.259677
Columns	0.000343	1	0.000343	3.219538	0.085372	4.259677
Interaction	0.000431	1	0.000431	4.036819	0.055893	4.259677
Within	0.00256	24	0.000107			
Total	0.003402	27				

Whiteness

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	1.851176	1	1.851176	40.05493	1.53E-06	4.259677
Columns	5866.72	1	5866.72	126941.5	3.35E-46	4.259677
Interaction	1.641967	1	1.641967	35.52816	3.75E-06	4.259677
Within	1.109182	24	0.046216			
Total	5871.322	27				

Brightness

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	5.315714	1	5.315714	156.1095	5.39E-12	4.259677
Columns	10.49213	1	10.49213	308.1281	3.38E-15	4.259677
Interaction	11.83	1	11.83	347.4181	8.81E-16	4.259677
Within	0.817229	24	0.034051			
Total	28.45507	27				

Opacity

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	2.574289	1	2.574289	64.45507	2.96E-08	4.259677
Columns	1.449175	1	1.449175	36.28445	3.21E-06	4.259677
Interaction	6.634889	1	6.634889	166.1244	2.81E-12	4.259677
Within	0.958543	24	0.039939			
Total	11.6169	27				

Tensile index

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	0.980441	1	0.980441	0.964373	0.335884	4.259677
Columns	30.62278	1	30.62278	30.12091	1.21E-05	4.259677
Interaction	0.305889	1	0.305889	0.300876	0.588401	4.259677
Within	24.39988	24	1.016662			
Total	56.30899	27				

Tear index

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Sample	0.011074	1	0.011074	0.639911	0.43159	4.259677
Columns	0.035919	1	0.035919	2.075643	0.162587	4.259677
Interaction	0.033693	1	0.033693	1.94699	0.17569	4.259677
Within	0.415325	24	0.017305			
Total	0.496011	27				

ส่วนการวิเคราะห์ผลของไซแลเนสต่อความคงทนของกระดาษจากเยื่อกราฟต์ยูคาลิปตัส
ไม่พอก

Anova: Two-Factor With Replication

หมายเหตุ Sample: ความเข้มข้นของไซแลเนส
Column: เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

เร่งอายุด้วยความร้อน

Whiteness

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Sample	2.20115	2	1.100575	5.905906	0.004217	3.123907
Columns	27.20994	3	9.069979	48.67133	2.69E-17	2.731807
Interaction	7.968431	6	1.328072	7.1267	5.5E-06	2.227404
Within	13.41731	72	0.186352			
Total	50.79683	83				

Brightness

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	0.396331	2	0.198165	11.19152	5.86E-05	3.123907
Columns	9.292232	3	3.097411	174.9283	5.53E-33	2.731807
Interaction	0.215021	6	0.035837	2.023913	0.073403	2.227404
Within	1.274886	72	0.017707			
Total	11.17847	83				

Tensile index

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	22.43136	2	11.21568	11.72062	3.92E-05	3.123907
Columns	133.3628	3	44.45428	46.45564	8.13E-17	2.731807
Interaction	43.1304	6	7.1884	7.512026	2.85E-06	2.227404
Within	68.89816	72	0.956919			
Total	267.8228	83				

Tear index

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	0.002561	2	0.001281	0.108934	0.896937	3.123907
Columns	0.273611	3	0.091204	7.758268	0.000147	2.731807
Interaction	0.049073	6	0.008179	0.695735	0.653811	2.227404
Within	0.846408	72	0.011756			
Total	1.171653	83				

เรื่องอายุด้วยแสง

Anova: Two-Factor Without Replication

Whiteness

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Rows	1.289204	2	0.644602	7.484072	0.02343	5.143253
Columns	22.42794	3	7.47598	86.79893	2.48E-05	4.757063
Error	0.516779	6	0.08613			
Total	24.23392	11				

Brightness

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Rows	0.193129	2	0.096565	7.830884	0.021251	5.143253
Columns	3.046606	3	1.015535	82.35462	2.89E-05	4.757063
Error	0.073987	6	0.012331			
Total	3.313723	11				

Tensile index

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Rows	0.068503	2	0.034251	0.066352	0.936478	5.143253
Columns	5.555985	3	1.851995	3.587721	0.085701	4.757063
Error	3.097223	6	0.516204			
Total	8.721711	11				

Tear index

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Rows	0.003914	2	0.001957	0.320092	0.737757	5.143253
Columns	0.069282	3	0.023094	3.776987	0.078023	4.757063
Error	0.036686	6	0.006114			
Total	0.109882	11				

ส่วนการวิเคราะห์ผลของไซแลเนสต่อความคงทนของกระดาษจากเยื่อกราฟต์ยูคาลิปตัสที่ผ่านการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

Anova: Two-Factor With Replication

หมายเหตุ Sample: ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
 Column: เวลาที่ใช้ในการฟอก

เร่งอายุด้วยความร้อน

ชุดการทดลองควบคุม (ไม่ได้ใช้ไซแลเนส)

Whiteness

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	51.16509	1	51.16509	112.7762	1.5E-10	4.259677
Columns	110.6839	1	110.6839	243.9654	4.48E-14	4.259677
Interaction	11.07543	1	11.07543	24.41206	4.83E-05	4.259677
Within	10.88849	24	0.453687			
Total	183.8129	27				

Brightness

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	332.357	1	332.357	13593.34	7.17E-25	4.493998
Columns	1.378125	1	1.378125	56.36503	1.25E-06	4.493998
Interaction	1.326125	1	1.326125	54.23824	1.59E-06	4.493998
Within	0.3912	16	0.02445			
Total	335.4525	19				

Tensile index

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	2.843347	1	2.843347	2.409228	0.140176	4.493998
Columns	0.254245	1	0.254245	0.215427	0.648799	4.493998
Interaction	3.356197	1	3.356197	2.843777	0.111126	4.493998
Within	18.88304	16	1.18019			
Total	25.33683	19				

Tear index

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	0.000112	1	0.000112	0.019051	0.891941	4.493998
Columns	0.00666	1	0.00666	1.136215	0.302275	4.493998
Interaction	0.029634	1	0.029634	5.055302	0.038995	4.493998
Within	0.09379	16	0.005862			
Total	0.130196	19				

ใช้ไซแลนสความเข้มข้น 18.6 U/g

Whiteness

<i>Source of Variation</i>	SS	<i>df</i>	MS	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	3.50778	1	3.50778	12.70681	0.00157	4.259677
Columns	1908.227	1	1908.227	6912.484	4.75E-31	4.259677
Interaction	3.810669	1	3.810669	13.80401	0.001078	4.259677
Within	6.625325	24	0.276055			
Total	1922.171	27				

Brightness

<i>Source of Variation</i>	SS	<i>df</i>	MS	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	8.481004	1	8.481004	157.7547	4.83E-12	4.259677
Columns	19.47223	1	19.47223	362.2019	5.51E-16	4.259677
Interaction	3.423004	1	3.423004	63.6711	3.3E-08	4.259677
Within	1.290257	24	0.053761			
Total	32.6665	27				

Tensile index

<i>Source of Variation</i>	SS	<i>df</i>	MS	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	11.84064	1	11.84064	13.61659	0.001148	4.259677
Columns	29.41623	1	29.41623	33.8283	5.36E-06	4.259677
Interaction	0.028769	1	0.028769	0.033084	0.857196	4.259677
Within	20.86979	24	0.869574			
Total	62.15542	27				

Tear index

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	0.023625	1	0.023625	2.282203	0.143921	4.259677
Columns	0.073469	1	0.073469	7.097255	0.013578	4.259677
Interaction	0.017824	1	0.017824	1.721856	0.201867	4.259677
Within	0.248443	24	0.010352			
Total	0.363362	27				

เว้งอายุด้วยแสง

Anova: Two-Factor Without Replication

ชุดการทดลองควบคุม (ไม่ได้ใช้ไซแลเนส)

Whiteness

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Rows	405.0156	1	405.0156	529	0.027662	161.4476
Columns	2.512225	1	2.512225	3.281273	0.321121	161.4476
Error	0.765625	1	0.765625			
Total	408.2935	3				

Brightness

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Rows	36.66303	1	36.66303	22.91117	0.131116	161.4476
Columns	5.736025	1	5.736025	3.584512	0.309359	161.4476
Error	1.600225	1	1.600225			
Total	43.99928	3				

Tensile index

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Rows	0.21784	1	0.21784	0.06531	0.840716	161.4476
Columns	2.471801	1	2.471801	0.741066	0.547516	161.4476
Error	3.335467	1	3.335467			
Total	6.025107	3				

Tear index

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Rows	0.065904	1	0.065904	8776.59	0.006795	161.4476
Columns	0.053825	1	0.053825	7167.977	0.007519	161.4476
Error	7.51E-06	1	7.51E-06			
Total	0.119736	3				

ใช้ไซแลนสที่ความเข้มข้น 18.6 U/g

Whiteness

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Rows	0.003025	1	0.003025	0.001078	0.979104	161.4476
Columns	3.783025	1	3.783025	1.348372	0.452605	161.4476
Error	2.805625	1	2.805625			
Total	6.591675	3				

Brightness

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Rows	0.0049	1	0.0049	0.00471	0.956379	161.4476
Columns	0.7396	1	0.7396	0.71088	0.55405	161.4476
Error	1.0404	1	1.0404			
Total	1.7849	3				

Tensile index

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Rows	0.443404	1	0.443404	2.121432	0.383026	161.4476
Columns	7.5089	1	7.5089	35.92574	0.105244	161.4476
Error	0.209012	1	0.209012			
Total	8.161316	3				

Tear index

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Rows	0.004111	1	0.004111	0.407494	0.638309	161.4476
Columns	0.00136	1	0.00136	0.134849	0.775954	161.4476
Error	0.010088	1	0.010088			
Total	0.015559	3				

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติส่วนตัว

นายวีระยุทธ อุตมาตย์ เกิดเมื่อวันที่ 27 มีนาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดร้อยเอ็ด

ประวัติการศึกษา

ปี พ.ศ. 2551 สำเร็จปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จากนั้นได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ คณะวนศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานทางวิชาการ

Utamat, W., Suvarnakich, K., Prasongsuk, S. 2011. Effects of Xylanase on Pentosan Content and Permanency of Paper from Eucalyptus Kraft Pulp. In proceeding of The 1st National and International Silpakorn Graduate Study Conference: 1419-1423. The Princess Maha Chakri Sirindhorn Anthropology Centre, Thailand. May 10-11, 2011.

รางวัลและความสำเร็จ

ได้ประกาศเกียรติคุณ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตระดับดีมาก ภาควิชาพฤษศาสตร์ คณะวนศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย